

分析学基础

作者: 実空

组织: 无

时间: November 28, 2025

版本: ElegantBook-4.5

自定义: 信息

宠辱不惊, 闲看庭前花开花落;
去留无意, 漫随天外云卷云舒.

目录

第 1 章 实数基本定理与上下极限	1
1.1 实数基本定理	1
1.1.1 定理介绍	1
1.1.2 综合应用	1
1.2 上下极限	5
第 2 章 极限与渐近分析方法	8
2.1 基本的渐进估计与求极限方法	8
2.1.1 基本极限计算	8
2.1.1.1 基本想法	8
2.1.1.2 带 \ln 的极限计算	10
2.1.1.3 幂指函数的极限问题	11
2.1.1.4 拟合法求极限	12
2.1.2 Taylor 公式	13
2.1.2.1 直接利用 Taylor 公式计算极限	14
2.1.3 利用 Lagrange 中值定理求极限	16
2.1.4 L'Hospital's rules	18
2.1.5 与方程的根有关的渐近估计	26
2.1.5.1 可以解出 n 的类型	26
2.1.5.2 迭代方法	27
2.2 估计和式的常用方法	29
2.2.1 和式放缩成积分	29
2.2.2 强行替换 (拟合法) 和凑定积分	29
2.2.3 和式内部对 n 可求极限 (极限号与求和号可换序)	30
2.2.4 利用 Taylor 公式计算和式极限 (和式内部 n, k 不同阶)	33
2.2.5 分段估计 (Toeplitz 定理)	36
2.2.6 Euler-Maclaurin 公式 (E-M 公式)	42
2.3 Stirling 公式	51
2.4 Abel 变换	53
2.5 Stolz 定理	54
2.5.1 数列 Stolz 定理	54
2.5.1.1 利用 Stolz 定理求数列极限	57
2.5.1.2 利用 Stolz 定理求抽象数列极限	61
2.5.2 函数 Stolz 定理	67
2.6 递推数列求极限和估阶	71
2.6.1 “折线图 (蛛网图)” 分析法	71
2.6.2 单调性分析法	73
2.6.3 利用上下极限求递推数列极限	76
2.6.4 类递增/类递减递推数列	78
2.6.5 压缩映像	83
2.6.6 利用不等放缩求递推数列极限	85

2.6.7 可求通项	86
2.6.7.1 三角换元求通项	86
2.6.7.2 直接求通项公式	88
2.6.7.3 凑出可求通项的递推数列	90
2.6.7.4 直接凑出通项	92
2.6.7.5 凑裂项	92
2.6.7.6 母函数法求通项	93
2.6.7.7 强求通项和强行裂项	94
2.6.8 强行归纳法	99
2.6.9 递推数列综合问题	100
2.7 分部积分	110
2.8 Laplace 方法	113
2.9 Riemann 引理	129
2.10 极限问题综合	135
第 3 章 函数与微分	146
3.1 基本定理	146
3.2 微分学计算	146
3.2.1 单变量微分学计算	146
第 4 章 微分中值定理	153
4.1 Hermite 插值定理	153
4.2 函数构造类	160
4.2.1 单中值点问题(一阶构造类)	160
4.2.2 多中值点问题	163
4.2.3 只能猜的类型	165
4.3 中值极限问题	165
4.4 性态分析类	166
第 5 章 函数性态分析	174
5.1 基本性态分析模型	174
5.2 函数方程	181
5.3 凸函数与上半连续函数	185
5.3.1 凸函数	185
5.3.2 上半连续函数	194
5.4 函数的一致连续性	197
5.5 Dini 定理	207
5.6 更弱定义的导数	208
5.6.1 Schwarz 导数	210
5.7 逼近方法	215
5.7.1 Bernstein 多项式	215
5.7.2 可积函数的逼近	223
5.8 微分不等式问题	230
5.8.1 一阶/二阶构造类	230
5.8.2 双绝对值微分不等式问题	236
5.8.3 极值原理	241

5.9 函数性态分析综合	243
第 6 章 反常积分	254
6.1 反常积分敛散性判别	254
6.2 反常积分收敛抽象问题	270
第 7 章 积分不等式	278
7.1 著名积分不等式	278
7.2 积分不等式的应用	282
7.3 重积分方法	293
7.4 直接求导法	297
7.5 凸性相关积分不等式	301
7.6 数值比较类	305
7.7 Fourier 积分不等式	306
7.8 局部展开和能量积分法	309
7.9 其他	312
第 8 章 积分计算	338
8.1 不定积分计算	338
8.1.1 直接猜原函数	338
8.1.2 换元积分	338
8.2 定积分	339
8.2.1 建立积分递推	339
8.2.2 区间再现	343
8.2.3 Frullani(傅汝兰尼) 积分	346
8.2.4 化成多元累次积分(换序)	348
8.2.5 化成含参积分(求导)	349
8.2.6 级数展开方法	350
8.2.7 重积分计算	353
8.2.8 其他	358
8.3 含参量积分	359
8.3.1 含参量正常积分	359
8.3.2 含参量反常积分	363
8.3.2.1 含参量反常积分的一致收敛性及其判别法	363
8.3.2.2 含参量反常积分的性质	365
8.4 Euler 积分	368
第 9 章 级数	369
9.1 级数基本结论	369
9.1.1 级数的敛散性	369
9.1.2 Riemann 重排定理	383
9.1.3 幂级数阶与系数阶的关系	385
9.1.4 Cauchy 积	389
9.2 具体级数敛散性判断	394
9.2.1 估阶法	394
9.2.2 带对数换底法	397

9.2.3 Taylor 公式法	398
9.2.4 分组判别法	398
9.2.5 拟合法和积分判别法	399
9.2.6 杂题	400
9.3 级数计算	402
9.3.1 裂项方法	402
9.3.2 捂已知函数	404
9.3.3 生成函数和幂级数计算方法	406
9.3.4 多重求和	408
9.3.5 级数特殊算法(换序法)	409
9.4 级数一致收敛性判断	411
9.5 级数证明	425
9.6 特殊级数	441
第 10 章 Fourier 级数	443
10.1 Fourier 级数及基本性质	443
第 11 章 多元函数	448
11.1 多元函数的连续性和微分	448
11.2 隐函数	455
11.2.1 隐函数组	458
第 12 章 曲线积分和重积分	461
12.1 第一型曲线积分	461
12.2 第二型曲线积分	463
12.3 二重积分	465
12.3.1 二重积分的定义及其存在性	465
12.3.2 直角坐标系下二重积分的计算	470
12.3.3 Green 公式	473
12.3.4 二重积分的变量替换	477
12.4 重积分换元法	482
第 13 章 无理数初步	483
第 14 章 求和与求积符号	484
14.1 求和符号	484
14.1.1 求和号交换顺序	484
14.1.2 裂项求和	488
14.2 求积符号	490
第 15 章 未分类习题	492
15.1 杂题	492
15.2 未解决的习题	520
附录 A 常用公式	521
A.1 常用 Taylor 级数	521
A.2 常用积分公式	522

A.2.1 不定积分	522
A.3 常用初等不等式	523
A.4 重要不等式	524
A.5 基本组合学公式	529
A.6 三角函数相关	530
A.6.1 三角函数	530
A.6.2 反三角函数	531
A.6.3 双曲三角函数	533
附录 B 小技巧	534
B.1 长除法	534
B.2 将多项式分式分解为其部分因式的和	535

第1章 实数基本定理与上下极限

1.1 实数基本定理

1.1.1 定理介绍

定理 1.1 (实数基本定理)

1. 确界存在定理: 有上界的非空数集一定有上确界.
2. 单调有界原理: 单调有界数列一定收敛.
3. 柯西收敛准则: 数列 $\{x_n\}$ 收敛当且仅当任意 $\varepsilon > 0$, 存在 N 使得任意 $m, n > N$ 都有 $|x_m - x_n| < \varepsilon$.
4. 闭区间套定理: 闭区间套 $I_n = [a_n, b_n]$ 满足 $I_{n+1} \subset I_n$ 并且 $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - b_n) = 0$, 则存在唯一的 ξ , 使得 ξ 属于每一个 I_n .
5. 聚点定理: 有界数列必有收敛子列.
6. 有限覆盖定理: 有界闭集的任意一族开覆盖, 都存在有限子覆盖.



定义 1.1 (点集相关概念)

1. 如果存在 $r > 0$ 使得 $(a - r, a + r) \subset A$, 则称 a 是集合 A 的内点 (高维改为开球即可).
2. 如果一个集合 A 中的每一个点都是内点, 则称 A 是开集.
3. 如果集合 A 中的任意一个收敛序列 x_n 的极限点 x , 都有 $x \in A$, 则称 A 是闭集.
4. 设 $B \subset A$, 如果对任意 $r > 0$ 和任意 $x \in A$, 都有 $(x - r, x + r) \cap B \neq \emptyset$, 则称 B 在 A 中稠密.



1.1.2 综合应用

例题 1.1 设 $f(x) : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ 单调递增且 $f(0) > 0, f(1) < 1$, 证明: 存在 x 使得 $f(x) = x$.

笔记 因为题目条件中的函数 f 只是一个实值函数, 并没有其他更进一步的性质 (连续性、可微性、凸性等). 所以我们只能利用最基本的实数基本定理证明. 证明存在性, 考虑反证法会更加简便.

注 f 并不是连续函数, 不能用介值定理.

证明 (反证法) 假设对 $\forall x \in [0, 1]$, 都有 $f(x) \neq x$. 将闭区间 $[0, 1]$ 记作 $[a_1, b_1]$, 且由条件可知 $f(a_1) > a_1, f(b_1) < b_1$. 令 $c_1 = \frac{a_1 + b_1}{2}$, 若 $f(c_1) > c_1$, 则取 $[a_2, b_2] = [c_1, b_1]$; 若 $f(c_1) < c_1$, 则取 $[a_2, b_2] = [a_1, c_1]$. 从而得到闭区间 $[a_2, b_2] \subset [a_1, b_1]$, 并且 $f(a_2) > a_2, f(b_2) < b_2$. 以此类推, 可得到一列闭区间 $\{[a_n, b_n]\}$, 并且 $[a_n, b_n] \subset [a_{n+1}, b_{n+1}], f(a_n) > a_n, f(b_n) < b_n, \forall n \in \mathbb{N}$.

根据闭区间套定理, 可知存在唯一 $\xi = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$, 且 $\xi \in [a_n, b_n], \forall n \in \mathbb{N}$. 又由 $f(x)$ 在 $[0, 1]$ 上单调递增及 $f(a_n) > a_n, f(b_n) < b_n, \forall n \in \mathbb{N}$, 可知 $a_n < f(a_n) \leq f(\xi) \leq f(b_n) < b_n$. 令 $n \rightarrow \infty$ 可得 $\xi \leq f(\xi) \leq \xi$, 即 $f(\xi) = \xi$. 这与假设矛盾.



引理 1.1 (Lebesgue 数引理)

如果 $\{O_\alpha\}$ 是区间 $[a, b]$ 的一个开覆盖, 则存在一个正数 $\delta > 0$, 使得对于区间 $[a, b]$ 中的任何两个点 x', x'' , 只要 $|x' - x''| < \delta$, 就存在开覆盖中的一个开区间, 它覆盖 x', x'' . (称这个数 δ 为开覆盖的 Lebesgue 数.)



笔记 本题谢惠民上的证明是利用有限覆盖定理, 而 CMC 红宝书上通过直接构造出 δ 进行证明. 这里我们采用的是聚点定理进行证明.

证明 (反证法) 假设对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 取 $\delta = \frac{1}{n} > 0$, 都存在相应的 $x_n, y_n \in [a, b]$ 且 $|x_n - y_n| < \delta$, 使得对 $\forall I \in \{O_\alpha\}$, 要么 $x_n \notin I$, 要么 $y_n \notin I$. 由聚点定理可知, 有界数列 $\{x_n\}, \{y_n\}$ 一定存在收敛子列. 设 $\{x_{n_k}\}, \{y_{m_k}\}$ 为相应的收敛子列,

则由 $|x_n - y_n| < \delta = \frac{1}{n}$, $\forall n \in \mathbb{N}$ 可知 x_{n_k}, y_{m_k} 收敛于同一个极限点. 故设 $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = \lim_{k \rightarrow \infty} y_{m_k} = x_0 \in [a, b]$.

因为 $\{O_\alpha\}$ 是区间 $[a, b]$ 的一个开覆盖, 所以存在 $I_0 \in \{O_\alpha\}$, 使得 $x_0 \in I_0$. 又由于 I_0 是开集, 因此存在 $\eta > 0$, 使得 $(x_0 - \eta, x_0 + \eta) \subset I_0$. 从而由 $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = \lim_{k \rightarrow \infty} y_{m_k} = x_0 \in [a, b]$ 可知, 存在充分大的 K , 使得 $|x_{n_K} - x_0| < \eta$, $|y_{m_K} - x_0| < \eta$. 于是 $x_{n_K}, y_{m_K} \in (x_0 - \eta, x_0 + \eta) \subset I_0$. 即开区间 $I_0 \in \{O_\alpha\}$ 同时覆盖了 x_{n_K}, y_{m_K} 这两个点, 与假设矛盾.

□

注 注意对于两个收敛子列 $\{x_{n_k}\}, \{y_{m_k}\}$, 此时 $n_k = m_k$ 并不一定对 $\forall k \in \mathbb{N}$ 都成立, 即这两个收敛子列的指标集 $\{n_k\}_{k=1}^\infty, \{m_k\}_{k=1}^\infty$ 不相同也不一定有交集, 故无法利用聚点定理反复取子列的方法取到两个指标相同且同时收敛的子列 $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty, \{y_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ (取 $\{x_n\}$ 为一个奇子列收敛, 偶子列发散的数列; 取 $\{y_n\}$ 为一个奇子列发散, 偶子列收敛的数列就能得到反例.).

例题 1.2

1. 设 $f(x)$ 定义在 \mathbb{R} 中且对任意 x , 都存在与 x 有关的 $r > 0$, 使得 $f(x)$ 在区间 $(x - r, x + r)$ 中为常值函数, 证明: $f(x)$ 是常值函数.
2. 设 $f(x)$ 是定义在 $[a, b]$ 中的实值函数, 如果对任意 $x \in [a, b]$, 均存在 $\delta_x > 0$ 以及 M_x , 使得 $|f(y)| \leq M_x, \forall y \in (x - \delta_x, x + \delta_x) \cap [a, b]$, 证明: $f(x)$ 是有界的.
3. 设 $f(x)$ 定义在 \mathbb{R} 上, 对任意 $x_0 \in \mathbb{R}$ 均存在与 x_0 有关的 $\delta > 0$, 使得 $f(x)$ 在 $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ 是单调递增的, 证明: f 在整个 \mathbb{R} 上也是单调递增的.

笔记 这个结果说明: 局部常值函数就是常值函数, 闭区间上局部有界的函数都是有界函数, 局部单调递增函数在整个区间上也是单调递增的, **实数基本定理能够将局部性质扩充为整体性质**.

证明

1. **证法一(有限覆盖定理)(不建议使用):** 对任意 $x \in [a, b]$, 存在 $r_x > 0$ 使得 $f(t)$ 在区间 $(x - r_x, x + r_x)$ 为常值函数, 则 $\bigcup_{x \in [a, b]} (x - r_x, x + r_x) \supset [a, b]$, 故存在其中有限个区间 $(x_k - r_k, x_k + r_k), 1 \leq k \leq n$ 使得他们的并集包含 $[a, b]$.

直观来看只需要将这些区间“从小到大”排列, 就可以依次推出每一个区间上都是相同的一个常值函数, 但是所谓“从小到大”排列目前是无法准确定义的, 所以这样说不清楚, 优化如下:

方案 1: 选择其中个数尽可能少的区间, 使得它们的并集可以覆盖 $[a, b]$ 但是任意删去一个都不可以(这是能够准确定义的一个操作), 此时区间具备性质“任意一个不能被其余的并集盖住”, 接下来将这些区间按照左端点的大小关系来排序, 去论证它们确实是如你所想的那样“从小到大”排列的(关注右端点), 进而得证.

方案 2: 利用 **Lebesgue 数引理**, 将区间 $[a, b]$ 分为有限个 $[a, a + \delta], [a + \delta, a + 2\delta], \dots, [a + n\delta, b]$, 其中 δ 是 Lebesgue 数. 则每一个闭区间都可以被开覆盖中的某一个开区间覆盖住, 于是分段常值函数, 并且还能拼接起来, 所以是常值函数.

证法二(确界存在定理): (反证法) 假设存在 $a, b \in \mathbb{R}$, 使得 $f(a) \neq f(b)$. 构造数集

$$E = \{x \in [a, b] \mid f(t) = f(a), \forall t \in [a, x]\}.$$

从而 $E \neq \emptyset$ 且 $E \in [a, b]$. 于是由确界存在定理, 可知数集 E 存在上确界, 设 $x_0 = \sup E$.

如果 $f(a) \neq f(x_0)$, 则由条件可知, 存在 $r_0 > 0$, 使得 $f(t) = f(x_0), \forall t \in (x_0 - r_0, x_0 + r_0)$. 由 $x_0 = \sup E$ 可知, 存在 $x_1 \in (x_0 - r_0, x_0)$ 且 $x_1 \in E$. 于是 $f(t) = f(a), \forall t \in [a, x_1]$. 从而 $f(t) = f(a) = f(x_0), \forall t \in (x_0 - r_0, x_1)$. 这与 $f(x_0) \neq f(a)$ 矛盾.

如果 $f(a) = f(x_0)$, 则由条件可知, 存在 $r_1 > 0$, 使得 $f(t) = f(x_0) = f(a), \forall t \in (x_0 - r_1, x_0 + r_1)$. 又由 $x_0 = \sup E$ 可知, 存在 $x_2 \in (x_0 - r_1, x_0)$ 且 $x_2 \in E$. 于是 $f(t) = f(a), \forall t \in [a, x_2]$. 进而对 $\forall t \in [a, x_2] \cup (x_0 - r_1, x_0 + \frac{r_1}{2}] = [a, x_0 + \frac{r_1}{2}]$, 有 $f(t) = f(a)$. 从而 $x_0 + \frac{r_1}{2} \in E$, 这与 $x_0 = \sup E$ 矛盾. 故假设不成立, 命题得证.

证法三(闭区间套定理): (反证法) 假设存在 $a, b \in \mathbb{R}$, 使得 $f(a) \neq f(b)$. 不妨设 $f(a) < f(b)$, 则记闭区间 $[a, b] = [a_1, b_1]$. 若 $f(\frac{a_1 + b_1}{2}) > f(a_1)$, 则记闭区间 $[a_1, \frac{a_1 + b_1}{2}] = [a_2, b_2]$; 若 $f(\frac{a_1 + b_1}{2}) < f(b_1)$, 则记闭

区间 $[\frac{a_1+b_1}{2}, b_1] = [a_2, b_2]$. 以此类推, 可以得到一列闭区间 $\{[a_n, b_n]\}$, 满足 $[a_n, b_n] \subset [a_{n+1}, b_{n+1}]$, $f(a_n) < f(b_n), \forall n \in \mathbb{N}$. 由闭区间套定理, 可知存在唯一 $\xi = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$, 且 $\xi \in [a_n, b_n]$. 又由条件可知, 存在 $r > 0$, 使得 $f(t) = f(\xi), \forall t \in (\xi - r, \xi + r)$. 从而存在充分大的 $N \in \mathbb{N}$, 使得 $|a_N - \xi| < r, |b_N - \xi| < r$, 即 $a_N, b_N \in (\xi - r, \xi + r)$. 于是 $f(a_N) = f(b_N)$, 这与 $f(a_N) < f(b_N)$ 矛盾.

2. (聚点定理): (反证法) 假设 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上无界, 则对 $\forall n > 0$, 都存在 $x_n \in [a, b]$, 使得 $|f(x_n)| > n$. 从而得到一个有界数列 $\{x_n\}$. 由聚点定理, 可知其存在收敛子列 $\{x_{n_k}\}$, 设 $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x_0$. 由条件可知, 存在 $\delta_{x_0} > 0$ 以及 M_{x_0} , 使得 $|f(y)| \leq M_{x_0}, \forall y \in (x_0 - \delta_{x_0}, x_0 + \delta_{x_0})$. 又由 $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x_0$ 可知, 存在 $K > M_{x_0}$, 使得 $|x_{n_K} - x_0| < \delta_{x_0}$, 即 $x_{n_K} \in (x_0 - \delta_{x_0}, x_0 + \delta_{x_0})$. 于是 $|f(x_{n_K})| \leq M_{x_0}$. 而 $|f(x_{n_K})| > n_K \geq K > M_{x_0}$ 矛盾.

3. (闭区间套定理): (反证法) 假设存在 $a, b \in \mathbb{R}$, 使得 $f(a) \geq f(b)$. 记闭区间 $[a, b] = [a_1, b_1]$, 若 $f\left(\frac{a_1+b_1}{2}\right) \leq f(a_1)$, 则记闭区间 $\left[a_1, \frac{a_1+b_1}{2}\right] = [a_2, b_2]$; 若 $f\left(\frac{a_1+b_1}{2}\right) \geq f(b_1)$, 则记闭区间 $\left[\frac{a_1+b_1}{2}, b_1\right] = [a_2, b_2]$. 以此类推, 可以得到一列闭区间 $\{[a_n, b_n]\}$, 满足 $[a_n, b_n] \subset [a_{n+1}, b_{n+1}]$, $f(a_n) \geq f(b_n), \forall n \in \mathbb{N}$. 由闭区间套定理, 可知存在唯一 $\xi = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$, 且 $\xi \in [a_n, b_n]$. 由条件可知, 存在 $\delta > 0$, 使得 $f(x)$ 在区间 $(\xi - \delta, \xi + \delta)$ 上单调递增. 又由 $\xi = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$ 可知, 存在 $N > 0$, 使得 $|a_N - \xi| < \delta, |b_N - \xi| < \delta$, 即 $a_N, b_N \in (\xi - \delta, \xi + \delta)$, 且 $a_N < b_N$. 于是 $f(a_N) \leq f(b_N)$. 而 $f(a_N) \geq f(b_N)$, 这就产生了矛盾.

□

引理 1.2

设 $f(x)$ 定义在区间 I 中, 则 $f(x)$ 的全体极值构成的集合是至多可数集.

♡

证明 极值只有极大值和极小值, 因此只要证明极大值全体与极小值全体都是至多可数的即可.

设 $f(x)$ 的全体极小值构成的集合为 A , 则

$$A = \{f(x) | \exists \delta > 0, \forall t \in (x - \delta, x + \delta), f(t) \geq f(x)\}.$$

故对 $\forall y \in A$, 都存在 $x \in I$, 使得 $y = f(x)$, 并且 $\exists \delta > 0, \forall t \in (x - \delta, x + \delta), f(t) \geq f(x)$. 由有理数的稠密性可知, 存在 $r \in (x - \delta, x) \cap \mathbb{Q}, s \in (x, x + \delta) \cap \mathbb{Q}$. 从而 $(r, s) \subset (x - \delta, x + \delta)$, 于是对 $\forall t \in (r, s)$, 同样有 $f(t) \geq f(x)$.

再设全体有理开区间构成的集合为 B , 现在定义一个映射

$$\varphi : A \longrightarrow B; \quad y \longmapsto (r, s).$$

任取 $y_1, y_2 \in A$ 且 $y_1 \neq y_2$, 则存在 $x_1, x_2 \in I$, 使得 $f(x_1) = y_1, f(x_2) = y_2$. 假设 $\varphi(y_1) = \varphi(y_2) = (r_0, s_0)$, 则对 $\forall t \in (r_0, s_0)$, 都有 $f(t) \geq y_1, y_2$. 于是 $y_1 = f(x_1) \geq y_2, y_2 = f(x_2) \geq y_1$, 从而 $y_1 = y_2$, 这产生了矛盾. 故 $\varphi(y_1) \neq \varphi(y_2)$, 因此 φ 是单射.

而由全体有理开区间构成的集合 B 是至多可数的, 因此 $f(x)$ 的全体极小值构成的集合 A 也是至多可数的. 同理, $f(x)$ 的全体极大值构成的集合也是至多可数的.

□

注 由全体有理开区间构成的集合 B 是可数集的原因:

构造一个映射

$$\phi : B \longrightarrow \mathbb{Q} \times \mathbb{Q}; \quad (r, s) \longmapsto (r, s).$$

显然 ϕ 是一个双射, 而 $\mathbb{Q} \times \mathbb{Q}$ 是可数集, 故 B 也是可数集.

例题 1.3 设 $f(x)$ 在区间 I 中连续, 并且在每一点 $x \in I$ 处都取到极值, 证明: $f(x)$ 是常值函数.

注 连续这一条件不可删去, 也不可减弱为至多在可数个点不连续. 反例: 考虑黎曼函数即可, 它处处取极值, 并且在有理点不连续, 无理点连续.

证明 **证法一(引理 1.2):** (反证) 假设 $f(x)$ 不是常值函数, 则存在 $a, b \in I$, 使得 $f(a) \neq f(b)$. 由 f 的连续性及连续函数的介值性可知, $f(x)$ 可以取到 $f(a), f(b)$ 中的一切值. 故 $f(x)$ 的值域是不可数集(区间都是不可数集). 又由条件可知, $f(x)$ 的值域就是由 $f(x)$ 的全体极值构成的. 于是根据**引理 1.2**可得, $f(x)$ 的值域是至多可数集. 这与 $f(x)$ 的值域是不可数集矛盾.

证法二(闭区间套定理):假设 $f(x)$ 不是常值函数, 则存在 $a_1, b_1 \in I$, 使得 $f(a_1) \neq f(b_1)$. 不妨设 $f(a_1) < f(b_1)$. 因为 f 在 I 上连续, 所以由介值定理可知, 存在 $c_1 \in [a_1, b_1]$, 使得 $f(a_1) < f(c_1) = \frac{f(a_1) + f(b_1)}{2} < f(b_1)$. 若 $b_1 - c_1 \leq \frac{b_1 - a_1}{2}$, 则令 $[a_2, b_2] = [c_1, b_1]$; 若 $c_1 - a_1 \leq \frac{b_1 - a_1}{2}$, 则令 $[a_2, b_2] = [a_1, c_1]$. 无论哪种情况, 都有 $f(a_2) < f(b_2)$.

在 $[a_2, b_2]$ 上重复上述操作, 并依次类推下去, 得到一列闭区间套 $\{[a_n, b_n]\}$ 满足

$$[a_n, b_n] \subset [a_{n+1}, b_{n+1}], f(a_n) < f(b_n), \forall n \in \mathbb{N}.$$

由闭区间套定理可知, 存在唯一 $x_0 \in \bigcap_{n=1}^{\infty} [a_n, b_n]$, 使得 $x_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$. 再由 f 的连续性以及 Heine 归结原则可知, $f(a_n)$ 严格递增收敛于 $f(x_0)$, $f(b_n)$ 严格递减收敛于 $f(x_0)$. 故 $f(a_n) < f(x_0) < f(b_n), \forall n \in \mathbb{N}$. 因此对 $\forall \delta > 0$, 都存在 $N > 0$, 使得 $|a_N - x_0| < \delta, |b_N - x_0| < \delta$, 并且 $f(a_N) < f(x_0) < f(b_N)$. 从而 $x_0 \in I$ 不是 $f(x)$ 的极值点, 这与 f 在 I 上处处取极值矛盾.

□

定理 1.2 (Baire 纲定理)

1. 设 $A_n \subset \mathbb{R}$ 是一列没有内点的闭集, 则 $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$ 也没有内点.
2. 设 $A_n \subset \mathbb{R}$ 是一列开集并且都在 \mathbb{R} 中稠密, 则 $\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n$ 也在 \mathbb{R} 中稠密.
3. 设 $A_n \subset \mathbb{R}$ 是一列闭集, 并且 $A = \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$ 也是闭集, 则存在开区间 (a, b) (可以无穷区间) 和正整数 N 使得 $(a, b) \cap A \subset A_N$.
4. 设 A_n 是一列无处稠密集 (闭包没有内点), 则 $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$ 也没有内点.

♡

证明

1. 用反证法. 设 $x_0 \in A = \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$ 为内点, 则存在 $\delta_0 > 0$, 使得 $[x_0 - \delta_0, x_0 + \delta_0] \subset A$. 因为 A_1 没有内点, 故存在 $x_1 \in (x_0 - \delta_0, x_0 + \delta_0) - A_1$. 由于 A_1 为闭集, 故存在 $\delta_1 > 0$, 使得

$$[x_1 - \delta_1, x_1 + \delta_1] \subset (x_0 - \delta_0, x_0 + \delta_0), \quad [x_1 - \delta_1, x_1 + \delta_1] \cap A_1 = \emptyset$$

不妨设 $\delta_1 < 1$. 因为 A_2 没有内点, 故存在 $x_2 \in (x_1 - \delta_1, x_1 + \delta_1) - A_2$. 由于 A_2 为闭集, 故存在 $\delta_2 > 0$, 使得

$$[x_2 - \delta_2, x_2 + \delta_2] \subset (x_1 - \delta_1, x_1 + \delta_1), \quad [x_2 - \delta_2, x_2 + \delta_2] \cap A_2 = \emptyset$$

不妨设 $\delta_2 < \frac{1}{2}$. 如此继续, 我们得到闭区间套

$$[x_1 - \delta_1, x_1 + \delta_1] \supset [x_2 - \delta_2, x_2 + \delta_2] \supset \cdots \supset [x_n - \delta_n, x_n + \delta_n] \supset \cdots,$$

使得 $[x_n - \delta_n, x_n + \delta_n] \cap A_n = \emptyset, \delta_n < \frac{1}{n} (n \geq 1)$. 根据闭区间套原理, 存在 $\xi \in [x_n - \delta_n, x_n + \delta_n], \forall n \geq 1$. 因此 $\xi \notin \bigcup_{n \geq 1} A_n = A$, 这和 $\xi \in [x_1 - \delta_1, x_1 + \delta_1] \subset (x_0 - \delta_0, x_0 + \delta_0) \subset A$ 相矛盾.

2.

3.

4.

□

例题 1.4 设数列 a_n 单调递增趋于正无穷, 并且 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} \leq 1$, 函数 $f(x)$ 定义在 $(0, +\infty)$ 中且对任意 $x \geq 1$ 都有 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n x) = 0$.

1. 若 $f(x)$ 是连续函数, 证明: $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$;

2. 若删去连续这一条件, 或者虽然连续, 但是 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} > 1$, 则上述结论均不成立.

证明

- 对任意 $\varepsilon > 0$, 定义 $E_n = \{x \geq 1 \mid \forall k \geq n, |f(a_k x)| \leq \varepsilon\}$, 则 E_n 是一列闭集, 根据条件有 $\bigcup_{n=1}^{\infty} E_n = [1, +\infty)$. 于是根据 baire 纲定理可知存在正整数 N 和区间 (u, v) 使得 $(u, v) \subset E_N$, 也就是说, 任意 $x \in (u, v)$, 任意 $n \geq N$ 都有 $|f(a_n x)| \leq \varepsilon$, 换句话说我们得到了一个一致的 N . 因此 $|f(x)|$ 在区间 $(a_N u, a_N v), (a_{N+1} u, a_{N+1} v), \dots$ 中都是不超过 ε 的, 只要这些区间在 n 很大之后能够相互有重叠, 一个接着下一个, 全覆盖就行了. 换句话说, 我们要证明: 存在 N_0 使得任意 $n \geq N_0$ 都有 $a_{n+1} u < a_n v$, 这等价于 $\frac{a_{n+1}}{a_n} < \frac{v}{u}$, 注意条件: 极限等于 1 并且右端 $\frac{v}{u} > 1$, 所以上式成立. 将前面推导的东西梳理一下, 就是说: 任意 $\varepsilon > 0$, 存在 M 使得 $x > M$ 时恒有 $|f(x)| < \varepsilon$, 结论得证.
- 例如考虑 $a_n = n$, 定义 $f(x)$ 为: 当 $x = m \cdot 2^{\frac{1}{k}}, m \in \mathbb{N}^+$ 时候取 1, 其余情况都取 0, 则对任意的 $x > 0$, 数列 $f(nx)$ 中都至多只有一项为 1, 因此极限总是 0, 但是很明显 $f(x)$ 的极限并不存在. 另外一个反例, 可以考虑 $a_n = e^n$, 现在有连续性, 条件为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(e^n) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(e^{n+\ln x}) = 0$$

将 $\ln x \in \mathbb{R}$ 看成一个变量, 相应的考虑 $g(x) = f(e^x)$, 则连续函数 $g(x)$ 定义在 \mathbb{R} 上且满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} g(y+n) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(e^{y+n}) = 0, \forall y \in \mathbb{R}$, 我们构造一个例子使得 $g(x)$ 在无穷处极限非零或者不存在即可. 这与经典的命题有关: 设 $f(x)$ 一致连续且 $f(x+n) \rightarrow 0$ 对任意 x 成立, 则 $f(x) \rightarrow 0$, 现在删去了一致连续性命题自然是错的, 具体构造留作习题.

□

注 通常, 点态收敛 (上题) 或者数列极限 (本题) 这种非一致性的条件, 描述起来是“任意 $x \in (0, 1)$, 任意 $\varepsilon > 0$, 存在 N 使得任意 $n > N$ 都有 $|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$ ”或者“任意 $x > 0$, 任意 $\varepsilon > 0$, 存在 N 使得任意 $n > N$ 都有 $|f(a_n x)| < \varepsilon$ ”, 很明显这里的 N 是与 x, ε 都有关系的, 如果我们事先取定 $\varepsilon > 0$, 那么这个过程可以说是“给定 x , 找对应的 N ”. 而 baire 纲定理的想法就是反过来找: 不同的 x 对应的 N 确实可以不一样, 那就先取好 N , 我们看都有哪些 x 对应到这一个 N , 也就是说事先取定 $\varepsilon > 0$, 然后对每一个 n 去定义集合, 反找 x . 所有 baire 纲定理相关的问题, 思想都是如此, 根据定理便能得到一个一致的东西, 拿来做事情.

例题 1.5 设 $f(x)$ 在区间 $(0, 1)$ 中可导, 证明: $f'(x)$ 在 $(0, 1)$ 中的一个稠密子集中连续.

证明

□

1.2 上下极限

命题 1.1 (子列极限命题)

- (a): 给定 $x \in \mathbb{R} \cup \{+\infty, -\infty\}$, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$ 的充分必要条件是对任何广义存在的 $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k}$, 都有 $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x$.
(b): 设 $m \in \mathbb{N}$, 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{mn+r}, \forall r = 0, 1, 2, \dots, m-1$ 相同, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 存在且 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{mn}$.

◆

笔记 当 $m = 2$, 上述命题是在说如果序列奇偶子列极限存在且为同一个值, 则序列的极限存在且极限和偶子列极限值相同. 所谓奇偶, 就是看除以 2 的余数是 1 还是 0. 对一般的 $m \in \mathbb{N}$, 我们也可以看除以 m 的余数是 $\{0, 1, 2, \dots, m-1\}$ 中的哪一个来对整数进行分类, 即 mod m 分类. 严格的说, 我们有无交并

$$\mathbb{Z} = \bigcup_{r=0}^{m-1} \{mk + r : k \in \mathbb{Z}\}.$$

证明 对 (a): 考虑上下极限即可.

对 (b): 记 $A \triangleq \lim_{n \rightarrow \infty} x_{mn}$. 事实上对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得当 $k > N$ 时, 我们有

$$|x_{mk+r} - A| < \varepsilon, \forall r \in \{0, 1, 2, \dots, m-1\}. \quad (1.1)$$

我们知道对任何正整数 $n > mN + m - 1$, 存在唯一的 $r \in \{0, 1, 2, \dots, m - 1\}$ 和 $k > N$, 使得 $n = km + r$, 于是运用(1.1)我们有 $|x_n - A| < \varepsilon$, 因此我们证明了

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = A = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{mn}.$$

□

定义 1.2 (上下极限的定义)

我们定义

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n \triangleq \lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{k \geq n} a_k, \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n \triangleq \lim_{n \rightarrow \infty} \inf_{k \geq n} a_k. \quad (1.2)$$

♣

笔记 注意到由定义, $\sup_{k \geq n} a_k$ 是单调递减的, $\inf_{k \geq n} a_k$ 是单调递增的. 因此(1.2)式的极限存在或为确定符号的 ∞ .

命题 1.2 (上下极限的等价定义)

假定 $\{a_n\}$ 是个实数列, 则有

- (1): 设 A 是某个实数, 则 $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = A$ 的充分必要条件是对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $N > 0$, 使得当 $n > N$ 时, 有 $x_n < A + \varepsilon$ 且存在子列 $\{x_{n_k}\}$, 使得 $x_{n_k} > A - \varepsilon, k = 1, 2, \dots$.
- (2): $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = +\infty$ 的充分必要条件是对任何 $A > 0$, 存在 n , 使得 $a_n > A$.
- (3): 设 A 是某个实数, 则 $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = A$ 的充分必要条件是对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $N > 0$, 使得当 $n > N$ 时, 有 $x_n > A - \varepsilon$ 且存在子列 $\{x_{n_k}\}$, 使得 $x_{n_k} < A + \varepsilon, k = 1, 2, \dots$.
- (4): $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = -\infty$ 的充分必要条件是对任何 $A < 0$, 存在 n , 使得 $a_n < A$.

命题 1.3 (上下极限的性质)

我们有如下的

1. $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n + \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} b_n.$
2. $-\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (-a_n).$
3. $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) \geq \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n + \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} b_n.$
4. 若 $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = b, \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$, 则 $\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n b_n = ab$.

♦

笔记 上下极限的性质都可以通过考虑其子列的极限快速得到证明. 因此我们一般不需要额外记忆上下极限的性质, 只需要熟悉通过考虑子列极限直观地得到结论即可. 并且因为上下极限就是(最大/最小)子列极限, 所以一般极限的性质对于上下极限都成立.

证明 1.

2.

3.

4. 由于 $\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$, 因此我们可设 $\lim_{k \rightarrow +\infty} a_{n_k} = a$. 根据极限的四则运算法则, 可知 $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_{n_k} b_{n_k} = ab$. 从而 $\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n b_n \geq \lim_{n \rightarrow +\infty} a_{n_k} b_{n_k} = ab$. 又由上下极限的性质, 可知 $\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n b_n \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n \cdot \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} b_n = ab$. 故 $\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n b_n = ab$.

□

例题 1.6 求上极限

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} n \sin \left(\pi \sqrt{n^2 + 1} \right).$$

解 注意到

$$n \sin \left(\pi \sqrt{n^2 + 1} \right) = n \sin \left(\pi \sqrt{n^2 + 1} - n\pi + n\pi \right) = (-1)^n n \sin \left(\pi \sqrt{n^2 + 1} - n\pi \right) = (-1)^n n \sin \frac{\pi}{\sqrt{n^2 + 1} + n}.$$

又因为

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} n \sin \frac{\pi}{\sqrt{n^2 + 1} + n} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n\pi}{\sqrt{n^2 + 1} + n} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\pi}{\sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} + 1} = \frac{\pi}{2}.$$

所以

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} n \sin \left(\pi \sqrt{n^2 + 1} \right) = \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} (-1)^n n \sin \frac{\pi}{\sqrt{n^2 + 1} + n} = \frac{\pi}{2}.$$

□

注 本题最后一个等号其实是直接套用了一个上极限的性质得到的.

命题 1.4

对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得

$$f_1(n, \varepsilon) \leq a_n \leq f_2(n, \varepsilon), \forall n \geq N,$$

这里

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \lim_{n \rightarrow \infty} f_2(n, \varepsilon) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \lim_{n \rightarrow \infty} f_1(n, \varepsilon) = A \in \mathbb{R}.$$

证明 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = A$.

◆



笔记 以后可以直接使用这个命题. 但是要按照证法一的格式书写.

证明 证法一(利用上下极限)(也是实际做题中直接使用这个命题的书写步骤):

已知对 $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得

$$f_1(n, \varepsilon) \leq a_n \leq f_2(n, \varepsilon), \forall n \geq N,$$

上式两边令 $n \rightarrow +\infty$, 则有

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} f_1(n, \varepsilon) \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n, \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} f_2(n, \varepsilon), \forall \varepsilon > 0.$$

由 ε 的任意性, 两边令 $\varepsilon \rightarrow 0^+$, 可得

$$A = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} f_1(n, \varepsilon) \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n, \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n \leq \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} f_2(n, \varepsilon) = A.$$

又显然有 $\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n$, 于是

$$A = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} f_1(n, \varepsilon) \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n \leq \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} f_2(n, \varepsilon) = A.$$

故由夹逼准则可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = A$.

证法二($\varepsilon - \delta$ 语言):

$\forall \varepsilon > 0$, 记 $g_1(\varepsilon) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f_1(n, \varepsilon), g_2(\varepsilon) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f_2(n, \varepsilon)$. 由 $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} g_1(\varepsilon) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} g_2(\varepsilon) = A$, 可知对 $\forall \eta > 0$, 存在 $\delta > 0$, 使得

$$g_1(\delta) > A - \frac{\eta}{2}, g_2(\delta) < A + \frac{\eta}{2}.$$

由于 $g_1(\delta) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f_1(n, \delta), g_2(\delta) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f_2(n, \delta)$, 因此存在 $N' \in \mathbb{N}$, 使得

$$f_1(n, \delta) > g_1(\delta) - \frac{\eta}{2}, f_2(n, \delta) < g_2(\delta) + \frac{\eta}{2}, \forall n > N'.$$

又由条件可知, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得

$$f_1(n, \delta) \leq a_n \leq f_2(n, \delta), \forall n > N.$$

于是当 $n > \max\{N, N'\}$ 时, 对 $\forall \eta > 0$, 我们都有

$$A - \eta < g_1(\delta) - \frac{\eta}{2} < f_1(n, \delta) \leq a_n \leq f_2(n, \delta) < g_2(\delta) + \frac{\eta}{2} < A + \eta.$$

故由夹逼准则可知 $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = A$.

□

第2章 极限与渐近分析方法

2.1 基本的渐进估计与求极限方法

2.1.1 基本极限计算

2.1.1.1 基本想法

裂项、作差、作商的想法是解决极限问题的基本想法. 无穷级数求和能求出具体值的一般都只能裂项.

例题 2.1 对正整数 v , 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k(k+1)\cdots(k+v)}$.

解

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k(k+1)\cdots(k+v)} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{v} \left[\frac{1}{k(k+1)\cdots(k+v-1)} - \frac{1}{(k+1)(k+2)\cdots(k+v)} \right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{v} \left[\frac{1}{v!} - \frac{1}{n(n+1)\cdots(n+v)} \right] = \frac{1}{v!v}. \end{aligned}$$

□

例题 2.2 设 $p_0 = 0, 0 \leq p_j \leq 1, j = 1, 2, \dots$. 求 $\sum_{j=1}^{\infty} \left(p_j \prod_{i=0}^{j-1} (1-p_i) \right) + \prod_{j=1}^{\infty} (1-p_j)$ 的值.

解 记 $q_i = 1 - p_i$, 则有

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{\infty} p_j \prod_{i=0}^{j-1} (1-p_i) + \prod_{j=1}^{\infty} (1-p_j) &= \sum_{j=1}^{\infty} (1-q_j) \prod_{i=0}^{j-1} q_i + \prod_{i=0}^{\infty} q_i \\ &= \sum_{j=1}^{\infty} \left(\prod_{i=0}^{j-1} q_i - \prod_{i=0}^j q_i \right) + \prod_{i=0}^{\infty} q_i = q_0 - \prod_{i=0}^{\infty} q_i + \prod_{i=0}^{\infty} q_i = q_0. \end{aligned}$$

□

例题 2.3 设 $|x| < 1$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} (1+x)(1+x^2)\cdots(1+x^{2^n})$.

注 如果把幂次 $1, 2, 2^2, \dots$ 改成 $1, 2, 3, \dots$, 那么显然极限存在, 但是并不能求出来, 要引入别的特殊函数, 省流就是: 钓鱼题.



笔记 平方差公式即可

解

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} (1+x)(1+x^2)\cdots(1+x^{2^n}) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(1-x)(1+x)(1+x^2)\cdots(1+x^{2^n})}{1-x} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(1-x^2)(1+x^2)\cdots(1+x^{2^n})}{1-x} \\ &= \cdots = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1-x^{2^{n+1}}}{1-x} = \frac{1}{1-x}. \end{aligned}$$

□

例题 2.4 对正整数 n , 方程 $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+t} = e$ 的解记为 $t = t(n)$, 证明 $t(n)$ 关于 n 递增并求极限 ($t \rightarrow +\infty$).

解 解方程得到

$$\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+t} = e \Leftrightarrow (n+t) \ln \left(1 + \frac{1}{n}\right) = 1 \Leftrightarrow t = \frac{1}{\ln \left(1 + \frac{1}{n}\right)} - n.$$

设 $f(x) = \frac{1}{\ln \left(1 + \frac{1}{x}\right)} - x, x > 0$, 则

$$f'(x) = \frac{1}{\ln^2 \left(1 + \frac{1}{x}\right)} \frac{1}{x^2 + x} - 1 > 0 \Leftrightarrow \ln^2 \left(1 + \frac{1}{x}\right) < \frac{1}{x^2 + x} \Leftrightarrow \ln(1+t) < \frac{t}{\sqrt{1+t}}, t = \frac{1}{x} \in (0, 1).$$

最后的不等式由关于 \ln 的常用不等式可知显然成立, 于是 $f(x)$ 单调递增, 故 $t(n) = f(n)$ 也单调递增. 再来求极限

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} t(n) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\ln(1 + \frac{1}{n})} - n \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - n \ln(1 + \frac{1}{n})}{\ln(1 + \frac{1}{n})} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1 - x \ln(1 + \frac{1}{x})}{\ln(1 + \frac{1}{x})} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1 - x \ln(1 + \frac{1}{x})}{\frac{1}{x}} \\ &\xrightarrow{\text{L'Hospital}} \frac{1}{2}.\end{aligned}$$

□

命题 2.1

$$\prod_{k=1}^n \left(1 + \frac{1}{k}\right)^k = \frac{(n+1)^n}{n!} \sim \frac{e^{n+1}}{\sqrt{2\pi n}}.$$

◆

证明

$$\begin{aligned}\prod_{k=1}^n \left(1 + \frac{1}{k}\right)^k &= \prod_{k=1}^n \left(\frac{1+k}{k}\right)^k = \left(\frac{2}{1}\right) \left(\frac{3}{2}\right)^2 \left(\frac{4}{3}\right)^3 \cdots \left(\frac{n+1}{n}\right)^n \\ &= \frac{(n+1)^n}{n!} \sim \frac{(n+1)^n e^n}{\sqrt{2\pi n} n^n} = \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n e^n}{\sqrt{2\pi n}} \sim \frac{e^{n+1}}{\sqrt{2\pi n}}.\end{aligned}$$

□

例题 2.5 计算极限 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt{n} \prod_{k=1}^n \frac{e^{1-\frac{1}{k}}}{(1 + \frac{1}{k})^k}$.

解 因为

$$\sqrt{n} \prod_{k=1}^n \frac{e^{1-\frac{1}{k}}}{(1 + \frac{1}{k})^k} = \sqrt{n} \frac{e^{n-(1+\frac{1}{2}+\cdots+\frac{1}{n})}}{(\frac{2}{1})(\frac{3}{2})^2(\frac{4}{3})^3 \cdots (\frac{n+1}{n})^n} = \frac{\sqrt{n} n! e^n}{(n+1)^n e^{1+\frac{1}{2}+\cdots+\frac{1}{n}}}$$

由 Stirling 公式 $n! \sim \sqrt{2\pi n} (\frac{n}{e})^n$ ($n \rightarrow +\infty$) 及

$$1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n} = \ln n + \gamma + o(1), \quad n \rightarrow +\infty$$

得

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt{n} \prod_{k=1}^n \frac{e^{1-\frac{1}{k}}}{(1 + \frac{1}{k})^k} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sqrt{2\pi n}}{(1 + 1/n)^n e^{\ln n + \gamma}} = \sqrt{2\pi} e^{-(1+\gamma)}$$

□

命题 2.2 (数列常见的转型方式)

数列常见的转型方式:

$$(1) \quad a_n = a_1 + \sum_{k=1}^{n-1} (a_{k+1} - a_k);$$

$$(2) \quad a_n = a_1 \prod_{k=1}^{n-1} \frac{a_{k+1}}{a_k};$$

$$(3) \quad a_n = S_n - S_{n-1}, \text{ 其中 } S_n = \sum_{k=1}^n a_k.$$

从而我们可以得到

1. 数列 $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ 收敛的充要条件是 $\sum_{n=1}^{\infty} (a_{n+1} - a_n)$ 收敛.

2. 数列 $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ ($a_n \neq 0$) 收敛的充要条件是 $\prod_{n=1}^{\infty} \frac{a_{n+1}}{a_n}$ 收敛.

注 在关于数列的问题中, 将原数列的等式或不等式条件转化为相邻两项的差或商的等式或不等式条件的想法是

非常常用的.

笔记 这个命题给我们证明数列极限的存在性提供了一种想法: 我们可以将数列的收敛性转化为级数的收敛性, 或者将数列的收敛性转化为累乘的收敛性. 而累乘可以通过取对数的方式转化成级数的形式, 这样就可以利用级数的相关理论来证明数列的收敛性.

这种想法的具体操作方式:

(i) 先令数列相邻两项作差或作商, 将数列的极限写成其相邻两项的差的级数或其相邻两项的商的累乘形式.(如果是累乘的形式, 那么可以通过取对数的方式将其转化成级数的形式.)

(ii) 若能直接证明累乘或级数收敛, 就直接证明即可. 若不能, 则再利用级数的相关理论来证明上述构造的级数的收敛性, 从而得到数列的极限的存在性. 此时, 我们一般会考虑这个级数的通项, 然后去找一个通项能够控制住所求级数通项的收敛级数(几何级数等), 最后利用级数的比较判别法来证明级数收敛

证明

- 必要性 (\Rightarrow) 和充分性 (\Leftarrow) 都可由 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a_1 + \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{n-1} (a_{k+1} - a_k)$ 直接得到.
- 必要性 (\Rightarrow) 和充分性 (\Leftarrow) 都可由 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a_1 \prod_{k=1}^{n-1} \frac{a_{k+1}}{a_k}$ 直接得到.

□

例题 2.6 设 $a_n = \left(\frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} \right)^2 \frac{1}{2n+1}$, 证明: 数列 a_n 收敛到一个正数.

证明 由条件可得 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{\left(\frac{(2n+2)!!}{(2n+1)!!} \right)^2 \frac{1}{2n+3}}{\left(\frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} \right)^2 \frac{1}{2n+1}} = \frac{(2n+2)^2}{(2n+1)^2} \cdot \frac{2n+1}{2n+3} = \frac{(2n+2)^2}{(2n+1)(2n+3)} = 1 + \frac{1}{(2n+1)(2n+3)} > 1.$$

从而 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$a_n = \prod_{k=1}^{n-1} \left[1 + \frac{1}{(2k+1)(2k+3)} \right] = e^{\sum_{k=1}^{n-1} \ln \left[1 + \frac{1}{(2k+1)(2k+3)} \right]}. \quad (2.1)$$

注意到

$$\ln \left[1 + \frac{1}{(2n+1)(2n+3)} \right] \sim \frac{1}{(2n+1)(2n+3)}, n \rightarrow \infty.$$

而 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)(2n+3)}$ 收敛, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{n-1} \ln \left[1 + \frac{1}{(2k+1)(2k+3)} \right]$ 存在. 于是由 (2.1) 式可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\sum_{k=1}^{n-1} \ln \left[1 + \frac{1}{(2k+1)(2k+3)} \right]} = e^{\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{n-1} \ln \left[1 + \frac{1}{(2k+1)(2k+3)} \right]}$$

也存在.

□

2.1.1.2 带 \ln 的极限计算

通常, 带着一堆 \ln 的极限算起来都非常烦人, 并不是简单的一个泰勒就秒杀的, 比如这种题. 这种题不建议用泰勒, 很多时候等价无穷小替换、拆项和加一项减一项会方便不少.

注 另外, 做这种题一定要严格处理余项, 不要想当然.

例题 2.7 求极限 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\frac{(2x^2+3x+1) \ln x}{x \ln(1+x)} \arctan x - \pi x \right)$.

注 做这种题一定要严格处理余项, 不要想当然, 比如下面的做法就是错的(过程和答案都不对)

$$\frac{(2x^2+3x+1) \ln x}{x \ln(1+x)} \arctan x - \pi x \approx (2x+3) \frac{\ln x}{\ln(1+x)} \arctan x - \pi x \approx (2x+3) \cdot 1 \cdot \frac{\pi}{2} - \pi x = \frac{3\pi}{2}.$$

解 根据洛必达法则, 显然 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln x}{\ln(1+x)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\frac{1}{x}}{\frac{1}{1+x}} = 1$, 拆分一下有

$$\begin{aligned}
& \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\frac{(2x^2 + 3x + 1) \ln x}{x \ln(1+x)} \arctan x - \pi x \right) \\
&= \lim_{x \rightarrow +\infty} \left((2x+3) \frac{\ln x}{\ln(1+x)} \arctan x - \pi x \right) + \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln x}{x \ln(1+x)} \arctan x \\
&= \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\frac{2x \ln x}{\ln(1+x)} \arctan x - \pi x \right) + 3 \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln x}{\ln(1+x)} \arctan x \\
&= 2 \lim_{x \rightarrow +\infty} x \left(\frac{\ln x}{\ln(1+x)} \arctan x - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{3}{2} \pi \\
&= 2 \left(\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x \ln x}{\ln(1+x)} \left(\arctan x - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{\pi}{2} \lim_{x \rightarrow +\infty} x \left(\frac{\ln x}{\ln(1+x)} - 1 \right) \right) + \frac{3}{2} \pi \\
&= 2 \left(\lim_{x \rightarrow +\infty} x \left(\arctan x - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{\pi}{2} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x \ln(1+\frac{1}{x})}{\ln(1+x)} \right) + \frac{3}{2} \pi \\
&= 2 \left(\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\arctan x - \frac{\pi}{2}}{\frac{1}{x}} - \frac{\pi}{2} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{\ln(1+x)} \right) + \frac{3}{2} \pi \\
&= 2 \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\frac{-1}{1+x^2}}{-\frac{1}{x^2}} + \frac{3}{2} \pi = \frac{3}{2} \pi - 2.
\end{aligned}$$

□

2.1.1.3 幂指函数的极限问题

幂指函数的极限问题, 一律写成 e^{\ln} 形式, 并利用等价无穷小替换和加一项减一项去解决, 方便.

注 不要用泰勒做这个题, 因为你需要分别展开好几项直到余项是高阶无穷小才可以, 等价无穷小替换则只需要看 Taylor 展开的第一项并且是严谨的, 泰勒则需要展开好几项, 计算量爆炸.

例题 2.8 求极限 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^{\sin x} - (\sin x)^x}{x^3 \ln x}$.

注 不要用泰勒做这个题, 因为你需要分别展开好几项直到余项是高阶无穷小才可以, 等价无穷小替换则只需要看第一项并且是严谨的, 泰勒则至少需要展开三项, 计算量爆炸, 大致如下

$$\begin{aligned}
x^{\sin x} &= e^{\sin x \ln x} = 1 + \sin x \ln x + \frac{1}{2} \sin^2 x \ln^2 x + \frac{1}{6} \sin^3 x \ln^3 x + O(x^4 \ln^4 x) \\
(\sin x)^x &= e^{x \ln \sin x} = 1 + x \ln \sin x + \frac{1}{2} x^2 \ln^2 \sin x + \frac{1}{6} x^3 \ln^3 \sin x + O(x^4 \ln^4 \sin x)
\end{aligned}$$

然后你不仅需要看第一项, 还要检查并验证平方项, 三次方项作差后对应的极限是零, 麻烦.

笔记 先说明写成 e^{\ln} 形式后, 指数部分都是趋于零的, 然后等价无穷小替换即可.

解 注意到

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \sin x \ln x = \lim_{x \rightarrow 0^+} x \ln x = 0, \lim_{x \rightarrow 0^+} x \ln \sin x = \lim_{x \rightarrow 0^+} \sin x \ln \sin x = \lim_{x \rightarrow 0^+} x \ln x = 0.$$

从而

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} (\sin x)^x = \lim_{x \rightarrow 0^+} e^{x \ln \sin x} = 1.$$

于是我们有

$$\begin{aligned}
& \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^{\sin x} - (\sin x)^x}{x^3 \ln x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} (\sin x)^x \frac{e^{\sin x \ln x - x \ln \sin x} - 1}{x^3 \ln x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{e^{\sin x \ln x - x \ln \sin x} - 1}{x^3 \ln x} \\
&= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\sin x \ln x - x \ln \sin x}{x^3 \ln x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\sin x \ln x - x \ln x + x \ln x - x \ln \sin x}{x^3 \ln x} \\
&= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\sin x - x}{x^3} + \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln x - \ln \sin x}{x^2 \ln x} = -\frac{1}{6} - \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln \frac{\sin x}{x}}{x^2 \ln x} \left(\frac{\sin x}{x} \sim 1 - \frac{1}{6}x^2, x \rightarrow 0^+ \right) \\
&= -\frac{1}{6} - \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln(1 + \frac{\sin x - x}{x})}{x^2 \ln x} = -\frac{1}{6} - \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\sin x - x}{x^3 \ln x} = -\frac{1}{6} + \frac{1}{6} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{\ln x} = -\frac{1}{6}.
\end{aligned}$$

□

例题 2.9 求极限 $\lim_{x \rightarrow \infty} x^2 \left(e^{(1+\frac{1}{x})^x} - \left(1 + \frac{1}{x}\right)^{ex} \right)$.

解 注意到

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x = e, \lim_{x \rightarrow \infty} ex \ln \left(1 + \frac{1}{x}\right) = e.$$

从而

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^{ex} = \lim_{x \rightarrow 0^+} e^{ex \ln(1+\frac{1}{x})} = e^e.$$

于是我们有

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} x^2 \left(e^{(1+\frac{1}{x})^x} - \left(1 + \frac{1}{x}\right)^{ex} \right) &= \lim_{x \rightarrow \infty} x^2 \left(1 + \frac{1}{x}\right)^{ex} \left(e^{(1+\frac{1}{x})^x - ex \ln(1+\frac{1}{x})} - 1 \right) \\ &= e^e \lim_{x \rightarrow \infty} x^2 \left(e^{(1+\frac{1}{x})^x - ex \ln(1+\frac{1}{x})} - 1 \right) = e^e \lim_{x \rightarrow \infty} x^2 \left(\left(1 + \frac{1}{x}\right)^x - ex \ln \left(1 + \frac{1}{x}\right) \right) \\ &= e^e \lim_{x \rightarrow \infty} x^2 \left(e^{x \ln(1+\frac{1}{x})} - ex \ln \left(1 + \frac{1}{x}\right) \right) = e^{e+1} \lim_{x \rightarrow \infty} x^2 \left(e^{x \ln(1+\frac{1}{x}) - 1} - x \ln \left(1 + \frac{1}{x}\right) \right) \\ &\xrightarrow{\text{Taylor 展开}} e^{e+1} \lim_{x \rightarrow \infty} x^2 \frac{1}{2} \left(x \ln \left(1 + \frac{1}{x}\right) - 1 \right)^2 = \frac{e^{e+1}}{2} \lim_{x \rightarrow \infty} \left(x^2 \ln \left(1 + \frac{1}{x}\right) - x \right)^2 = \frac{e^{e+1}}{8} \end{aligned}$$

□

2.1.1.4 拟合法求极限

例题 2.10 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln^3 n}{\sqrt{n}} \sum_{k=2}^{n-2} \frac{1}{\ln k \ln(n-k) \ln(n+k) \sqrt{n+k}}$.

笔记 核心想法是拟合法, 但是最后的极限估计用到了分段估计的想法.

证明 注意到 $\frac{\ln n}{\ln(n+2)} \rightarrow 1$, 所以

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln^3 n}{\sqrt{n}} \sum_{k=2}^{n-2} \frac{1}{\ln k \ln(n-k) \ln(n+k) \sqrt{n+k}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln^2 n}{\sqrt{n}} \sum_{k=2}^{n-2} \frac{1}{\ln k \ln(n-k) \sqrt{n+k}}$$

显然

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=2}^{n-2} \frac{1}{\sqrt{n+k}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=2}^{n-2} \frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n}}} = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{1+x}} dx = 2\sqrt{2} - 2$$

我们用上面的东西来拟合, 所以尝试证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=2}^{n-2} \frac{1}{\sqrt{n+k}} \left(\frac{\ln^2 n}{\ln k \ln(n-k)} - 1 \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=2}^{n-2} \frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n}}} \left(\frac{\ln^2 n}{\ln k \ln(n-k)} - 1 \right) = 0$$

注意求和里面的每一项都是正的, 并且 $\frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n}}} \in \left[\frac{1}{\sqrt{2}}, 1\right]$, 所以只需证

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=2}^{n-2} \left(\frac{\ln^2 n}{\ln k \ln(n-k)} - 1 \right) = 0$$

注意对称性, 证明 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=2}^{\frac{n}{2}} \left(\frac{\ln^2 n}{\ln k \ln(n-k)} - 1 \right) = 0$ 即可, 待定一个 m 来分段放缩. 首先容易看出数列 $\ln k \ln(n-k)$ 在 $2 \leq k \leq \frac{n}{2}$ 时是单调递增的, 这是因为

$$\begin{aligned} f(x) &= \ln x \ln(n-x), f'(x) = \frac{\ln(n-x)}{x} - \frac{\ln x}{n-x} > 0 \\ &\Leftrightarrow (n-x) \ln(n-x) > x \ln x, \forall x \in \left(2, \frac{n}{2}\right) \end{aligned}$$

显然成立, 所以待定 $m \in [2, \frac{n}{2}]$, 于是

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{k=2}^m \left(\frac{\ln^2 n}{\ln k \ln(n-k)} - 1 \right) &\leq \frac{1}{n} \sum_{k=2}^m \left(\frac{\ln^2 n}{\ln 2 \ln(n-2)} - 1 \right) = \frac{m}{n} \left(\frac{\ln^2 n}{\ln 2 \ln(n-2)} - 1 \right) \\ \frac{1}{n} \sum_{k=m}^{\frac{n}{2}} \left(\frac{\ln^2 n}{\ln k \ln(n-k)} - 1 \right) &\leq \frac{1}{n} \sum_{k=m}^{\frac{n}{2}} \left(\frac{\ln^2 n}{\ln m \ln(n-m)} - 1 \right) \leq \frac{\ln^2 n}{\ln m \ln(n-m)} - 1 \end{aligned}$$

为了让第一个趋于零, 可以取 $m = \frac{n}{2 \ln^2 n}$, 然后代入检查第二个极限

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln^2 n}{\ln m \ln(n-m)} - 1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln^2 n}{\ln \frac{n}{2 \ln^2 n} \ln \left(n - \frac{n}{2 \ln^2 n} \right)} - 1 = 0$$

所以结论得证(过程中严格来讲应补上取整符号, 这里方便起见省略了).

□

2.1.2 Taylor 公式

定理 2.1 (带 Peano 余项的 Taylor 公式)

设 f 在 $x = a$ 是 n 阶右可微的, 则

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(a)}{k!} (x-a)^k + o((x-a)^n), x \rightarrow a^+. \quad (2.2)$$

$$f(x) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{f^{(k)}(a)}{k!} (x-a)^k + O((x-a)^n), x \rightarrow a^+. \quad (2.3)$$

♡

笔记 用 Taylor 公式计算极限, 如果展开 n 项还是不方便计算, 那么就多展开一项或几项即可.

证明 (1) 要证明(2.2)式等价于证明

$$\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x) - \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(a)}{k!} (x-a)^k}{(x-a)^n} = 0.$$

对上式左边反复使用 $n-1$ 次 L'Hospital's rules, 可得

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x) - \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(a)}{k!} (x-a)^k}{(x-a)^n} &\stackrel{\text{L'Hospital}}{=} \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f'(x) - \sum_{k=1}^n \frac{f^{(k)}(a)}{(k-1)!} (x-a)^{k-1}}{n(x-a)^{n-1}} \\ &\stackrel{\text{L'Hospital}}{=} \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f''(x) - \sum_{k=2}^n \frac{f^{(k)}(a)}{(k-2)!} (x-a)^{k-2}}{n(n-1)(x-a)^{n-2}} \\ &\stackrel{\text{L'Hospital}}{=} \dots \stackrel{\text{L'Hospital}}{=} \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f^{(n-1)}(x) - f^{(n-1)}(a) - f^{(n)}(a)(x-a)}{n!(x-a)} \\ &= \frac{1}{n!} \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f^{(n-1)}(x) - f^{(n-1)}(a)}{x-a} - \frac{f^{(n)}(a)}{n!} \stackrel{\text{n阶导数定义}}{=} 0 \end{aligned}$$

故(2.2)式成立.

(2) 要证明(2.3)式等价于证明: 存在 $C > 0$ 和 $\delta > 0$, 使得

$$\left| \frac{f(x) - \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(a)}{k!} (x-a)^k}{(x-a)^n} \right| \leq C, \forall x \in [a, a+\delta].$$

□

2.1.2.1 直接利用 Taylor 公式计算极限

例题 2.11 设 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{f(n)}{n} = 1$, 计算

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{f(n)}\right)^n.$$

笔记 由 $\frac{f(n)}{n} = 1 + o(1), n \rightarrow +\infty$, 可得 $f(n) = n + o(n), n \rightarrow +\infty$. 这个等式的意思是: $f(n) = n + o(n)$ 对 $\forall n \in \mathbb{N}$ 都成立. 并且当 $n \rightarrow +\infty$ 时, 有 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{f(n)}{n} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n + o(n)}{n} = 1 + \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{o(n)}{n} = 1$. 其中 $o(n)$ 表示一个 (类) 数列, 只不过这个 (类) 数列具有 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{o(n)}{n} = 0$ 的性质.

解 解法一 (一般解法):

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{f(n)}\right)^n = \lim_{n \rightarrow +\infty} e^{n \ln \left(1 + \frac{1}{f(n)}\right)} = e^{\lim_{n \rightarrow +\infty} n \ln \left(1 + \frac{1}{f(n)}\right)} = e^{\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n}{f(n)}} = e.$$

解法二 (渐进估计):

$$\text{由 } \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{f(n)}{n} = 1, \text{ 可知}$$

$$\frac{f(n)}{n} = 1 + o(1), n \rightarrow +\infty.$$

从而

$$\left(1 + \frac{1}{f(n)}\right)^n = \left[1 + \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{1 + o(1)}\right]^n = \left[1 + \frac{1}{n}(1 + o(1))\right]^n = \left[1 + \frac{1}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right)\right]^n = e^{n \ln [1 + \frac{1}{n} + o(\frac{1}{n})]}, n \rightarrow +\infty.$$

于是

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{f(n)}\right)^n = \lim_{n \rightarrow +\infty} e^{n \ln [1 + \frac{1}{n} + o(\frac{1}{n})]} = \lim_{n \rightarrow +\infty} e^{n [\frac{1}{n} + o(\frac{1}{n})]} = \lim_{n \rightarrow +\infty} e^{1 + o(1)} = e.$$

□

例题 2.12 计算:

1. $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos \sin x - \cos x}{x^4}$.
2. $\lim_{x \rightarrow +\infty} \left[\left(x^3 - x^2 + \frac{x}{2} \right) e^{\frac{1}{x}} - \sqrt{1 + x^6} \right]$.

解

- 1.
- 2.

□

例题 2.13 求极限 $\lim_{n \rightarrow +\infty} (\sqrt[n]{n} - 1)^{\frac{1}{(\ln n)^\alpha}} (\alpha > 0)$.

笔记 利用 Taylor 公式即可得到结果. 类似 $\ln(xe^{-x} - 1) \sim \ln(xe^{-x} + o(xe^{-x})) \sim \ln(xe^{-x})$ 的等价关系可以直接凭直觉写出, 要严谨证明的话, 只需要利用 L'Hospital 法则即可.

解 由

$$(\sqrt[n]{n} - 1)^{\frac{1}{(\ln n)^\alpha}} = e^{\frac{\ln(\sqrt[n]{n} - 1)}{(\ln n)^\alpha}}$$

从而

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\ln(\sqrt[n]{n} - 1)}{(\ln n)^\alpha} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln(e^{xe^{-x}} - 1)}{x^\alpha} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln(xe^{-x})}{x^\alpha} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln x - x}{x^\alpha} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\frac{\ln x}{x^\alpha} - \frac{1}{x^{\alpha-1}} \right) = - \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x^{\alpha-1}} \\ &= \begin{cases} 0, & \alpha > 1, \\ -1, & \alpha = 1, \\ -\infty, & 0 < \alpha < 1. \end{cases} \end{aligned}$$

于是

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} (\sqrt[n]{n} - 1)^{\frac{1}{(\ln n)^\alpha}} = \begin{cases} 1, & \alpha > 1, \\ e^{-1}, & \alpha = 1, \\ 0, & 0 < \alpha < 1. \end{cases}$$

□

例题 2.14 计算 $(1 + \frac{1}{x})^x, x \rightarrow +\infty$ 的渐进估计.

解 由带 Peano 余项的 Taylor 公式, 可得

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x &= e^{x \ln(1 + \frac{1}{x})} = e^{x \left[\frac{1}{x} - \frac{1}{2x^2} + \frac{1}{3x^3} + o\left(\frac{1}{x^3}\right)\right]} = e^{1 - \frac{1}{2x} + \frac{1}{3x^2} + o\left(\frac{1}{x^2}\right)} = e \cdot e^{-\frac{1}{2x} + \frac{1}{3x^2} + o\left(\frac{1}{x^2}\right)} \\ &= e \left[1 - \frac{1}{2x} + \frac{1}{3x^2} + o\left(\frac{1}{x^2}\right) + \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2x} + \frac{1}{3x^2} + o\left(\frac{1}{x^2}\right)\right)^2 + o\left(-\frac{1}{2x} + \frac{1}{3x^2} + o\left(\frac{1}{x^2}\right)\right)^2\right] \\ &= e \left[1 - \frac{1}{2x} + \frac{1}{3x^2} + \frac{1}{8x^2} + o\left(\frac{1}{x^2}\right)\right] \\ &= e - \frac{e}{2x} + \frac{11e}{24x^2} + o\left(\frac{1}{x^2}\right) \end{aligned}$$

故

$$\left(1 + \frac{1}{x}\right)^x = e - \frac{e}{2x} + \frac{11e}{24x^2} + o\left(\frac{1}{x^2}\right), x \rightarrow +\infty.$$

于是

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} x \left[e - \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x \right] = \frac{e}{2}, \lim_{x \rightarrow +\infty} x \left[x \left(e - \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x \right) - \frac{e}{2} \right] = -\frac{11e}{24}. \quad (2.4)$$

□

注 反复利用上述(2.4)式构造极限的方法, 再求出相应极限, 就能得到 e 的更精确的渐进估计. 这也是计算渐进估计的一般方法.

例题 2.15 计算

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x \cos(2x) \cdots \cos(nx)}{x^2}.$$

解 记 $I = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x \cos(2x) \cdots \cos(nx)}{x^2}$, 则由带 Peano 余项的 Taylor 公式, 可得

$$\begin{aligned} \cos x \cos(2x) \cdots \cos(nx) &= \left[1 - \frac{1}{2}x^2 + o(x^2)\right] \left[1 - \frac{(2x)^2}{2} + o(x^2)\right] \cdots \left[1 - \frac{(nx)^2}{2} + o(x^2)\right] \\ &= 1 - \frac{1^2 + 2^2 + \cdots + n^2}{2}x^2 + o(x^2) = 1 - \frac{n(n+1)(2n+1)}{2 \cdot 6}x^2 + o(x^2), x \rightarrow 0. \end{aligned}$$

故 $I = \frac{n(n+1)(2n+1)}{12}$.

□

例题 2.16 计算

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \overbrace{\sin \sin \cdots \sin x}^{n \text{ 次复合}}}{x^3}.$$

解 先证明 $\underbrace{\sin(\sin(\sin(\cdots(\sin x)) \cdots))}_{n \text{ 次复合}} = x - \frac{n}{6}x^3 + o(x^3), x \rightarrow 0$.

当 $k = 1$ 时, 由 Taylor 公式结论显然成立. 假设 $k = n$ 时, 结论成立. 则当 $k = n + 1$ 时, 我们有

$$\begin{aligned} \underbrace{\sin(\sin(\sin(\cdots(\sin x)) \cdots))}_{n \text{ 次复合}} &= \sin \left(x - \frac{n}{6}x^3 + o(x^3) \right) \\ &= x - \frac{n}{6}x^3 + o(x^3) - \frac{1}{6} \left(x - \frac{n}{6}x^3 + o(x^3) \right)^3 + o \left(\left(x - \frac{n}{6}x^3 + o(x^3) \right)^3 \right) \end{aligned}$$

$$= x - \frac{n+1}{6}x^3 + o(x^3), x \rightarrow 0.$$

由数学归纳法得 $\underbrace{\sin(\sin(\sin(\cdots(\sin x)\cdots)))}_{n\text{次复合}} = x - \frac{n}{6}x^3 + o(x^3), x \rightarrow 0$. 故 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \overbrace{\sin \sin \cdots \sin x}^{n\text{次复合}}}{x^3} = \frac{n}{6}$.

□

例题 2.17 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \sin(2\pi en!).$$

解 由带 Lagrange 余项的 Taylor 展开式可知

$$e^x = \sum_{k=0}^{n+1} \frac{x^k}{k!} + \frac{e^\theta x^{n+2}}{(n+2)!}, \theta \in (0, x).$$

从而

$$e = \sum_{k=0}^{n+1} \frac{1}{k!} + \frac{e^\theta}{(n+2)!}, \theta \in (0, 1).$$

于是

$$2\pi en! = 2\pi n! \sum_{k=0}^{n+1} \frac{1}{k!} + \frac{2\pi n! e^\theta}{(n+2)!}, \theta \in (0, 1).$$

而 $n! \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \in \mathbb{N}$, 因此

$$\begin{aligned} n \sin(2\pi en!) &= n \sin \left(2\pi n! \sum_{k=0}^{n+1} \frac{1}{k!} + \frac{2\pi n! e^\theta}{(n+2)!} \right) = n \sin \left(\frac{2\pi n!}{(n+1)!} + \frac{2\pi n! e^\theta}{(n+2)!} \right) \\ &= n \sin \left(\frac{2\pi}{n+1} + \frac{2\pi e^\theta}{(n+1)(n+2)} \right) \sim n \left[\frac{2\pi}{n+1} + \frac{2\pi e^\theta}{(n+1)(n+2)} \right] \rightarrow 2\pi, n \rightarrow +\infty. \end{aligned}$$

□

2.1.3 利用 Lagrange 中值定理求极限

Lagrange 中值定理不会改变原数列或函数的阶, 但是可以更加精细地估计原数列或函数的阶. 以后利用 Lagrange 中值定理处理数列或函数的阶的过程都会直接省略.

例题 2.18 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [\sin(\sqrt{n+1}) - \sin(\sqrt{n})].$$

解 由 Lagrange 中值定理, 可知对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 存在 $\theta_n \in (\sqrt{n+1}, \sqrt{n})$, 使得

$$\sin(\sqrt{n+1}) - \sin(\sqrt{n}) = (\sqrt{n+1} - \sqrt{n}) \cos \theta_n = \frac{1}{\sqrt{n+1} + \sqrt{n}} \cdot \cos \theta_n.$$

从而当 $n \rightarrow +\infty$ 时, 有 $\theta_n \rightarrow +\infty$. 于是

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [\sin(\sqrt{n+1}) - \sin(\sqrt{n})] = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{\sqrt{n+1} + \sqrt{n}} \cdot \cos \theta_n \right] = 0.$$

□

例题 2.19 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left(\arctan \frac{2024}{n} - \arctan \frac{2024}{n+1} \right).$$

证明 由 Lagrange 中值定理, 可知对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 存在 $\theta_n \in (\frac{2024}{n}, \frac{2024}{n+1})$, 使得

$$\arctan \frac{2024}{n} - \arctan \frac{2024}{n+1} = \frac{1}{1 + \theta_n^2} \cdot \left(\frac{2024}{n} - \frac{2024}{n+1} \right).$$

并且 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \theta_n = 0$. 故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left(\arctan \frac{2024}{n} - \arctan \frac{2024}{n+1} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2}{1 + \theta_n^2} \cdot \left(\frac{2024}{n} - \frac{2024}{n+1} \right) = 2024 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2}{n(n+1)} = 2024.$$

□

例题 2.20

1. 对 $\alpha \neq 0$, 求 $(n+1)^\alpha - n^\alpha, n \rightarrow \infty$ 的等价量;
2. 求 $n \ln n - (n-1) \ln(n-1), n \rightarrow \infty$ 的等价量.

笔记 熟练这种利用 Lagrange 中值定理求极限的方法以后, 这类数列或函数的等价量我们应该做到能够快速口算出来. 因此, 以后利用 Lagrange 中值定理计算数列或函数的等价量的具体过程我们不再书写, 而是直接写出相应的等价量.

注 不难发现利用 Lagrange 中值定理计算数列或函数的等价量, 并不改变原数列或函数的阶.

解 1. 根据 Lagrange 中值定理, 可知对 $n \in \mathbb{N}$, 都有

$$(n+1)^\alpha - n^\alpha = \alpha \cdot \theta_n^{\alpha-1}, \theta_n \in (n, n+1).$$

不妨设 $\alpha > 1$, 则有 $\alpha n^{\alpha-1} \leq \alpha \theta_n^{\alpha-1} \leq \alpha(n+1)^{\alpha-1}$ (若 $\alpha \leq 1$, 则有 $\alpha(n+1)^{\alpha-1} \leq \alpha \theta_n^{\alpha-1} \leq \alpha n^{\alpha-1}$). 故

$$\alpha = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\alpha n^{\alpha-1}}{n^{\alpha-1}} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\alpha \theta_n^{\alpha-1}}{n^{\alpha-1}} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\alpha(n+1)^{\alpha-1}}{n^{\alpha-1}} = \alpha.$$

因此 $(n+1)^\alpha - n^\alpha \sim \alpha n^{\alpha-1}, n \rightarrow \infty$.

2. 由 Lagrange 中值定理, 可知对 $n \in \mathbb{N}$, 都有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \ln n - (n-1) \ln(n-1)}{\ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n - (n-1)) \cdot (1 + \ln \theta_n)}{\ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln n} + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \theta_n}{\ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \theta_n}{\ln n}, n-1 < \theta_n < n.$$

又 $\frac{\ln(n-1)}{\ln n} < \frac{\ln \theta_n}{\ln n} < \frac{\ln n}{\ln n} = 1$, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \theta_n}{\ln n} = 1$, 从而

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \ln n - (n-1) \ln(n-1)}{\ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \theta_n}{\ln n} = 1.$$

于是 $n \ln n - (n-1) \ln(n-1) \sim \ln n, n \rightarrow +\infty$.

□

例题 2.21 计算

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos(\sin x) - \cos x}{(1 - \cos x) \sin^2 x}.$$

证明 由 Lagrange 中值定理, 可知对 $\forall x \in U(0)$, 都有

$$\cos(\sin x) - \cos x = (x - \sin x) \sin \theta, \theta \in (\sin x, x).$$

从而

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos(\sin x) - \cos x}{(1 - \cos x) \sin^2 x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(x - \sin x) \sin \theta}{\frac{1}{2} x^2 \cdot x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{6} x^3 \cdot \sin \theta}{\frac{1}{2} x^4} = \frac{1}{3} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin \theta}{x}.$$

又由 $\sin x < \theta < x, \forall x \in U(0)$ 可知

$$1 = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin(\sin x)}{x} < \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin \theta}{x} \leq \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\theta}{x} < \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x}{x} = 1.$$

故 $\sin \theta \sim \theta \sim x, x \rightarrow 0$. 因此 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos(\sin x) - \cos x}{(1 - \cos x) \sin^2 x} = \frac{1}{3} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin \theta}{x} = \frac{1}{3} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x}{x} = \frac{1}{3}$.

□

2.1.4 L'Hospital'rules

定理 2.2 (上下极限 L'Hospital 法则)

1. 设 f, g 在 (a, b) 内可微, 满足 (i) $\forall x \in (a, b), g'(x) \neq 0$. (ii) $\lim_{x \rightarrow a^+} g(x) = +\infty$. 则

$$\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f'(x)}{g'(x)} \leq \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow a^+} \frac{f'(x)}{g'(x)} \quad (2.5)$$

且

$$\lim_{x \rightarrow a^+} \left| \frac{f'(x)}{g'(x)} \right| \leq \lim_{x \rightarrow a^+} \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow a^+} \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow a^+} \left| \frac{f'(x)}{g'(x)} \right|. \quad (2.6)$$

2. 设 f, g 在 (a, b) 内可微, 满足 (i) $\forall x \in (a, b), g'(x) \neq 0$. (ii) $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow a^+} g(x) = 0$. 则

$$\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f'(x)}{g'(x)} \leq \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow a^+} \frac{f'(x)}{g'(x)} \quad (2.7)$$

且

$$\lim_{x \rightarrow a^+} \left| \frac{f'(x)}{g'(x)} \right| \leq \lim_{x \rightarrow a^+} \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow a^+} \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow a^+} \left| \frac{f'(x)}{g'(x)} \right|. \quad (2.8)$$

 **笔记** 此定理第一部分(2.5)和(2.7)可以直接使用且以后可以不必再担心分子分母同时求导之后极限不存在而不能使用洛必达法则的情况. 但(2.6)和(2.8)一般是不能直接用的, 需要给证明.

证明 以第一问为例, 事实上, 固定 x , 由 Cauchy 中值定理, 我们有

$$\frac{f(y) - f(x)}{g(y) - g(x)} = \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)}, \quad x < \xi < y.$$

我们断言对任意 $y_n \rightarrow A \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$, 必有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f(y_n)}{g(y_n)} \right| = A \Leftrightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f(y_n) - f(x)}{g(y_n) - g(x)} \right| = A. \quad (2.9)$$

若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f(y_n)}{g(y_n)} \right| = A$. 首先利用极限的四则运算, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f(y_n) - f(x)}{g(y_n) - g(x)} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{\frac{f(y_n)}{g(y_n)} - \frac{f(x)}{g(y_n)}}{1 - \frac{g(x)}{g(y_n)}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{1}{1 - \frac{g(x)}{g(y_n)}} \right| \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f(y_n)}{g(y_n)} - \frac{f(x)}{g(y_n)} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f(y_n)}{g(y_n)} - \frac{f(x)}{g(y_n)} \right|.$$

利用

$$\left| \frac{f(y_n)}{g(y_n)} \right| - \left| \frac{f(x)}{g(y_n)} \right| \leq \left| \frac{f(y_n)}{g(y_n)} - \frac{f(x)}{g(y_n)} \right| \leq \left| \frac{f(y_n)}{g(y_n)} \right| + \left| \frac{f(x)}{g(y_n)} \right|, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} g(y_n) = \infty,$$

我们知道

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f(y_n) - f(x)}{g(y_n) - g(x)} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f(y_n)}{g(y_n)} - \frac{f(x)}{g(y_n)} \right| = A.$$

反之设 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f(y_n) - f(x)}{g(y_n) - g(x)} \right| = A$, 同样的由四则运算, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f(y_n)}{g(y_n)} - \frac{f(x)}{g(y_n)} \right| = A.$$

于是由

$$\left| \frac{f(y_n)}{g(y_n)} - \frac{f(x)}{g(y_n)} \right| - \left| \frac{f(x)}{g(y_n)} \right| \leq \left| \frac{f(y_n)}{g(y_n)} \right| \leq \left| \frac{f(y_n)}{g(y_n)} - \frac{f(x)}{g(y_n)} \right| + \left| \frac{f(x)}{g(y_n)} \right|, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} |g(y_n)| = \infty,$$

我们知道

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{f(y_n)}{g(y_n)} \right| = A.$$

现在就证明了(2.9).

于是结合 $x \rightarrow +\infty$, 我们容易得到

$$\begin{aligned}\varlimsup_{y \rightarrow +\infty} \left| \frac{f(y)}{g(y)} \right| &= \varlimsup_{y \rightarrow +\infty} \left| \frac{f(y) - f(x)}{g(y) - g(x)} \right| = \varlimsup_{y \rightarrow +\infty} \left| \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)} \right| \leq \varlimsup_{y \rightarrow +\infty} \left| \frac{f''(y)}{g''(y)} \right| \\ \varliminf_{y \rightarrow +\infty} \left| \frac{f(y)}{g(y)} \right| &= \varliminf_{y \rightarrow +\infty} \left| \frac{f(y) - f(x)}{g(y) - g(x)} \right| = \varliminf_{y \rightarrow +\infty} \left| \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)} \right| \geq \varliminf_{y \rightarrow +\infty} \left| \frac{f''(y)}{g''(y)} \right|\end{aligned}$$

这就完成了证明. □

例题 2.22 若 $f \in D^1[0, +\infty)$.

(1) 设

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) + f'(x)] = s \in \mathbb{R},$$

证明 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = s$.

(2) 设

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \left[f'(x) + \frac{2x}{\sqrt[3]{1+x^3}} f(x) \right] = s \in \mathbb{R},$$

证明 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \frac{s}{2}$.

笔记 (2) 中的构造思路: 根据条件构造相应的微分方程, 然后求解这个微分方程, 再常数变易得到我们需要构造的函数. 具体步骤如下:

构造微分方程: $y' + \frac{2x}{\sqrt[3]{1+x^3}} y = 0$, 整理可得 $\frac{y'}{y} = -\frac{2x}{\sqrt[3]{1+x^3}}$, 再对其两边同时积分得到 $\ln y = -\int_0^x \frac{2x}{\sqrt[3]{1+x^3}} dx + C_0$. 从而 $y = C e^{-\int_0^x \frac{2x}{\sqrt[3]{1+x^3}} dx}$, 于是 $C = y e^{\int_0^x \frac{2x}{\sqrt[3]{1+x^3}} dx}$. 故我们要构造的函数就是 $C(x) = f(x) e^{\int_0^x \frac{2x}{\sqrt[3]{1+x^3}} dx}$. 并且此时 $C(x)$ 满足 $C'(x) = f'(x) + \frac{2x}{\sqrt[3]{1+x^3}} f(x)$.

证明

$$(1) \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^x f(x)}{e^x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^x [f(x) + f'(x)]}{e^x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} [f + f'] = s.$$

$$(2) \text{ 由 } \frac{2t}{\sqrt[3]{1+t^3}} \geq \frac{2t}{\sqrt[3]{2t^3}} = 2^{\frac{2}{3}}, \forall t > 1 \text{ 可知 } \lim_{x \rightarrow +\infty} e^{\int_0^x \frac{2t}{\sqrt[3]{1+t^3}} dt} = +\infty, \text{ 从而由 L'Hospital's rules 可得}$$

$$\begin{aligned}\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x) \cdot e^{\int_0^x \frac{2t}{\sqrt[3]{1+t^3}} dt}}{e^{\int_0^x \frac{2t}{\sqrt[3]{1+t^3}} dt}} \xrightarrow{\text{L'Hospital's rules}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\left[f'(x) + \frac{2x}{\sqrt[3]{1+x^3}} f(x) \right] e^{\int_0^x \frac{2t}{\sqrt[3]{1+t^3}} dt}}{\frac{2x}{\sqrt[3]{1+x^3}} e^{\int_0^x \frac{2t}{\sqrt[3]{1+t^3}} dt}} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\sqrt[3]{1+x^3}}{2x} \left[f(x) + \frac{2x}{\sqrt[3]{1+x^3}} f'(x) \right] = \frac{s}{2}.\end{aligned}$$

□

例题 2.23 设可微函数 $a, b, f, g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 满足

$$f(x) \geq 0, g(x) > 0, g'(x) > 0, \frac{f'(x)}{g'(x)} + a(x) \frac{f(x)}{g(x)} = b(x), \quad \forall x \in \mathbb{R},$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} a(x) = A > 0, \lim_{x \rightarrow +\infty} b(x) = B > 0, \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = +\infty.$$

证明:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{B}{A+1}.$$

注 如果直接使用 L'Hospital 法则, 再结合条件会得到

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f'(x)}{g'(x)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left[b(x) - a(x) \frac{f(x)}{g(x)} \right].$$

但是注意这里并不能直接使用极限运算的四则运算法则得到结果, 这是因为 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)}$ 不一定存在.

证明 令 $p(x) = e^{\int_0^x a(x) \frac{g'(x)}{g(x)} dx}$, 则

$$\frac{p'(x)}{p(x)} = \frac{a(x) \frac{g'(x)}{g(x)} e^{\int_0^x a(x) \frac{g'(x)}{g(x)} dx}}{e^{\int_0^x a(x) \frac{g'(x)}{g(x)} dx}} = a(x) \frac{g'(x)}{g(x)}. \quad (2.10)$$

于是由条件可得

$$f'(x) + a(x) \frac{g'(x)}{g(x)} f(x) = b(x)g'(x) \iff f'(x) + \frac{p'(x)}{p(x)} f(x) = b(x)g'(x), \quad \forall x \in \mathbb{R}. \quad (2.11)$$

又由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} a(x) = A > 0$ 可知, 存在 $M > 0$, 使得

$$a(x) \geq \frac{A}{2}, \quad \forall x > M.$$

从而对 $\forall x > M$, 我们有

$$\begin{aligned} p(x) &= e^{\int_0^x a(x) \frac{g'(x)}{g(x)} dx} \geq e^{\int_M^x a(x) \frac{g'(x)}{g(x)} dx} \\ &\geq e^{\frac{A}{2} \int_M^x \frac{g'(x)}{g(x)} dx} = e^{\frac{A}{2} \ln \frac{g(x)}{g(M)}} = \left[\frac{g(x)}{g(M)} \right]^{\frac{A}{2}}. \end{aligned}$$

令 $x \rightarrow +\infty$, 则由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = +\infty$ 可知 $\lim_{x \rightarrow +\infty} p(x) = +\infty$. 因此, 利用 L'Hospital 法则, 再结合 (2.10) 和 (2.11) 式, 可得

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)p(x)}{g(x)p(x)} \xrightarrow{\text{L'Hospital}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f'(x)p(x) + f(x)p'(x)}{g'(x)p(x) + g(x)p'(x)} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f'(x) + \frac{p'(x)}{p(x)} f(x)}{g'(x) + \frac{p'(x)}{p(x)} g(x)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{b(x)g'(x)}{g'(x) + a(x) \frac{g'(x)}{g(x)} g(x)} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{b(x)}{1 + a(x)} = \frac{B}{A + 1}. \end{aligned}$$

□

命题 2.3 (L'Hospital 法则 (复变函数版本))

设 $f(x) = u(x) + iv(x), g(x)$ 为实值函数, 且 $\lim_{x \rightarrow a^+} g(x) = +\infty$, 若 $\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f'(x)}{g'(x)} = z_0$, 则 $\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} = z_0$.

证明 由实数 L'Hospital 法则可得

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow a^+} \left(\frac{u'(x)}{g'(x)} + i \frac{v'(x)}{g'(x)} \right) &= z_0 \Rightarrow \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{u(x)}{g(x)} = \operatorname{Re} z_0, \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{v(x)}{g(x)} = \operatorname{Im} z_0 \\ &\Rightarrow \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{u(x) + iv(x)}{g(x)} = z_0. \end{aligned}$$

□

例题 2.24 设 $f(x)$ 在 \mathbb{R} 上二阶可微且 $a, b \in \mathbb{R}$, 满足 $a > 0, a^2 - 4b < 0$ 或者 $a > 0, b > 0, a^2 - 4b > 0$ 且有 $\lim_{x \rightarrow +\infty} (f''(x) + af'(x) + bf(x)) = \ell \in \mathbb{R}$, 证明: $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \frac{\ell}{b}, \lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} f''(x) = 0$.



笔记 对于二阶微分方程而言, 一般考虑降阶. 本题利用 L'Hospital 法则实现降阶.

证明 不妨设 $\ell = 0$, 否则用 $f(x) - \frac{\ell}{b}$ 代替 $f(x)$ 即可.

①当 $a > 0, b > 0, a^2 - 4b > 0$ 时, 考虑二次方程 $x^2 + ax + b = 0$, 则此时该方程必有两负根. 设这两个负根分别为 $\lambda_1, \lambda_2 < 0$, 则 $x^2 + ax + b = x^2 + (\lambda_1 + \lambda_2)x + \lambda_1\lambda_2$. 注意到

$$[e^{-\lambda_2 x} (f'(x) - \lambda_1 f(x))]' = e^{\lambda_2 x} [f''(x) + (\lambda_1 + \lambda_2)f'(x) + \lambda_1\lambda_2 f(x)] = e^{\lambda_2 x} [f''(x) + af'(x) + bf(x)],$$

因此由条件可得

$$\frac{[e^{-\lambda_2 x} (f'(x) - \lambda_1 f(x))]'}{(e^{-\lambda_2 x})'} = \frac{f''(x) + af'(x) + bf(x)}{-\lambda_2} \rightarrow 0, \quad x \rightarrow +\infty.$$

从而利用 L' Hospital 法则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} [f'(x) - \lambda_1 f(x)] = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^{-\lambda_2 x} (f'(x) - \lambda_1 f(x))}{e^{-\lambda_2 x}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{[e^{-\lambda_2 x} (f'(x) - \lambda_1 f(x))]'}{(e^{-\lambda_2 x})'} = 0.$$

又注意到

$$[e^{-\lambda_1 x} f(x)]' = e^{-\lambda_1 x} [f'(x) - \lambda_1 f(x)],$$

因此

$$\frac{[e^{-\lambda_1 x} f(x)]'}{(e^{-\lambda_1 x})'} = \frac{f'(x) - \lambda_1 f(x)}{-\lambda_1} \rightarrow 0, \quad x \rightarrow +\infty.$$

于是再利用 L' Hospital 法则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^{-\lambda_1 x} f(x)}{e^{-\lambda_1 x}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{[e^{-\lambda_1 x} f(x)]'}{(e^{-\lambda_1 x})'} = 0.$$

故由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} [f'(x) - \lambda_1 f(x)] = 0$ 和极限的四则运算法则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} [f'(x) - \lambda_1 f(x)] + \lambda_1 \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0.$$

进而再由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} [f''(x) + af'(x) + bf(x)] = 0$ 可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f''(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} [f''(x) + af'(x) + bf(x)] - a \lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) - b \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0.$$

②当 $a > 0, a^2 - 4b < 0$ 时, 考虑二次方程 $x^2 + ax + b = 0$, 则此时该方程必有两复根, 并且 $\lambda_1 + \lambda_2 = a < 0$.

于是设这两个复根分别为 $\lambda_1 = -u + vi, \lambda_2 = -u - vi$ ($u > 0, v \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$), 则 $x^2 + ax + b = x^2 + (\lambda_1 + \lambda_2)x + \lambda_1 \lambda_2$.

从而由 L' Hospital 法则可得

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} e^{ivx} [f'(x) - \lambda_1 f(x)] &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^{(u+iv)x} [f'(x) - \lambda_1 f(x)]}{e^{ux}} \xrightarrow{\text{L' Hospital 法则 (复变函数版本)}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{[e^{(u+iv)x} (f'(x) - \lambda_1 f(x))]'}{(e^{ux})'} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{[e^{-\lambda_2 x} (f'(x) - \lambda_1 f(x))]'}{(e^{ux})'} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^{-\lambda_2 x} [f''(x) + (\lambda_1 + \lambda_2)f'(x) + \lambda_1 \lambda_2 f(x)]}{ue^{ux}} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^{(u+iv)x} [f''(x) + af'(x) + bf(x)]}{ue^{ux}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^{ivx} [f''(x) + af'(x) + bf(x)]}{u} = 0, \end{aligned}$$

因此

$$0 = \lim_{x \rightarrow +\infty} [f'(x) - \lambda_1 f(x)] = \lim_{x \rightarrow +\infty} [f'(x) + uf(x) + ivf(x)].$$

于是

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} [f'(x) + uf(x)] = \lim_{x \rightarrow +\infty} vf(x) = 0.$$

又因为 $u > 0, v \neq 0$, 所以 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$, 进而 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 0$. 再由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} [f''(x) + af'(x) + bf(x)] = 0$ 可得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f''(x) = 0$.

综上, 结论得证. □

注 第②中情况中不使用L'Hospital 法则 (复变函数版本) 的方法: 考虑

$$e^{-\lambda_2 x} [f'(x) - \lambda_1 f(x)] = e^{(u+iv)x} [f'(x) - (-u + iv)f(x)] = e^{ux} (\cos vx + i \sin vx) [f'(x) + uf(x) - ivf(x)].$$

则上述复变函数实部和虚部分别为

$$\text{实部: } e^{ux} [(f'(x) + uf(x)) \cos vx + vf(x) \sin vx];$$

$$\text{虚部: } e^{ux} [(f'(x) + uf(x)) \sin vx - vf(x) \cos vx].$$

于是利用 L' Hospital 法则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} [(f'(x) + uf(x)) \cos vx + vf(x) \sin vx] = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^{ux} [(f'(x) + uf(x)) \cos vx + vf(x) \sin vx]}{e^{ux}}$$

$$\begin{aligned}
&= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{[e^{ux} ((f'(x) + uf(x)) \cos vx + vf(x) \sin vx)]'}{(e^{ux})'} \\
&= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^{ux} \cos vx [f''(x) + af'(x) + bf(x)]}{ue^{ux}} \\
&= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\cos vx [f''(x) + af'(x) + bf(x)]}{u} = 0.
\end{aligned}$$

同理利用 L' Hospital 法则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} [(f'(x) + uf(x)) \sin vx - vf(x) \cos vx] = 0.$$

因此当 $x \rightarrow +\infty$ 时, $e^{-\lambda_2 x} [f'(x) - \lambda_1 f(x)]$ 的实部和虚部都趋于 0, 故

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} e^{-\lambda_2 x} [f'(x) - \lambda_1 f(x)] = 0.$$

从而 $\lim_{x \rightarrow +\infty} [f'(x) - \lambda_1 f(x)] = 0$, 后续同理可证 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} f''(x) = 0$.

例题 2.25 给定正整数 n , 设 $f(x) \in C^n[-1, 1]$, $|f(x)| \leq 1$, 证明: 存在与 $f(x)$ 无关的常数 C , 使得只要 $|f'(0)| \geq C, f^{(n)}(x)$ 在 $(-1, 1)$ 中就会有至少 $n-1$ 个不同的根.

证明 证明见豌豆 (2024-2025 竞赛班下数学类讲义洛必达法则部分), 本题证明直观上定性分析比较容易, 但是要严谨地书写过程比较繁琐 (证明太麻烦没看).

□

例题 2.26 设 $f(x)$ 在 $(0, 1)$ 中任意阶可导且各阶导数均非负, 证明: $f(x)$ 是实解析函数.(伯恩斯坦定理) 类似的, 如果 $(-1)^n f^{(n)}(x) \geq 0$ 恒成立, 则 $f(x)$ 也是实解析的.

证明 对 $\forall x \in (0, 1)$, 固定 x , 则任取 $h > 0$, 使得 $x + 2h \in (0, 1)$. 于是由 Taylor 定理可知

$$f(x + 2h) = f(x) + f'(x) \cdot 2h + \cdots + \frac{f^{(n)}(x)}{n!} (2h)^n + \frac{1}{n!} \int_x^{x+2h} f^{(n+1)}(t) (x + 2h - t)^n dt.$$

又由于 f 任意阶导数均非负, 故 f 的任意阶导数都是单调递增函数. 从而

$$\begin{aligned}
\frac{1}{n!} \int_x^{x+h} f^{(n+1)}(t) (x + h - t)^n dt &\leq \frac{1}{n!} \int_x^{x+h} f^{(n+1)}(2t - x) (x + h - t)^n dt \\
&\stackrel{u=2t-x}{=} \frac{1}{2^{n+1} n!} \int_x^{x+2h} f^{(n+1)}(u) (x + 2h - u)^n du \\
&= \frac{1}{2^{n+1}} \left[f(x + 2h) - \left(f(x) + f'(x) \cdot 2h + \cdots + \frac{f^{(n)}(x)}{n!} (2h)^n \right) \right] \\
&\leq \frac{f(x + 2h) - f(x)}{2^{n+1}} \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty.
\end{aligned}$$

因此 f 可以在 x 的任意右邻域展开成幂级数 (因为余项趋于 0), 即

$$f(y) = f(x) + f'(x)(y - x) + \cdots + \frac{f^{(n)}(x)}{n!} (y - x)^n + \cdots = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{f^{(n)}(x)}{n!} (y - x)^n, \quad \forall y \in U_+(x).$$

但是同样的方法对于 $x < 0$ 时似乎难以处理, 因为单调性对不上, 所以换个方法 (可以一次解决问题, 直接对高阶导数进行估计, 由此说明余项趋于零, 也无需讨论正负)

设 $|f(x)|$ 在 $[-\frac{3}{4}, \frac{3}{4}]$ 中的最大值为 M , 对任意 $|x| < \frac{1}{4}$ 有

$$f\left(x + \frac{1}{2}\right) = f(x) + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{f^{(k)}(x)}{k!} \frac{1}{2^k} + \frac{f^{(n)}(x)}{n!} \frac{1}{2^n} + \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \frac{1}{2^{n+1}} \geq f(x) + \frac{f^{(n)}(x)}{n!} \frac{1}{2^n}$$

由此得到

$$0 \leq \frac{f^{(n)}(x)}{n!} \leq 2^n \left(f\left(x + \frac{1}{2}\right) - f(x) \right) \leq 2^{n+1} M, \quad \forall x \in \left(-\frac{1}{4}, \frac{1}{4}\right)$$

进而

$$\left| f(x) - \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(0)}{k!} x^k \right| = \frac{|f^{(n+1)}(\xi)|}{(n+1)!} |x|^{n+1} \leq 2^{n+2} M |x|^{n+1} \leq 2^{n+2} M \frac{1}{4^{n+1}} \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty$$

所以 $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(0)}{n!} x^n, \forall x \in \left(-\frac{1}{4}, \frac{1}{4}\right)$, 这就证明了实解析
对于第二问, 考虑函数 $f(-x)$ 即可.

□

例题 2.27 设 $g(x)$ 是 $(0, +\infty)$ 中恒正的连续函数, $a > 0$ 使得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{g(x)}{x^{1+a}} = +\infty$, 若 $f(x)$ 在 $(0, +\infty)$ 中恒正且二阶可导, 满足 $f''(x) + f'(x) > g(f(x))$ 恒成立, 证明: $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$.

证明 由 $f''(x) + f'(x) > g(f(x)) > 0, \forall x \in (0, +\infty)$ 可得

$$(e^x f'(x))' = e^x (f''(x) + f'(x)) > 0, \forall x \in (0, +\infty).$$

从而 $e^x f'(x)$ 在 $(0, +\infty)$ 上严格递增.

(i) 若 $e^x f'(x)$ 在 $(0, +\infty)$ 上无零点, 则

$$e^x f'(x) > 0 \Rightarrow f'(x) > 0, \forall x \in (0, +\infty).$$

(ii) 若 $e^x f'(x)$ 在 $(0, +\infty)$ 上有零点, 则由其严格递增性可知, 存在唯一的 $a > 0$, 使得 $e^a f'(a) = 0$. 于是

$$e^x f'(x) > e^a f'(a) = 0, \forall x \in (a, +\infty).$$

故一定存在 $X > 0$, 使得 $f'(x) > 0, \forall x \in (X, +\infty)$. 从而 $f(x)$ 在 $(X, +\infty)$ 上严格递增.

由 $f''(x) + f'(x) > g(f(x)) > 0, \forall x \in (0, +\infty)$ 还可以得到

$$[f'(x) + f(x)]' = f''(x) + f'(x) > 0, \forall x \in (0, +\infty).$$

于是 $f'(x) + f(x)$ 在 $(0, +\infty)$ 上严格递增. 从而 $\lim_{x \rightarrow +\infty} [f'(x) + f(x)] = L$ 为有限数或 $+\infty$ (广义存在).

由 L'Hospital 法则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^x f(x)}{e^x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^x [f'(x) + f(x)]}{e^x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} [f'(x) + f(x)] = L.$$

又由 f 恒正可知 $L \geq 0$. 反证, 假设 $L \neq 0$, 则

①当 $L \in (0, +\infty)$ 时, 此时, 由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} [f'(x) + f(x)] = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = L$ 可得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 0$.

再对 $f''(x) + f'(x) > g(f(x))$ 两边同时令 $x \rightarrow +\infty$, 可得

$$\liminf_{x \rightarrow +\infty} f''(x) + \lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) \geq \lim_{x \rightarrow +\infty} g(f(x)) = g\left(\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)\right).$$

即 $\liminf_{x \rightarrow +\infty} f''(x) \geq g(L)$. 于是由 Lagrange 中值定理可知, 存在 $c > X + 1$, 使得

$$f'(x) = f'(X + 1) + f''(c)(x - X - 1) \geq f'(X + 1) + g(L)(x - X - 1), \forall x > X + 1.$$

令 $x \rightarrow +\infty$, 得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = +\infty$, 这与 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 0$ 矛盾!

②当 $L = +\infty$ 时, 此时 $\lim_{x \rightarrow +\infty} [f'(x) + f(x)] = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$. 由 $f''(x) + f'(x) > g(f(x))$ 可得

$$\frac{f''(x) + f'(x)}{(f(x))^{1+a}} > \frac{g(f(x))}{(f(x))^{1+a}}.$$

从而由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{g(x)}{x^{1+a}} = +\infty$ 可得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f''(x) + f'(x)}{(f(x))^{1+a}} = +\infty$.

由 $f(x) > 0, \forall x > X$ 可得, 对 $\forall x > X$, 我们有

$$\frac{f''(x) + f'(x)}{(f(x))^{1+a}} = \frac{(f''(x) + f'(x))(f'(x) + f(x))}{(f(x))^{1+a} (f'(x) + f(x))} < \frac{(f''(x) + f'(x))(f'(x) + f(x))}{(f(x))^{1+a} f'(x)}.$$

令 $x \rightarrow +\infty$, 得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(f''(x) + f'(x))(f'(x) + f(x))}{(f(x))^{1+a} f'(x)} = +\infty$.

又由 L'Hospital 法则可知

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(f'(x) + f(x))^2}{(f(x))^{2+a}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{[(f'(x) + f(x))^2]'}{[(f(x))^{2+a}]'} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(f''(x) + f'(x))(f'(x) + f(x))}{(2+a)(f(x))^{1+a} f'(x)} = +\infty.$$

于是 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f'(x) + f(x)}{(f(x))^{1+\frac{a}{2}}} = +\infty$. 又由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$ 可得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{(f(x))^{1+\frac{a}{2}}} = 0$. 因此 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f'(x)}{(f(x))^{1+\frac{a}{2}}} = +\infty$. 故存在

$M > X + 1$, 使得

$$\frac{f'(x)}{(f(x))^{1+\frac{a}{2}}} > 1, \forall x > M.$$

两边同时积分可得

$$\int_M^{+\infty} \frac{1}{x^{1+\frac{a}{2}}} dx = \int_M^{+\infty} \frac{1}{(f(x))^{1+\frac{a}{2}}} df(x) = \int_M^{+\infty} \frac{f'(x)}{(f(x))^{1+\frac{a}{2}}} dx \geq \int_M^{+\infty} dx = +\infty.$$

而 $\int_M^{+\infty} \frac{1}{x^{1+\frac{a}{2}}} dx$ 收敛, 矛盾!

□

例题 2.28 设 $f(x)$ 非负且二阶可导, $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f''(x)}{f(x)(1+f'^2(x))^2} = +\infty$, 证明:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_0^x \frac{\sqrt{1+f'^2(t)}}{f(t)} dt \int_x^{+\infty} f(t) \sqrt{1+f'^2(t)} dt = 0.$$

证明 由条件可知存在 $X > 0$ 使得

$$\frac{f''(x)}{f(x)(1+f'^2(x))^2} > 0, \forall x > X \implies f''(x) > 0, \forall x > X.$$

从而 $f(x)$ 在 $(X, +\infty)$ 上下凸 $f'(x)$ 在 $(X, +\infty)$ 上递增于是由下凸函数的单调性可知 f 在 $(X, +\infty)$ 上的单调性只有三种情况递减、递增、先递减再递增若 $f(x)$ 在 $(X, +\infty)$ 上递增或者先递减再递增则一定存在 $X_2 > X$ 使得 $f(x)$ 在 $(X_2, +\infty)$ 上递增现在只在 $(X_2, +\infty)$ 上进行考虑由 f 递增且非负可知 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \triangleq A_1$ 为正数或 $+\infty$ 假设 A_1 为某个正数则

$$+\infty = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f''(x)}{f(x)(1+f'^2(x))^2} = \frac{1}{A_1} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f''(x)}{(1+f'^2(x))^2}.$$

从而 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f''(x) = +\infty$ 于是由 Lagrange 中值定理可知存在 $\eta > X_2 + 1$ 使得

$$f'(x) = f'(X_2 + 1) + f''(\eta)(x - X_2 - 1), \forall x > X_2 + 1.$$

令 $x \rightarrow +\infty$ 则 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = +\infty$ 再利用 Lagrange 中值定理同理可得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$ 这与 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \triangleq A_1$ 为某个正数矛盾故 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$ 再利用 L' Hospital 法则可得

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{-\frac{1}{1+(f'(x))^2}}{f^2(x)} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\left[-\frac{1}{1+(f'(x))^2}\right]'}{\left[f^2(x)\right]'} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2f''(x)f'(x)}{(1+f'^2(x))^2} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f''(x)}{f(x)(1+f'^2(x))^2} = +\infty. \end{aligned}$$

而 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{-\frac{1}{1+(f'(x))^2}}{f^2(x)} \leq 0$ 矛盾故 $f(x)$ 在 $(X, +\infty)$ 上必然单调递减则 $f'(x) < 0 \quad \forall x > X \wedge f(x) > 0$ 故 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \triangleq A \geq 0$ 由 $f'(x)$ 在 $(X, +\infty)$ 上递增可知 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x)$ 存在且 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) \leq 0$ 假设 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) \triangleq A' < 0$ 则存在 $X_1 > X$ 使得

$$f'(x) < \frac{A'}{2} < 0 \quad \forall x > X_1.$$

于是由 Lagrange 中值定理可知存在 $\xi > X_1 + 1$ 使得

$$f(x) = f(X_1 + 1) + f'(\xi)(x - X_1 - 1) < f(X_1 + 1) + \frac{A'}{2}(x - X_1 - 1) \quad \forall x > X_1 + 1.$$

令 $x \rightarrow +\infty$ 得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = -\infty$ 这与 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \geq 0$ 矛盾故 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 0$ 从而再由条件可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f''(x)}{f(x)(1+f'^2(x))^2} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f''(x)}{f(x)} = +\infty.$$

再考虑 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 已知 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \triangleq A \geq 0$ 假设 $A > 0$ 则由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 0$ 及条件可得

$$+\infty = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f''(x)}{f(x)(1+f'^2(x))^2} = \frac{1}{A} \lim_{x \rightarrow +\infty} f''(x) \implies \lim_{x \rightarrow +\infty} f''(x) = +\infty.$$

于是存在 $M > X_1 + 1$ 使得

$$f''(x) > 1 \quad \forall x > M.$$

从而由 Lagrange 中值定理可知存在 $\xi_1 > M + 1$ 使得

$$f'(x) = f'(M + 1) + f''(\xi_1)(x - M - 1) > f'(M + 1) + (x - M - 1) \quad \forall x > M + 1.$$

令 $x \rightarrow +\infty$ 则 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = +\infty$ 再利用 Lagrange 中值定理同理可得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$ 这与 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = A > 0$ 矛盾故 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$ 综上可知 $f(x)$ 在 $(X, +\infty)$ 上递减进而 $f'(x) \leq 0$ 并且 $f'(x)$ 在 $(X, +\infty)$ 上递增还有

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 0, \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f''(x)}{f(x)} = +\infty.$$

于是显然 $f(x) \geq 0$ 从而存在 $X' > X$ 使得

$$f'(x) \leq 1 \quad \forall x > X'. \quad (2.12)$$

又因为 $f \in D^2(\mathbb{R})$ 所以 f, f' 都连续从而在 $[0, X']$ 上都有界即存在 $L > 0$ 使得

$$|f(x)|, |f'(x)| < L \quad \forall x \in [0, X']. \quad (2.13)$$

由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f''(x)}{f(x)} = +\infty$ 可知存在 $X'' > X'$ 使得

$$f''(x) > f(x) \quad \forall x > X''.$$

从而结合 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 0$ 可得

$$\int_x^{+\infty} f(t) dt < \int_x^{+\infty} f''(t) dt = f'(+\infty) - f'(x) = -f'(x) \quad \forall x > X''. \quad (2.14)$$

于是由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 0$ 可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_x^{+\infty} f(t) dt = 0. \quad (2.15)$$

利用 L' Hospital 法则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(f'(x))^2}{(f(x))^2} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{[(f'(x))^2]'}{[(f(x))^2]'} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f''(x)f'(x)}{f(x)f'(x)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f''(x)}{f(x)} = +\infty.$$

又因为 $f'(x) \leq 0$ $f(x) \geq 0$ 所以

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{|f'(x)|}{|f(x)|} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{-f'(x)}{f(x)} = +\infty \implies \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{f'(x)} = 0.$$

再结合 (2.15) 式及 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$ 利用 L' Hospital 法则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_x^{+\infty} f(t) dt}{f(x)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{f'(x)} = 0. \quad (2.16)$$

令 $g(x) = \frac{1}{f(x)}$ 则由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$ 可知 $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = +\infty$ 并且

$$0 = -\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{f'(x)} = -\lim_{x \rightarrow +\infty} -\frac{\frac{1}{g(x)}}{-\frac{g'(x)}{g^2(x)}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{g(x)}{g'(x)}.$$

由 L' Hospital 法则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \int_0^x \frac{1}{f(t)} dt = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x g(t) dt}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{g(x)}{g'(x)} = 0. \quad (2.17)$$

于是由 (2.12) (2.13) (2.14) 式可得

$$\begin{aligned} \int_0^x \frac{\sqrt{1 + f'^2(t)}}{f(t)} dt \int_x^{+\infty} f(t) \sqrt{1 + f'^2(t)} dt &\leq \left(\int_0^{X''} \frac{\sqrt{1 + f'^2(t)}}{f(t)} dt + \int_{X''}^x \frac{1}{f(t)} dt \right) \sqrt{2} \int_x^{+\infty} f(t) dt \\ &\leq \sqrt{2} \left(\int_0^{X''} \frac{\sqrt{1 + L^2}}{-L} dt + \int_0^x \frac{1}{f(t)} dt \right) \int_x^{+\infty} f(t) dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\leq -\sqrt{2} \left(\frac{X''\sqrt{1+L^2}}{-L} + \int_0^x \frac{1}{f(t)} dt \right) \int_x^{+\infty} f(t) dt \\
&= \frac{\sqrt{2}X''\sqrt{1+L^2}}{L} \int_x^{+\infty} f(t) dt - \sqrt{2} \int_0^x \frac{1}{f(t)} dt \int_x^{+\infty} f(t) dt \\
&\leq \frac{\sqrt{2}X''\sqrt{1+L^2}}{L} f'(x) - \sqrt{2}f(x) \int_0^x \frac{1}{f(t)} dt \frac{\int_x^{+\infty} f(t) dt}{f(x)}, \forall x > X''.
\end{aligned}$$

令 $x \rightarrow +\infty$ 则由 (2.17) (2.16) 式和 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 0$ 可得

$$\limsup_{x \rightarrow +\infty} \int_0^x \frac{\sqrt{1+f'^2(t)}}{f(t)} dt \int_x^{+\infty} f(t) \sqrt{1+f'^2(t)} dt \leq 0.$$

故结论得证. \square

2.1.5 与方程的根有关的渐近估计

2.1.5.1 可以解出 n 的类型

例题 2.29 设 $x^{2n+1} + e^x = 0$ 的根记为 x_n , 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n, \lim_{n \rightarrow \infty} n(1+x_n).$$

解 注意到 $0^{2n+1} + e^0 > 0, (-1)^{2n+1} + e^{-1} < 0$ 且 $x^{2n+1} + e^x$ 严格单调递增, 所以由零点存在定理可知, 对每个 $n \in \mathbb{N}$, 存在唯一的 $x_n \in (-1, 0)$, 使得

$$x_n^{2n+1} + e^{x_n} = 0 \Rightarrow \frac{x_n}{\ln(-x_n)} = 2n+1 \rightarrow +\infty, n \rightarrow +\infty.$$

任取 $\{x_n\}$ 的一个收敛子列 $\{x_{n_k}\}$, 又 $x_n \in (-1, 0)$, 因此可设 $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = c \in [-1, 0]$, 则 $\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{x_{n_k}}{\ln(-x_{n_k})} = \frac{c}{\ln(-c)}$. 又

因为 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{x_n}{\ln(-x_n)} = +\infty$, 所以由 Heine 归结原则可知 $\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{x_{n_k}}{\ln(-x_{n_k})} = +\infty$. 从而

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{x_{n_k}}{\ln(-x_{n_k})} = \frac{c}{\ln(-c)} = +\infty,$$

故 $c = -1$. 于是由子列极限命题 (a) 知 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = -1$. 因此

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n(1+x_n) = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} (2n+1)(1+x_n) = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n(1+x_n)}{\ln(-x_n)} = \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow -1^+} \frac{x(1+x)}{\ln(-x)} = \frac{1}{2}.$$

\square

例题 2.30 设 $a_n \in (0, 1)$ 是 $x^n + x = 1$ 的根, 证明

$$a_n = 1 - \frac{\ln n}{n} + o\left(\frac{\ln n}{n}\right).$$

证明 注意到 $0^n + 0 - 1 < 0, 1^n + 1 - 1 > 0$, 且 $x^n + x - 1$ 在 $(0, 1)$ 上严格单调递增, 所以由零点存在定理可知, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 存在唯一的 $a_n \in (0, 1)$, 使得

$$a_n^n + a_n = 1 \Rightarrow \frac{\ln(1-a_n)}{\ln a_n} = n \rightarrow +\infty, n \rightarrow +\infty. \quad (2.18)$$

任取 $\{a_n\}$ 的一个收敛子列 $\{a_{n_k}\}$, 又 $a_n \in (0, 1)$, 因此可设 $\lim_{k \rightarrow +\infty} a_{n_k} = c \in [0, 1]$, 则 $\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{\ln(1-a_{n_k})}{\ln a_{n_k}} = \frac{\ln(1-c)}{\ln c}$.

又由(2.18)式可知 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\ln(1-a_n)}{\ln a_n} = +\infty$, 所以由 Heine 归结原则可知 $\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{\ln(1-a_{n_k})}{\ln a_{n_k}} = +\infty$. 从而

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{\ln(1-a_{n_k})}{\ln a_{n_k}} = \frac{\ln(1-c)}{\ln c} = +\infty.$$

故 $c = 1$, 于是由子列极限命题 (a) 可知

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = c = 1. \quad (2.19)$$

而要证 $a_n = 1 - \frac{\ln n}{n} + o\left(\frac{\ln n}{n}\right)$, $n \rightarrow +\infty$, 等价于证明 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n - 1 + \frac{\ln n}{n}}{\frac{\ln n}{n}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{na_n - n + \ln n}{\ln n} = 0$. 利用(2.18)(2.19)式可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{na_n - n + \ln n}{\ln n} &= \lim_{n \rightarrow +\infty} \left[\frac{\frac{\ln(1-a_n)}{\ln a_n} \cdot a_n - \frac{\ln(1-a_n)}{\ln a_n}}{\ln \frac{\ln(1-a_n)}{\ln a_n}} + 1 \right] = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left[\frac{(a_n - 1) \ln(1-a_n)}{\ln a_n \left(\ln \frac{\ln(1-a_n)}{\ln a_n} \right)} + 1 \right] \\ &= \lim_{x \rightarrow 1^-} \left[\frac{(x-1) \ln(1-x)}{\ln x \left(\ln \frac{\ln(1-x)}{\ln x} \right)} + 1 \right] = \lim_{x \rightarrow 0^+} \left[\frac{x \ln(-x)}{\ln(1+x) \left(\ln \frac{\ln(-x)}{\ln(1+x)} \right)} + 1 \right]. \end{aligned} \quad (2.20)$$

由 L'Hospital's rules 可得

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x \ln(-x)}{\ln(1+x) \left(\ln \frac{\ln(-x)}{\ln(1+x)} \right)} &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln(-x)}{\ln \frac{\ln(-x)}{\ln(1+x)}} \xrightarrow{\text{L'Hospital's rules}} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\frac{1}{x}}{\frac{\ln(1+x)}{\ln(-x)} \cdot \frac{\frac{1}{x} \ln(1+x) - \frac{1}{1+x} \ln(-x)}{\ln^2(1+x)}} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln(-x) \cdot \ln(1+x)}{\ln(1+x) - \frac{x}{1+x} \ln(-x)} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x \ln(-x)}{\ln(1+x) - \frac{x}{1+x} \ln(-x)} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x}{\frac{\ln(1+x)}{\ln(-x)} - \frac{x}{1+x}} = \lim_{x \rightarrow 0^+} -\frac{x}{1+x} = -1. \end{aligned} \quad (2.21)$$

于是结合(2.20)(2.21)式可得

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{na_n - n + \ln n}{\ln n} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \left[\frac{x \ln(-x)}{\ln(1+x) \left(\ln \frac{\ln(-x)}{\ln(1+x)} \right)} + 1 \right] = -1 + 1 = 0.$$

故 $a_n = 1 - \frac{\ln n}{n} + o\left(\frac{\ln n}{n}\right)$, $n \rightarrow +\infty$.

□

例题 2.31 设 $f_n(x) = x + x^2 + \dots + x^n$, $n \in \mathbb{N}$, $f_n(x) = 1$ 在 $[0, 1]$ 的根为 x_n . 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.

解 注意到 $f_n(x) - 1$ 严格单调递增, 且 $f_n(0) - 1 = -1 < 0$, $f_n(1) - 1 = n - 1 > 0$, $\forall n \geq 2$. 故由零点存在定理可知, 当 $n \geq 2$ 时, 存在唯一的 $x_n \in (0, 1)$, 使得 $f_n(x_n) = 1$. 从而

$$f_n(x_n) = \frac{x_n - x_n^{n+1}}{1 - x_n} = 1 \Rightarrow x_n - x_n^{n+1} = 1 - x_n \Rightarrow x_n^{n+1} = 2x_n - 1 \Rightarrow n+1 = \frac{\ln(2x_n - 1)}{\ln x_n}. \quad (2.22)$$

由上式(2.22)可知 $x_n^{n+1} = 2x_n - 1$ 且 $x_n \in (0, 1)$, 因此

$$0 \leq x_n^{n+1} = 2x_n - 1 \leq 1 \Rightarrow x_n \in \left(\frac{1}{2}, 1 \right).$$

任取 $\{x_n\}$ 的收敛子列 $\{x_{n_k}\}$, 设 $\lim_{k \rightarrow +\infty} x_{n_k} = a \in \left[\frac{1}{2}, 1 \right]$, 则由(2.22)式和 Heine 归结原则可知

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{\ln(2x_{n_k} - 1)}{\ln x_{n_k}} = \frac{\ln(2a - 1)}{\ln a} = +\infty.$$

故 $a = \frac{1}{2}$, 再由子列极限命题 (a) 可知 $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = a = \frac{1}{2}$.

□

2.1.5.2 迭代方法

例题 2.32 设 x_n 是 $x = \tan x$ 从小到大排列的全部正根, 设

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n(x_n - An - B) = C,$$

求 A, B, C .

笔记 主要想法是结合 $\arctan x$ 的性质: $\arctan x + \arctan \frac{1}{x} = \frac{\pi}{2}$, $x > 0$, 再利用迭代法计算渐近展开.

解 令 $f(x) = \tan x - x$, $x \in (n\pi, n\pi + \frac{\pi}{2})$, $n = 1, 2, \dots$, 则 $f'(x) = \tan^2 x > 0$, $\forall x \in (n\pi, n\pi + \frac{\pi}{2})$, $n = 1, 2, \dots$. 因此 $f(x)$ 在 $(n\pi, n\pi + \frac{\pi}{2})$ 上严格单调递增, 其中 $n = 1, 2, \dots$. 又注意到 $\lim_{x \rightarrow (n\pi)^+} (\tan x - x) = -n\pi < 0$, $\lim_{x \rightarrow (n\pi + \frac{\pi}{2})^+} (\tan x - x) = +\infty > 0$.

故由零点存在定理可知, 存在唯一的 $x_n \in (n\pi, n\pi + \frac{\pi}{2}), n = 1, 2, \dots$, 使得

$$\tan x_n = x_n.$$

从而 $x_n - n\pi \in (0, \frac{\pi}{2})$, 于是

$$x_n = \tan x_n = \tan(x_n - n\pi) \Rightarrow x_n = \arctan x_n + n\pi. \quad (2.23)$$

又因为 $x_n \in (n\pi, n\pi + \frac{\pi}{2}), n = 1, 2, \dots$, 所以当 $n \rightarrow +\infty$ 时, 有 $x_n \rightarrow +\infty$. 再结合(2.23)式可得

$$x_n = \arctan x_n + n\pi = n\pi + \frac{\pi}{2} + o(1), n \rightarrow +\infty. \quad (2.24)$$

注意到 $\arctan x + \arctan \frac{1}{x} = \frac{\pi}{2}, x > 0$, 从而 $\arctan x = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{1}{x}$. 于是利用(2.24)式可得

$$\begin{aligned} x_n &= \arctan x_n + n\pi = \frac{\pi}{2} + n\pi - \arctan \frac{1}{x_n} = \frac{\pi}{2} + n\pi - \arctan \frac{1}{n\pi + \frac{\pi}{2} + o(1)} \\ &= \frac{\pi}{2} + n\pi - \arctan \left(\frac{1}{n\pi} \frac{1}{1 + \frac{1}{2n} + o(\frac{1}{n})} \right) = \frac{\pi}{2} + n\pi - \arctan \left[\frac{1}{n\pi} \left(1 + O(\frac{1}{n}) \right) \right] \\ &= \frac{\pi}{2} + n\pi - \arctan \left[\frac{1}{n\pi} + O(\frac{1}{n^2}) \right] = \frac{\pi}{2} + n\pi - \frac{1}{n\pi} + O(\frac{1}{n^2}), n \rightarrow +\infty. \end{aligned}$$

因此 $\lim_{n \rightarrow +\infty} n \left(x_n - \frac{\pi}{2} - n\pi \right) = -\frac{1}{\pi}$.

□

命题 2.4 (Lampert W 的渐进估计)

设 $x_n > 0$ 满足 $x_n e^{x_n} = n, n = 1, 2, \dots$, 证明

$$x_n = \ln n - \ln \ln n + \frac{\ln \ln n}{\ln n} + o\left(\frac{\ln \ln n}{\ln n}\right), n \rightarrow \infty.$$

◆

证明 注意到

$$1 \leq x_n = \ln n - \ln x_n \leq \ln n \Rightarrow x_n = O(\ln n), n = 3, 4, \dots,$$

于是

$$\begin{aligned} \ln x_n &= \ln \ln n + \ln \left(1 - \frac{\ln x_n}{\ln n} \right) = \ln \ln n - \frac{\ln x_n}{\ln n} + o\left(\frac{\ln x_n}{\ln n}\right) = \ln \ln n - \frac{\ln O(\ln n)}{\ln n} + o\left(\frac{\ln O(\ln n)}{\ln n}\right) \\ &= \ln \ln n - \frac{\ln \ln n + \ln O(1)}{\ln n} + o\left(\frac{\ln \ln n + \ln O(1)}{\ln n}\right) \\ &= \ln \ln n - \frac{\ln \ln n}{\ln n} + o\left(\frac{\ln \ln n}{\ln n}\right), \end{aligned}$$

即

$$x_n = \ln n - \ln \ln n + \frac{\ln \ln n}{\ln n} + o\left(\frac{\ln \ln n}{\ln n}\right).$$

□

2.2 估计和式的常用方法

2.2.1 和式放缩成积分

命题 2.5

设 f 在 $(0, 1)$ 单调且 $\int_0^1 f(x)dx$ 收敛, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} f\left(\frac{k}{n}\right) = \int_0^1 f(x)dx.$$



证明 不妨设 f 递减, 则一方面, 我们有

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} f\left(\frac{k}{n}\right) \geq \sum_{k=1}^{n-1} \int_{\frac{k}{n}}^{\frac{k+1}{n}} f(x)dx = \int_{\frac{1}{n}}^1 f(x)dx.$$

令 $n \rightarrow \infty$, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} f\left(\frac{k}{n}\right) \geq \int_0^1 f(x)dx.$$

另一方面, 我们有

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} f\left(\frac{k}{n}\right) \leq \sum_{k=1}^{n-1} \int_{\frac{k-1}{n}}^{\frac{k}{n}} f(x)dx = \int_0^{1-\frac{1}{n}} f(x)dx.$$

令 $n \rightarrow \infty$, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} f\left(\frac{k}{n}\right) \leq \int_0^1 f(x)dx.$$

故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} f\left(\frac{k}{n}\right) = \int_0^1 f(x)dx.$$

□

2.2.2 强行替换 (拟合法) 和凑定积分

例题 2.33 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n + \frac{i^2+1}{n}}.$$

笔记 证明的想法要么是凑定积分定义. 要么强行替换为自己熟悉的结构 (拟合法), 无需猜测放缩手段.

注 注意定积分定义是任意划分任意取点, 而不只是等分取端点.

解 **解法一:** 注意到

$$\frac{i}{n} < \frac{\sqrt{i^2+1}}{n} < \frac{i+1}{n}, i = 1, 2, \dots, n,$$

于是由定积分定义有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n + \frac{i^2+1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + \left(\frac{\sqrt{i^2+1}}{n}\right)^2} = \int_0^1 \frac{1}{1+x^2} dx = \frac{\pi}{4}.$$

解法二: 注意到

$$0 \leq \left| \sum_{i=1}^n \frac{1}{n + \frac{i^2+1}{n}} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n + \frac{i^2}{n}} \right| \leq \sum_{i=1}^n \frac{1}{n \left(n + \frac{i^2+1}{n}\right) \left(n + \frac{i^2}{n}\right)} \leq \sum_{i=1}^n \frac{1}{n^3} = \frac{1}{n^2} \rightarrow 0, n \rightarrow \infty,$$

故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n + \frac{i^2+1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n + \frac{i^2}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + \frac{i^2}{n^2}} = \int_0^1 \frac{1}{1+x^2} dx = \frac{\pi}{4}.$$

□

例题 2.34 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{2n} \frac{i+4}{n^2 + \frac{1}{i}} \sin^4 \frac{\pi i}{n}.$$

笔记 长得神似定积分定义且很容易观察到 $\frac{i+4}{n^2 + \frac{1}{i}}$ 和 $\frac{i}{n^2}$ 没有区别, 懒得去寻求放缩方法, 直接采用强行替换的方法, 即做差 $\frac{i+4}{n^2 + \frac{1}{i}} - \frac{i}{n^2}$ 强估证明不影响极限.

证明 注意到

$$\begin{aligned} & \left| \sum_{i=1}^{2n} \frac{i+4}{n^2 + \frac{1}{i}} \sin^4 \frac{\pi i}{n} - \sum_{i=1}^{2n} \frac{i}{n^2} \sin^4 \frac{\pi i}{n} \right| = \left| \sum_{i=1}^{2n} \left(\frac{i+4}{n^2 + \frac{1}{i}} - \frac{i}{n^2} \right) \sin^4 \frac{\pi i}{n} \right| \\ & \leq \sum_{i=1}^{2n} \frac{4n^2 - 1}{n^2 \left(n^2 + \frac{1}{i} \right)} \leq \sum_{i=1}^{2n} \frac{4n^2 - 1}{n^4} = \frac{2n(4n^2 - 1)}{n^4}, \end{aligned}$$

于是

$$0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \sum_{i=1}^{2n} \frac{i+4}{n^2 + \frac{1}{i}} \sin^4 \frac{\pi i}{n} - \sum_{i=1}^{2n} \frac{i}{n^2} \sin^4 \frac{\pi i}{n} \right| \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2n(4n^2 - 1)}{n^4} = 0.$$

因此

$$\begin{aligned} & \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{2n} \frac{i+4}{n^2 + \frac{1}{i}} \sin^4 \frac{\pi i}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{2n} \frac{i}{n} \sin^4 \frac{\pi i}{n} \\ & = \int_0^2 x \sin^4 \pi x dx \xrightarrow[\text{区间再现}]{\text{令 } x=2-y} \int_0^2 (2-y) \sin^4 \pi (2-y) dy \\ & = \int_0^2 (2-y) \sin^4 \pi y dy = \int_0^2 \sin^4 \pi x dx = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \sin^4 x dx \\ & = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^4 x dx = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{3!!}{4!!} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{3}{4}. \end{aligned}$$

□

2.2.3 和式内部对 n 可求极限 (极限号与求和号可换序)

当和式内部对 n 可求极限时, 极限号与求和号可以换序.(当和式内部对 n 求极限是 $\frac{\infty}{\infty}$ 或 $\frac{0}{0}$ 等都不能换序) 本质上就是控制收敛定理的应用.

注 不能按照极限号与求和号可换序的想法书写过程, 应该利用不等式放缩、夹逼准则和上下极限进行严谨地书写证明.

例题 2.35 求极限

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k}.$$

笔记 求这种前 n 项和关于 n 的极限 (n 既和求和号上限有关, 又和通项有关) 的思路是: 先假设极限存在 (这里极限号内是数列不是级数, 所以这里是数列收敛). 于是由数列收敛的柯西收敛准则可知, 对 $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $N_0 \in \mathbb{N}$, 使得对 $\forall n > N_0$, 都有

$$\varepsilon > \left| \sum_{k=0}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} - \sum_{k=0}^{N_0+1} \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{N_0+1}}}{2^k} \right| = \left| \sum_{k=N_0}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} + \sum_{k=0}^{N_0+1} \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}} - \cos \sqrt{\frac{k}{N_0+1}}}{2^k} \right| > \sum_{k=N_0}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k}.$$

从而由数列极限的定义, 可知对 $\forall N > N_0$, 都有 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=N}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} = 0$.

因此对 $\forall N > N_0$, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^N \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} + \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k>N}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^N \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} = \sum_{k=0}^N \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} = \sum_{k=0}^N \frac{1}{2^k}.$$

再令 $N \rightarrow +\infty$, 得到 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} = \lim_{N \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^N \frac{1}{2^k} = 2$.

综上所述, 我们在假设原极限收敛的前提下能够得到原极限就是 2, 因此我们可以凭借直觉不严谨地断言原极限实际上就是 2(如果原极限不是 2, 那么原极限只能发散, 否则与上述证明矛盾. 而出题人要我们求解的极限一般都不发散, 并且凭借直觉也能感觉到这个极限不发散).

注意: 因为这里我们并不能严谨地证明原数列收敛, 所以只凭借上述论证并不能严谨地得到原极限等于 2. (上述论证实际上就是一种“猜测”这种极限的值的方法)

虽然只凭借上述论证我们并不能直接得到原极限等于 2 的证明, 但是我们可以得到一个重要的结果: 原极限的值就是 2. 我们后续只需要证明这个结果是正确的即可. 后续证明只需要适当放缩原本数列, 再利用上下极限和夹逼定理即可(因为我们已经知道极限的值, 放缩的时候就能更容易地把握放缩的“度”). 并且我们根据上述论证可知(放缩的时候我们可以利用下述想法, 即将不影响整体的阶的余项通过放缩去掉), 原和式的极限等于其前 N 项的极限, 原和式除前 N 项外的余项的极限趋于 0, 即余项并不影响原数列的极限, 可以通过放缩将其忽略. 我们只需要考虑前 N 项的极限即可.

后续证明的套路一般都是: 放大: 可以直接通过一些常用不等式得到; 放小: 将原级数直接放缩成有限项再取下极限.

注: 关键是如何利用上述想法直接计算出极限的值, 后续的放缩证明只是为了保证其严谨性的形式上的证明.

注 上述思路本质上就是控制收敛定理的应用, 也可以使用 Toplitz 定理的分段估计想法解决本题. 于是我们今后遇到类似问题可以分别采取这两种思路解决.

这里我们可以采取两种方法去书写证明过程(夹逼定理和 Toplitz 定理).

解 一方面, 注意到 $\sum_{k=0}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} \leq \sum_{k=0}^n \frac{1}{2^k} = \frac{1 - \frac{1}{2^{n+1}}}{1 - \frac{1}{2}}$, 于是 $\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \frac{1 - \frac{1}{2^{n+1}}}{1 - \frac{1}{2}} = 2$.

另一方面, 注意到对 $\forall N \in \mathbb{N}$, 都有 $\sum_{k=0}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} \geq \sum_{k=0}^N \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k}, \forall n > N$. 从而

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} \geq \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^N \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} = \sum_{k=0}^N \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} = \sum_{k=0}^N \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} = \sum_{k=0}^N \frac{1}{2^k}, \forall N \in \mathbb{N}.$$

于是令 $N \rightarrow +\infty$, 得到 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} \geq \lim_{N \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^N \frac{1}{2^k} = 2$.

综上所述, 我们有 $2 \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^N \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} \leq 2$. 故 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^n \frac{\cos \sqrt{\frac{k}{n}}}{2^k} = 2$.

□

例题 2.36 计算 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n}\right)^n$.

注 注意倒序求和与顺序求和相等.(看到求和号内部有两个变量, 都可以尝试一下倒序求和)

笔记 **解法一**的思路: 我们利用上一题的想法计算 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n e^{n \ln(1 - \frac{k-1}{n})}$. 先假设级数 $\sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n}\right)^n$ 收敛, 则由 Cauchy 收敛准则可知, 存在 $N' > 0$, 使得

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n e^{n \ln(1 - \frac{k-1}{n})} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^N e^{n \ln(1 - \frac{k-1}{n})} = \sum_{k=1}^N \lim_{n \rightarrow +\infty} e^{n \ln(1 - \frac{k-1}{n})} = \sum_{k=1}^N e^{1-k}, \forall N > N'.$$

令 $N \rightarrow +\infty$, 则 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n e^{n \ln(1 - \frac{k-1}{n})} = \lim_{N \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^N e^{1-k} = \frac{e}{e-1}$. 然后再根据计算出来的结果对原级数进行适当放缩, 最后利用上下极限和夹逼准则得到完整的证明.

解 **解法一:** 注意到

$$\sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n}\right)^n = \sum_{k=1}^n \left(\frac{n-k+1}{n}\right)^n = \sum_{k=1}^n \left(1 - \frac{k-1}{n}\right)^n = \sum_{k=1}^n e^{n \ln(1 - \frac{k-1}{n})}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

一方面, 利用 $\ln(1+x) \leq x, \forall x \in \mathbb{R}$, 我们有

$$\sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n}\right)^n = \sum_{k=1}^n e^{n \ln(1 - \frac{k-1}{n})} \leq \sum_{k=1}^n e^{n \cdot (-\frac{k-1}{n})} = \sum_{k=1}^n e^{1-k}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

令 $n \rightarrow +\infty$, 则 $\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n}\right)^n \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n e^{1-k} = \frac{e}{e-1}$.

另一方面, 注意到 $\sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n}\right)^n = \sum_{k=1}^n e^{n \ln(1 - \frac{k-1}{n})} \geq \sum_{k=1}^N e^{n \ln(1 - \frac{k-1}{n})}, \forall N \in \mathbb{N}$. 两边同时对 n 取下极限, 可得对

$\forall N \in \mathbb{N}$, 都有

$$\begin{aligned} \underline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n}\right)^n &\geq \underline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^N e^{n \ln(1 - \frac{k-1}{n})} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^N e^{n \ln(1 - \frac{k-1}{n})} \\ &= \sum_{k=1}^N \lim_{n \rightarrow +\infty} e^{n \ln(1 - \frac{k-1}{n})} = \sum_{k=1}^N \lim_{n \rightarrow +\infty} e^{n \cdot (-\frac{k-1}{n})} = \sum_{k=1}^N e^{1-k} \end{aligned}$$

令 $N \rightarrow +\infty$, 则 $\underline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n}\right)^n \geq \lim_{N \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^N e^{1-k} = \frac{e}{e-1}$. 故 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n}\right)^n = \frac{e}{e-1}$.

解法二 (单调有界定理): 因为

$$\begin{aligned} S_n &= \left(\frac{1}{n}\right)^n + \left(\frac{2}{n}\right)^n + \cdots + \left(\frac{n-1}{n}\right)^n, \\ S_{n+1} &= \left(\frac{1}{n+1}\right)^{n+1} + \left(\frac{2}{n+1}\right)^{n+1} + \cdots + \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^{n+1} + \left(\frac{n}{n+1}\right)^{n+1}. \end{aligned}$$

所以证明 $\left(\frac{k}{n}\right)^n \leq \left(\frac{k+1}{n+1}\right)^{n+1}, 1 \leq k \leq n-1$ 即可, 这等价于 $\frac{(n+1)^{n+1}}{n^n} \leq \frac{(k+1)^{n+1}}{k^n}$. 实际上 $a_k = \frac{(k+1)^{n+1}}{k^n}, 1 \leq k \leq n$ 是单调递减数列, 因为

$$\frac{a_{k+1}}{a_k} = \frac{k^n (k+2)^{n+1}}{(k+1)^{2n+1}} = \frac{(x-1)^n (x+1)^{n+1}}{x^{2n+1}} = \left(1 - \frac{1}{x^2}\right)^n \left(1 + \frac{1}{x}\right), x = k+1 \in [2, n].$$

又由于

$$n \ln \left(1 - \frac{1}{x^2}\right) + \ln \left(1 + \frac{1}{x}\right) \leq -\frac{n}{x^2} + \frac{1}{x} = \frac{x-n}{x^2} \leq 0, \forall x = k+1 \in [2, n].$$

从而 $\left(1 - \frac{1}{x^2}\right)^n \left(1 + \frac{1}{x}\right) = e^{n \ln(1 - \frac{1}{x^2}) + \ln(1 + \frac{1}{x})} \leq e^0 = 1, \forall x = k+1 \in [2, n]$, 故 $a_{k+1} \leq a_k, \forall 1 \leq k \leq n$. 于是 $\frac{(k+1)^{n+1}}{k^n} = a_k \geq a_n = \frac{(n+1)^{n+1}}{n^n}$, 也即 S_n 单调递增. 注意

$$S_n = \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{k}{n}\right)^n = \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{n-k+1}{n}\right)^n = \sum_{k=1}^{n-1} e^{n \ln(1 - \frac{k-1}{n})} \leq \sum_{k=1}^{n-1} e^{1-k} \leq \sum_{k=1}^{\infty} e^{1-k} = \frac{e}{e-1}.$$

所以单调有界, 极限一定存在, 设为 S . 对任意正整数 $n > m$, 先固定 m , 对 n 取极限有

$$S_n = \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{n-k+1}{n}\right)^n \geq \sum_{k=1}^m \left(\frac{n-k+1}{n}\right)^n \Rightarrow S = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n \geq \sum_{k=1}^m \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n-k+1}{n}\right)^n = \sum_{k=1}^m e^{1-k}$$

这对任意正整数 m 均成立, 再令 $m \rightarrow \infty$ 有 $S \geq \frac{e}{e-1}$, 从而所求极限为 $\frac{e}{e-1}$.

□

2.2.4 利用 Taylor 公式计算和式极限 (和式内部 n,k 不同阶)

只有当和式内部 n, k 不同阶时, 我们才可以直接利用 Taylor 展开进行计算. 但是书写过程不能用 Taylor 展开书写 (关于 o 和 O 余项的求和估计不好说明), 这样书写不严谨 (见例题 2.37 证法一).

我们可以采用拟合法 (见例题 2.38)、夹逼准则 (见例题 2.39)、 $\varepsilon - \delta$ 语言 (见例题 2.37 证法二) 严谨地书写过程

 **笔记** 虽然这三种方法都比较通用, 但是更推荐拟合法和夹逼准则, 一般比较简便.

虽然 $\varepsilon - \delta$ 语言书写起来比较繁琐, 但是当有些和式不容易放缩、拟合的时候, 用这个方法更简单.

这类和式内部 n, k 不同阶的问题的处理方式: 先利用 Taylor 展开计算极限 (可以先不算出极限), 并判断到底要展开多少项, 然后根据具体问题综合运用拟合法、夹逼准则、 $\varepsilon - \delta$ 语言严谨地书写过程 (怎么书写简便就怎么写).

注 这类和式内部 n, k 不同阶的问题, Taylor 公式是本质, 拟合法、夹逼准则、 $\varepsilon - \delta$ 语言只是形式上的过程.

例题 2.37 设 f 在 0 处可微, $f(0) = 0$, 证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n^2}\right) = \frac{f'(0)}{2}.$$

 **笔记** 本题如果使用例题 2.35 的方法求极限, 那么我们将得到

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n^2}\right) = \lim_{N \rightarrow \infty} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N f\left(\frac{i}{n^2}\right) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \lim_{n \rightarrow \infty} f\left(\frac{i}{n^2}\right) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N f(0) = \lim_{N \rightarrow \infty} (N \cdot 0) = +\infty \cdot 0.$$

而 $+\infty \cdot 0$ 我们是无法确定其结果的, 故本题并不适用这种方法. 不过, 我们也从上述论述结果发现我们需要更加精细地估计原级数的阶, 才能确定出上述 “ $+\infty \cdot 0$ ” 的值, 进而得到原级数的极限. 因此我们使用 Taylor 展开并引入余项方法和 $\varepsilon - \delta$ 方法更加精细地估计原级数的阶.

注 虽然使用余项证明这类问题并不严谨, 但是在实际解题中, 我们仍使用这种余项方法解决这类问题. 因为严谨的 $\varepsilon - \delta$ 语言证明比较繁琐. 我们只在需要书写严谨证明的时候才使用严谨的 $\varepsilon - \delta$ 语言进行证明.

证明 证法一 (不严谨的余项方法)(用大 O 估计就可以严谨化): 由 f 在 0 处可微且 $f(0) = 0$ 和带 Peano 余项的 Taylor 公式, 可知

$$f(x) = f'(0)x + o(x), x \rightarrow 0.$$

于是

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n^2}\right) &= \sum_{i=1}^n \left[f'(0) \cdot \frac{i}{n^2} + o\left(\frac{i}{n^2}\right) \right] = \frac{f'(0)(n+1)}{2n} + \sum_{i=1}^n o\left(\frac{i}{n^2}\right) \\ &= \frac{f'(0)(n+1)}{2n} + \sum_{i=1}^n o\left(\frac{1}{n}\right) = \frac{f'(0)(n+1)}{2n} + n \cdot o\left(\frac{1}{n}\right) \rightarrow \frac{f'(0)}{2}, n \rightarrow +\infty. \end{aligned}$$

证法二 ($\varepsilon - \delta$ 严谨的证明): 由 Taylor 定理, 可知对 $\forall \varepsilon \in (0, 1), \exists \delta > 0$, 当 $|x| \leq \delta$ 时, 有 $|f(x) - f'(0)x| \leq \varepsilon|x|$.

只要 $n > \frac{1}{\delta}$, 有 $\left|\frac{i}{n^2}\right| \leq \delta, \forall i = 1, 2, \dots, n$, 故 $\left|f\left(\frac{i}{n^2}\right) - f'(0)\frac{i}{n^2}\right| \leq \varepsilon \frac{i}{n^2}, i = 1, 2, \dots, n$.

从而

$$f'(0)(1 - \varepsilon) \frac{i}{n^2} \leq f\left(\frac{i}{n^2}\right) \leq f'(0)(1 + \varepsilon) \frac{i}{n^2}.$$

进而

$$\frac{f'(0)}{2}(1 - \varepsilon) \cdot \frac{n+1}{n} = f'(0)(1 - \varepsilon) \sum_{i=1}^n \frac{i}{n^2} \leq \sum_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n^2}\right) \leq f'(0)(1 + \varepsilon) \sum_{i=1}^n \frac{i}{n^2} = \frac{f'(0)}{2}(1 + \varepsilon) \cdot \frac{n+1}{n}.$$

于是

$$-\frac{\varepsilon f'(0)}{2} \leq \frac{n}{n+1} \sum_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n^2}\right) - \frac{f'(0)}{2} \leq \frac{f'(0)\varepsilon}{2}.$$

即

$$\left| \frac{n}{n+1} \sum_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n^2}\right) - \frac{f'(0)}{2} \right| \leq \frac{|f'(0)|}{2} \varepsilon.$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+1} \sum_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n^2}\right) = \frac{f'(0)}{2}$, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n^2}\right) = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+1} \sum_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n^2}\right)}{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+1}} = \frac{f'(0)}{2}$. □

例题 2.38 求极限: $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \left(1 - \sum_{k=1}^n \frac{1}{n + \sqrt{k}} \right)$.

笔记 本题采用拟合法书写过程.

实际上, n, k 不同阶直接 Taylor 展开即可.

解 由于对 $\forall k \in \mathbb{N}$, 都有 $\frac{\sqrt{k}}{n} \rightarrow +\infty$, $n \rightarrow \infty$, 故由 Taylor 定理可得, 对 $\forall k \in \mathbb{N}$, 都有

$$\frac{1}{n + \sqrt{k}} = \frac{1}{n} \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{k}}{n}} = \frac{1}{n} \left(1 - \frac{\sqrt{k}}{n} + \frac{k}{n^2} + \dots \right), n \rightarrow \infty.$$

于是考虑拟合

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \left(1 - \sum_{k=1}^n \frac{1}{n + \sqrt{k}} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(1 - \frac{\sqrt{k}}{n} \right) - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{1 + \frac{\sqrt{k}}{n}} - 1 + \frac{\sqrt{k}}{n} \right) \right).$$

又由于

$$\frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{1 + \frac{\sqrt{k}}{n}} - 1 + \frac{\sqrt{k}}{n} \right) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=1}^n \frac{k}{n^2} \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{k}}{n}} \leq \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=1}^n \frac{k}{n^2} \leq \frac{1}{\sqrt{n}} \rightarrow 0.$$

因此

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \left(1 - \sum_{k=1}^n \frac{1}{n + \sqrt{k}} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(1 - \frac{\sqrt{k}}{n} \right) \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \sqrt{k}}{n \sqrt{n}} \xrightarrow{\text{Stolz 公式或定积分定义}} \frac{2}{3}. □$$

例题 2.39 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \left(\sqrt{1 + \frac{k}{n^2}} - 1 \right)$.

笔记 本题采用夹逼准则书写过程. 注意 n, k 不同阶, 因此有理化然后直接把无穷小量放缩掉, 然后使用夹逼准则即可.

实际上, n, k 不同阶直接 Taylor 展开即可.

证明 注意到

$$\frac{\frac{k}{n^2}}{\sqrt{1 + \frac{1}{n}} + 1} \leq \sqrt{1 + \frac{k}{n^2}} - 1 = \frac{\frac{k}{n^2}}{\sqrt{1 + \frac{k}{n^2}} + 1} \leq \frac{k}{2n^2}, \forall k \in \mathbb{N}.$$

所以

$$\frac{n+1}{2n \left(\sqrt{1 + \frac{1}{n}} + 1 \right)} = \sum_{k=1}^n \frac{\frac{k}{n^2}}{\sqrt{1 + \frac{1}{n}} + 1} \leq \sum_{k=1}^n \left(\sqrt{1 + \frac{k}{n^2}} - 1 \right) \leq \sum_{k=1}^n \frac{k}{2n^2} = \frac{n+1}{4n}$$

根据夹逼准则可知所求极限是 $\frac{1}{4}$. □

例题 2.40 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{n^2 + k}} \right)^n$.

笔记 证法二综合运用了拟合法和夹逼准则书写过程(只用其中一种方法的话, 书写起来很麻烦).

解 证法一(余项方法): 注意到

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{n^2+k}} \right)^n = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{n \ln \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{n^2+k}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{n \ln \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{n} \frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n^2}}} \right)}.$$

由带 Peano 余项的 Taylor 公式, 可知

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{n^2+k}} &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n^2}}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left[1 - \frac{k}{2n^2} + O\left(\frac{k^2}{n^4}\right) \right] = \frac{1}{n} \left[n - \frac{\sum_{k=1}^n k}{2n^2} + \sum_{k=1}^n O\left(\frac{1}{n^2}\right) \right] \\ &= 1 - \frac{n+1}{4n^2} + O\left(\frac{1}{n^2}\right) = 1 - \frac{1}{4n} - \frac{1}{4n^2} + O\left(\frac{1}{n^2}\right) = 1 - \frac{1}{4n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right), n \rightarrow +\infty. \end{aligned}$$

从而

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{n^2+k}} \right)^n = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{n \ln \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{n} \frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n^2}}} \right)} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{n \ln \left(1 - \frac{1}{4n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right) \right)} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{n \cdot \left(-\frac{1}{4n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right) \right)} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{-\frac{1}{4} + O\left(\frac{1}{n}\right)} = e^{-\frac{1}{4}}.$$

证法二(拟合 + 迫敛性): 注意到

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{n^2+k}} \right)^n = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{n \ln \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{n^2+k}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{n \ln \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n^2}}} \right)}. \quad (2.25)$$

因为对 $\forall k \in \mathbb{N}$, 有 $\frac{k}{n^2} \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$, 所以利用 Taylor 公式可得

$$\frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n^2}}} = 1 - \frac{k}{2n^2} + \dots, n \rightarrow \infty.$$

从而考虑拟合

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n^2}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n^2}}} - 1 + \frac{k}{2n^2} \right) + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(1 - \frac{k}{2n^2} \right) \right].$$

由于

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n^2}}} - 1 + \frac{k}{2n^2} \right) = \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{\sqrt{n^2+k}} + \frac{k}{2n^3} \right) - 1 \leq \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{n} + \frac{k}{2n^3} \right) - 1 = \frac{n+1}{4n^2} \rightarrow 0, n \rightarrow \infty.$$

因此

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{n^2+k}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n^2}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(1 - \frac{k}{2n^2} \right) = 1 - \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{k}{2n^3} = 1.$$

于是

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} n \ln \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{n^2+k}} &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{n^2+k}} - 1 \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n^2}}} - 1 \right) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{\sqrt{1+\frac{k}{n^2}}} - 1 \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \left(\frac{n}{\sqrt{n^2+k}} - 1 \right) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{n - \sqrt{n^2+k}}{\sqrt{n^2+k}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{-k}{\sqrt{n^2+k} (n + \sqrt{n^2+k})} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{-k}{n^2 + k + n\sqrt{n^2+k}}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

注意到

$$-\frac{n+1}{2(n+1+\sqrt{n^2+n})} = \sum_{k=1}^n \frac{-k}{n^2+n+n\sqrt{n^2+n}} \leq \sum_{k=1}^n \frac{-k}{n^2+k+n\sqrt{n^2+k}} \leq \sum_{k=1}^n \frac{-k}{2n^2} = -\frac{n+1}{4n}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

令 $n \rightarrow \infty$, 则由夹逼准则可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{-k}{n^2+k+n\sqrt{n^2+k}} = -\frac{1}{4}$. 再结合(2.25)(2.26)式可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{n^2+k}} \right)^n = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{n \ln \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{n^2+k}}} = e^{\lim_{n \rightarrow \infty} n \ln \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{n^2+k}}} = e^{\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{-k}{n^2+k+n\sqrt{n^2+k}}} = e^{-\frac{1}{4}}.$$

□

2.2.5 分段估计 (Toeplitz 定理)

对于估计级数或积分的极限或阶的问题, 当问题难以直接处理时, 我们可以尝试分段估计, 分段点的选取可以直接根据级数或积分的性质选取, 也可以根据我们的需要待定分段点 m , 然后再选取满足我们需要的 m 作为分段点.

定理 2.3 (Toeplitz 定理)

(a): 设 $\{t_{nk}\}_{1 \leq k \leq n} \subset [0, +\infty)$ 满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n t_{nk} = 1$ 和 $\lim_{n \rightarrow \infty} t_{nk} = 0$. 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \in \mathbb{R}$. 证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n t_{nk} a_k = a. \quad (2.27)$$

(b): 设 $\{t_{nk}\}_{n,k=1}^{\infty} \subset [0, +\infty)$ 满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{\infty} t_{nk} = 1$ 和 $\lim_{n \rightarrow \infty} t_{nk} = 0$. 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \in \mathbb{R}$. 证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{\infty} t_{nk} a_k = a. \quad (2.28)$$

♡

 **笔记** 无需记忆 Toeplitz 定理的叙述, 其证明的思想更为重要. 一句话证明 Toeplitz 定理, 即当 n 比较小的时候, 用 t_{nk} 趋于 0 来控制, 当 n 比较大的时候, 用 a_n 趋于 a 来控制.

我们需要熟悉蕴含在 Toeplitz 定理当中的一个关键想法: **分段估计** (分段的方式要合理才行).

Toeplitz 定理只是先对和式进行分段处理, 将和式分成两部分, 一部分是和式的前充分多项 (前有限项/前 N 项), 另一部分是余项 (从 $N+1$ 项开始包括后面的所有项). 然后在这种分段估计的基础上, 利用已知的极限条件, 分别控制 (放缩) 和式的前充分多项 (前有限项/前 N 项) 和余项 (从 $N+1$ 项开始包括后面的所有项).

注 注意区分 (a),(b) 两者的条件: $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^{\infty} t_{nk} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \lim_{m \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^m t_{nk} \neq \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n t_{nk}$.

证明 (a): 事实上, 不妨设 $a = 0$, 否则用 $a_n - a$ 代替 a_n 即可.

对 $\forall N \in \mathbb{N}$, 当 $n > N$ 时, 我们有

$$\left| \sum_{k=1}^n t_{nk} a_k \right| = \left| \sum_{k=1}^N t_{nk} a_k + \sum_{k=N+1}^n t_{nk} a_k \right| \leq \left| \sum_{k=1}^N t_{nk} a_k \right| + \sum_{k=N+1}^n |t_{nk} a_k|.$$

令 $n \rightarrow +\infty$, 得到

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \left| \sum_{k=1}^n t_{nk} a_k \right| \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \left| \sum_{k=1}^N t_{nk} a_k \right| + \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=N+1}^n |t_{nk} a_k| \leq \sup_{k \geq N+1} |a_k| \cdot \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n t_{nk} = \sup_{k \geq N+1} |a_k|, \forall N \in \mathbb{N}.$$

由 N 的任意性, 再令 $N \rightarrow +\infty$, 可得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \left| \sum_{k=1}^n t_{nk} a_k \right| \leq \lim_{N \rightarrow +\infty} \sup_{k \geq N+1} |a_k| = \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} |a_n| = \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = 0.$$

故(2.27)式成立.

(b): 事实上, 不妨设 $a = 0$, 否则用 $a_n - a$ 代替 a_n 即可.

对 $\forall N \in \mathbb{N}$, 我们有

$$\left| \sum_{k=1}^{\infty} t_{nk} a_k \right| = \left| \sum_{k=1}^N t_{nk} a_k + \sum_{k=N+1}^{\infty} t_{nk} a_k \right| \leq \left| \sum_{k=1}^N t_{nk} a_k \right| + \sum_{k=N+1}^{\infty} |t_{nk} a_k|.$$

令 $n \rightarrow +\infty$, 得到

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \left| \sum_{k=1}^{\infty} t_{nk} a_k \right| \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \left| \sum_{k=1}^N t_{nk} a_k \right| + \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=N+1}^{\infty} |t_{nk} a_k| \leq \sup_{k \geq N+1} |a_k| \cdot \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^{\infty} t_{nk} = \sup_{k \geq N+1} |a_k|, \forall N \in \mathbb{N}.$$

由 N 的任意性, 再令 $N \rightarrow +\infty$, 可得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \left| \sum_{k=1}^{\infty} t_{nk} a_k \right| \leq \lim_{N \rightarrow +\infty} \sup_{k \geq N+1} |a_k| = \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} |a_n| = \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = 0.$$

故(2.28)式成立. □

例题 2.41 设 $p_k > 0, k = 1, 2, \dots, n$ 且

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{p_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = 0, \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a.$$

证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{p_n a_1 + \dots + p_1 a_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = a.$$

笔记 理解到本质之后不需要记忆Toeplitz 定理, 但是这里可以直接套用 Toeplitz 定理我们就引用了. 今后我们不再直接套用 Toeplitz 定理, 而是利用 Toeplitz 定理的证明方法解决问题.

证明 记 $t_{nk} = \frac{p_{n-k+1}}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} \geq 0, k = 1, 2, \dots, n$. 则 $\sum_{k=1}^n t_{nk} = \frac{\sum_{k=1}^n p_{n-k+1}}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = 1$. 又因为

$$0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} t_{nk} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{p_{n-k+1}}{p_1 + p_2 + \dots + p_{n-k+1}} = 0.$$

所以由夹逼准则可知, $\lim_{n \rightarrow \infty} t_{nk} = 0$. 故由Toeplitz 定理得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{p_n a_1 + \dots + p_1 a_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n t_{nk} a_k = a.$$

□

命题 2.6

设 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ 且 $b_n \geq 0$. 记 $S_n = \sum_{k=1}^n b_k$, 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = S$. 证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n b_1 + a_{n-1} b_2 + \dots + a_1 b_n) = aS.$$

◆

证明 (i) 若 $S = 0$, 则 $b_n \equiv 0$. 此时结论显然成立.

(ii) 若 $S > 0$, 则令 $t_{nk} = \frac{1}{S} b_{n-k+1}, k = 1, 2, \dots, n$. 从而

$$\sum_{k=1}^{\infty} t_{nk} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n t_{nk} = \frac{1}{S} \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n b_{n-k+1} = \frac{1}{S} \lim_{n \rightarrow +\infty} S_n = 1.$$

又因为 $\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n$ 存在, 所以 $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} (S_n - S_{n-1}) = 0$. 故 $\lim_{n \rightarrow +\infty} t_{nk} = 0$. 于是

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n b_1 + a_{n-1} b_2 + \dots + a_1 b_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n a_k b_{n-k+1} = S \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n a_k t_{nk}.$$

不妨设 $a = 0$, 则对 $\forall N \in \mathbb{N}$, 当 $n > N$ 时, 有

$$0 \leq \left| \sum_{k=1}^n a_k t_{nk} \right| \leq \left| \sum_{k=1}^N a_k t_{nk} \right| + \left| \sum_{k=N+1}^n a_k t_{nk} \right| \leq \left| \sum_{k=1}^N a_k t_{nk} \right| + \sup_{k \geq N+1} |a_k| \sum_{k=N+1}^n t_{nk} \leq \left| \sum_{k=1}^N a_k t_{nk} \right| + \sup_{k \geq N+1} |a_k| \sum_{k=1}^n t_{nk}.$$

令 $n \rightarrow +\infty$, 则

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \left| \sum_{k=1}^n a_k t_{nk} \right| \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\sup_{k \geq N+1} |a_k| \sum_{k=1}^n t_{nk} \right) = \sup_{k \geq N+1} |a_k|, \forall N \in \mathbb{N}.$$

再令 $N \rightarrow +\infty$, 可得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \left| \sum_{k=1}^n a_k t_{nk} \right| \leq \lim_{N \rightarrow +\infty} \sup_{k \geq N+1} |a_k| = \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} |a_k| = \lim_{n \rightarrow +\infty} |a_k| = \lim_{n \rightarrow +\infty} a_k = 0.$$

于是 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n a_k t_{nk} = a$. 故 $\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n b_1 + a_{n-1} b_2 + \cdots + a_1 b_n) = S \cdot \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n a_k t_{nk} = aS$.

□

例题 2.42 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} y_n = 0$. 且存在常数 $K > 0$, 使得 $\sum_{j=0}^n |y_j| \leq K, \forall n \in \mathbb{N}$, 证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n x_i y_{n-i} = 0.$$

证明 对 $\forall N \in \mathbb{N}$, 当 $n > N$ 时, 有

$$\left| \sum_{i=1}^n x_i y_{n-i} \right| \leq \left| \sum_{i=1}^N x_i y_{n-i} \right| + \left| \sum_{i=N+1}^n x_i y_{n-i} \right| \leq \left| \sum_{i=1}^N x_i y_{n-i} \right| + \sup_{i \geq N+1} |x_i| \cdot \sum_{i=N+1}^n |y_{n-i}| \leq \left| \sum_{i=1}^N x_i y_{n-i} \right| + K \cdot \sup_{i \geq N+1} |x_i|.$$

令 $n \rightarrow +\infty$, 则 $\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \left| \sum_{i=1}^n x_i y_{n-i} \right| \leq K \cdot \sup_{i \geq N+1} |x_i|$.

由 N 任意性得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n x_i y_{n-i} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sup_{i \geq N+1} |x_i| = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} |x_n| = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0.$$

□

命题 2.7

设 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a, \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$, 证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_1 b_n + a_2 b_{n-1} + \cdots + a_n b_1}{n} = ab.$$

◆

笔记 可以不妨设 $a = b = 0$ 的原因: 假设当 $a = b = 0$ 时, 结论成立. 则当 a, b 至少有一个不为零时, 我们有 $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - a) = 0, \lim_{n \rightarrow \infty} (b_n - b) = 0$. 从而由假设可知

$$\begin{aligned} & \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n (a_k - a)(b_{n-k+1} - b)}{n} = 0. \\ & \Leftrightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n a_k b_{n-k+1}}{n} + ab - a \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n b_{n-k+1}}{n} - b \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n a_k}{n} = 0 \end{aligned}$$

又由 Stolz 定理可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n a_k}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a, \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n b_{n-k+1}}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b.$$

$$\text{故 } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n a_k b_{n-k+1}}{n} = a \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n b_{n-k+1}}{n} + b \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n a_k}{n} - ab = ab.$$

证明 不妨设 $a = b = 0$, 否则用 $a_n - a$ 代替 a_n , 用 $b_n - b$ 代替 b_n . 对 $\forall N \in \mathbb{N}$, 当 $n > N$ 时, 有

$$\begin{aligned} \left| \frac{\sum_{k=1}^n a_k b_{n-k+1}}{n} \right| &\leq \frac{\left| \sum_{k=1}^N a_k b_{n-k+1} \right|}{n} + \frac{\left| \sum_{k=N+1}^n a_k b_{n-k+1} \right|}{n} \\ &\leq \frac{1}{n} \left| \sum_{k=1}^N a_k b_{n-k+1} \right| + \sup_{k \geq N+1} |a_k| \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=N+1}^n |b_{n-k+1}| \\ &\leq \frac{1}{n} \left| \sum_{k=1}^N a_k b_{n-k+1} \right| + \sup_{k \geq N+1} |a_k| \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |b_k|. \end{aligned}$$

令 $n \rightarrow +\infty$, 则

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k b_{n-k+1} \right| \leq \sup_{k \geq N+1} |a_k| \cdot \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n |b_k|}{n} \leq \sup_{k \geq N+1} |a_k| \cdot \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} b_n = 0.$$

故 $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k b_{n-k+1} = 0$.

□

例题 2.43 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n}$.

注 取 $m = [\sqrt{n \ln n}] + 1$ 的原因: 我们希望找到一个合适的分段点 m , 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=m}^n \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} = 1$, $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=2}^m \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} = 0$. 由

$\sum_{k=2}^m \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} \leq \frac{(m-1)\sqrt{n}}{n} = \frac{(m-1)}{\sqrt{n}}$ 可知, 我们可以希望 $\frac{(m-1)}{\sqrt{n}} \rightarrow 0$, 即 $m = o(\sqrt{n})$. 又由上述证明的积分放缩可知, $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=2}^m \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\frac{1}{m}}}{n} (n - m + 1) = \lim_{n \rightarrow \infty} n^{\frac{1}{m}}$, 从而我们希望 $\lim_{n \rightarrow \infty} n^{\frac{1}{m}} = 1$, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} n^{\frac{1}{m}} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\ln n}{m}} = 1$, 也即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{m} = 0$.

综上, 我们希望当 $n \rightarrow \infty$ 时, m 的阶比 \sqrt{n} 低但比 $\ln n$ 高, 于是我们考虑 $\ln n$ 和 \sqrt{n} 的几何平均, 即令 $m = \sqrt{\sqrt{n} \ln n}$, 恰好满足需要. 又由于 m 表示求和项数, 因此取整保证严谨性.

笔记 本题核心想法是: **分段估计**. 分段后的估计方式和分段点的选取方法较多.(清疏讲义上有另一种分段估计的做法)

注意: 本题使用 Stolz 定理解决不了, 直接放缩也不行.

证明 取 $m = [\sqrt{\sqrt{n} \ln n}] + 1$, 考虑 $\sum_{k=1}^n \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} = 1 + \sum_{k=2}^m \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} + \sum_{k=m}^n \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n}$. 不难发现

$$\frac{m}{n} \leq \frac{\sqrt{\sqrt{n} \ln n}}{n} \rightarrow 0, n \rightarrow \infty.$$

$$\sum_{k=2}^m \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} \leq \frac{(m-1)\sqrt{n}}{n} \leq \frac{\sqrt{\sqrt{n} \ln n}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\ln n}{\sqrt{n}}} \rightarrow 0, n \rightarrow \infty.$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=2}^m \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} = 0$. 并且一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \sum_{k=m}^n \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} &= \frac{1}{n} \sum_{k=m}^n \int_{k-1}^k n^{\frac{1}{k}} dx \leq \frac{1}{n} \sum_{k=m}^n \int_{k-1}^k n^{\frac{1}{x}} dx = \frac{1}{n} \int_{m-1}^n n^{\frac{1}{x}} dx \\ &= \frac{1}{n} \int_{\frac{1}{n}}^{\frac{1}{m-1}} \frac{n^x}{x^2} dx \leq \frac{n^{\frac{1}{m-1}}}{n} \int_{\frac{1}{n}}^{\frac{1}{m-1}} \frac{1}{x^2} dx = \frac{n^{\frac{1}{m-1}}}{n} (n - m + 1). \end{aligned}$$

另一方面, 我们有

$$\begin{aligned}\sum_{k=m}^n \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} &= \frac{1}{n} \sum_{k=m}^n \int_k^{k+1} n^{\frac{1}{k}} dx \geq \frac{1}{n} \sum_{k=m}^n \int_k^{k+1} n^{\frac{1}{x}} dx = \frac{1}{n} \int_m^{n+1} n^{\frac{1}{x}} dx \\ &= \frac{1}{n} \int_{\frac{1}{n+1}}^{\frac{1}{m}} \frac{n^x}{x^2} dx \geq \frac{n^{\frac{1}{n+1}}}{n} \int_{\frac{1}{n+1}}^{\frac{1}{m}} \frac{1}{x^2} dx = \frac{n^{\frac{1}{n+1}}}{n} (n - m + 1).\end{aligned}$$

又注意到

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} n^{\frac{1}{m-1}} &= \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\ln n}{\sqrt{\ln n} \ln n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{1}{\sqrt{\ln n}}} = 1, \\ \lim_{n \rightarrow \infty} n^{\frac{1}{n+1}} &= \lim_{n \rightarrow \infty} e^{-n \ln(n+1)} = 1.\end{aligned}$$

故

$$1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\frac{1}{n+1}}}{n} (n - m + 1) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=m}^n \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=m}^n \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\frac{1}{m-1}}}{n} (n - m + 1) = 1.$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=m}^n \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} = 1$. 于是 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \sum_{k=2}^m \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} + \sum_{k=m}^n \frac{n^{\frac{1}{k}}}{n} \right) = 1 + 0 + 1 = 2$.

□

例题 2.44 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$, 证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k x_k = x.$$

 **笔记** 可以不妨设 $x = 0$ 的原因: 假设当 $x = 0$ 时, 结论成立, 则当 $x \neq 0$ 时, 令 $y_n = x_n - x$, 则 $\lim_{n \rightarrow +\infty} y_n = 0$. 从而由假设可知

$$0 = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k y_k = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k (x_k - x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k x_k - x \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k x_k - x.$$

于是 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k x_k = x$.

证明 不妨设 $x = 0$, 则对 $\forall N > 0$, 当 $n > N$ 时, 我们有

$$\begin{aligned}0 &\leq \left| \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k x_k \right| = \left| \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^N C_n^k x_k \right| + \left| \frac{1}{2^n} \sum_{k=N+1}^n C_n^k x_k \right| \\ &\leq \left| \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^N C_n^k x_k \right| + \frac{1}{2^n} \sum_{k=N+1}^n C_n^k \sup_{k \geq N+1} |x_k| \leq \left| \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^N C_n^k x_k \right| + \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k \sup_{k \geq N+1} |x_k| \\ &= \left| \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^N C_n^k x_k \right| + \sup_{k \geq N+1} |x_k|\end{aligned}$$

上式两边同时令 $n \rightarrow +\infty$, 则结合 $\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \left| \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^N C_n^k x_k \right| \xrightarrow{\text{因为分子是关于n的多项式}} 0$, 可得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \left| \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k x_k \right| \leq \sup_{k \geq N+1} |x_k|, \forall N > 0.$$

由 N 的任意性, 上式两边令 $N \rightarrow +\infty$, 则

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \left| \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k x_k \right| \leq \overline{\lim}_{N \rightarrow +\infty} \sup_{k \geq N+1} |x_k|.$$

又根据上极限的定义, 可知 $\lim_{N \rightarrow +\infty} \sup_{k \geq N+1} |x_k| = \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} |x_n| = \lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = 0$.

从而

$$0 \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \left| \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k x_k \right| \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \left| \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k x_k \right| \leq 0.$$

故 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k x_k = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left| \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k x_k \right| = 0$. 原命题得证. □

例题 2.45 设 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n}{n^2} = a$, $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{b_n}{n^2} = b$. 证明极限 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n^5} \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k}$ 存在并求其值.

证明 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n^2} = a$, $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n}{n^2} = b$ 知, 对 $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $N > 0$, 使得 $\forall n > N$, 有

$$(a - \varepsilon)n^2 \leq a_n \leq (a + \varepsilon)n^2, \quad (b - \varepsilon)n^2 \leq b_n \leq (b + \varepsilon)n^2.$$

于是当 $n > 3N$ 时, 有

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{k=0}^n a_k b_{n-k}}{n^5} &= \frac{\sum_{k=0}^N a_k b_{n-k} + \sum_{k=N+1}^n a_k b_{n-k}}{n^5} \leq \frac{(b + \varepsilon) \sum_{k=0}^N (n-k)^2 a_k + (a + \varepsilon) \sum_{k=N+1}^n k^2 b_{n-k}}{n^5} \\ &= \frac{(b + \varepsilon) \sum_{k=0}^N (n-k)^2 a_k + (a + \varepsilon) \sum_{k=0}^{n-N-1} (n-k)^2 b_k}{n^5}. \end{aligned}$$

另一方面, 同理可得

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{k=0}^n a_k b_{n-k}}{n^5} &= \frac{\sum_{k=0}^N a_k b_{n-k} + \sum_{k=N+1}^n a_k b_{n-k}}{n^5} \geq \frac{(b - \varepsilon) \sum_{k=0}^N (n-k)^2 a_k + (a - \varepsilon) \sum_{k=N+1}^n k^2 b_{n-k}}{n^5} \\ &= \frac{(b - \varepsilon) \sum_{k=0}^N (n-k)^2 a_k + (a - \varepsilon) \sum_{k=0}^{n-N-1} (n-k)^2 b_k}{n^5}. \end{aligned}$$

又因为对 $\forall n > 3N$, 有

$$\begin{aligned} \frac{(a + \varepsilon) \sum_{k=0}^{n-N-1} (n-k)^2 b_k}{n^5} &= \frac{(a + \varepsilon) \left(\sum_{k=0}^N (n-k)^2 b_k + \sum_{k=N+1}^{n-N-1} (n-k)^2 b_k \right)}{n^5}, \\ \frac{(a - \varepsilon) \sum_{k=0}^{n-N-1} (n-k)^2 b_k}{n^5} &= \frac{(a - \varepsilon) \left(\sum_{k=0}^N (n-k)^2 b_k + \sum_{k=N+1}^{n-N-1} (n-k)^2 b_k \right)}{n^5}. \end{aligned}$$

并且

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=0}^N (n-k)^2 a_k}{n^5} = 0, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=0}^N (n-k)^2 b_k}{n^5} = 0.$$

所以存在 $N_1 > 3N$, 使得 $\forall n > N_1$, 有

$$\frac{\sum_{k=0}^n a_k b_{n-k}}{n^5} \leq \varepsilon + \frac{(a + \varepsilon)(b + \varepsilon) \sum_{k=N+1}^{n-N-1} (n-k)^2 k^2}{n^5},$$

$$\frac{\sum_{k=0}^n a_k b_{n-k}}{n^5} \geq -\varepsilon + \frac{(a - \varepsilon)(b - \varepsilon) \sum_{k=N+1}^{n-N-1} (n-k)^2 k^2}{n^5}.$$

故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{\sum_{k=0}^n a_k b_{n-k}}{n^5} - \frac{ab \sum_{k=N+1}^{n-N-1} (n-k)^2 k^2}{n^5} \right] = 0.$$

注意到

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=N+1}^{n-N-1} (n-k)^2 k^2}{n^5} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n-2N-2}{n} \cdot \frac{1}{n-2N-2} \sum_{k=N+1}^{n-N-1} \left(1 - \frac{k}{n}\right)^2 \left(\frac{k}{n}\right)^2 = \int_0^1 (1-x)^2 x^2 dx = \frac{1}{30},$$

故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=0}^n a_k b_{n-k}}{n^5} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{\sum_{k=0}^n a_k b_{n-k}}{n^5} - \frac{ab \sum_{k=N+1}^{n-N-1} (n-k)^2 k^2}{n^5} \right] + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{ab \sum_{k=N+1}^{n-N-1} (n-k)^2 k^2}{n^5} = \frac{ab}{30}.$$

□

2.2.6 Euler-Maclaurin 公式 (E-M 公式)

定理 2.4 (0 阶 Euler-Maclaurin 公式)

设 $a, b \in \mathbb{Z}$, $f \in D[a, b]$, $f' \in L^1[a, b]$, 让我们有

$$\sum_{k=a}^b f(k) = \int_a^b f(x) dx + \frac{f(a) + f(b)}{2} + \int_a^b \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) f'(x) dx.$$

♡

注 如果考试中要使用 0 阶欧拉麦克劳林公式, 则一定要先证明 0 阶欧拉麦克劳林公式 (按照下面的证明书写即可), 再使用.

E-M 公式求和通项与求和号上限无关.

笔记 在 $[0, 1)$ 上 $x - [x] - \frac{1}{2} = x - \frac{1}{2}$, 它也是 $x - \frac{1}{2}$ 做周期 1 延拓得到的函数. 故 $-\frac{1}{2} \leq x - [x] - \frac{1}{2} \leq \frac{1}{2}$, $\forall x \in \mathbb{R}$.

证明

$$\begin{aligned} \int_a^b \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) f'(x) dx &= \sum_{k=a}^{b-1} \int_k^{k+1} \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) f'(x) dx \\ &= \sum_{k=a}^{b-1} \int_k^{k+1} \left(x - k - \frac{1}{2}\right) f'(x) dx = \sum_{k=a}^{b-1} \int_0^1 \left(x - \frac{1}{2}\right) f'(x+k) dx \\ &= \sum_{k=a}^{b-1} \left[\frac{1}{2} f(1+k) + \frac{1}{2} f(k) - \int_0^1 f(x+k) dx \right] \\ &= \sum_{k=a}^{b-1} \left[\frac{f(k) + f(k+1)}{2} - \int_k^{k+1} f(x) dx \right] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{k=a}^{b-1} [f(k) + f(k+1)] - \int_a^b f(x) dx \\ &= -\frac{f(a) + f(b)}{2} + \sum_{k=a}^b f(k) - \int_a^b f(x) dx. \end{aligned}$$

□

注 假设已知 $f'(x)$ 在 \mathbb{R} 上连续, 记 $b_1(x) = x - [x] - \frac{1}{2}$, 使用 0 阶 E-M 公式后, 由于 $-\frac{1}{2} \leq x - [x] - \frac{1}{2} \leq \frac{1}{2}$, $\forall x \in \mathbb{R}$, 因此直接将 $b_1(x)$ 放大成 $\frac{1}{2}$ 就可以得到原级数的一个较为粗略的估计. 具体例题见例题 2.46.

但是如果我们想要得到原级数更加精确的估计, 就需要对 $b_1(x)$ 使用分部积分. 但是由于 b_1 并非连续函数, 为了把 $\int_a^b (x - [x] - \frac{1}{2}) f'(x) dx$ 继续分部积分, 我们需要寻求 b_1 的原函数 b_2 使得

$$\int_a^b b_1(x) f'(x) dx = \int_a^b f'(x) db_2(x),$$

即期望 $b_2(x)$ 是 $b_1(x)$ 的一个原函数并且仍然有周期 1(因为求导不改变周期性, 又由于 $b_1(x)$ 周期为 1, 故原函数 $b_2(x)$ 的周期也必须为 1). 相当于需要

$$b_2(x) = \int_0^x b_1(y) dy, b_2(x+1) = b_2(x), \forall x \in \mathbb{R}.$$

(构造 $b_2(x)$ 的想法: 先找到 $x \in [0, 1]$ 这个特殊情况下的 $b_2(x)$, 再由此构造出 $x \in \mathbb{R}$ 这个一般情况下的 $b_2(x)$, 即由特殊推广到一般)

先考虑 $x \in [0, 1]$ 的情况(因为此时 $[x] \equiv 0$, 方便后续计算得到原函数 $b_2(x)$), 于是就需要 $\int_0^1 b_1(x) dx = b_2(1) = b_2(0) = 0$. 显然

$$b_2(1) = \int_0^1 b_1(x) dx = \int_0^1 \left(x - \frac{1}{2}\right) dx = 0 = b_2(0)$$

是自带条件. 并且还需要 $b_2(x) = \int_0^x b_1(y) dy = \int_0^x \left(y - \frac{1}{2}\right) dy = \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{2}x + c$ (其中 c 为任意常数), $x \in [0, 1]$. 又因为我们需要 $b_2(x)$ 在 \mathbb{R} 上连续且周期为 1, 所以再将 $\frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{2}x + c$ 做周期 1 延拓到 \mathbb{R} 上, 得到在 \mathbb{R} 上连续且周期为 1 的 $b_2(x)$ (易知此时 $b_2(x)$ 在 \mathbb{R} 上只有至多可数个不可导点). 由此我们可以得到 $b_2(x)$ 在 \mathbb{R} 上的表达式为

$$b_2(x) = b_2(x - [x]) = \int_0^{x-[x]} b_1(y) dy = \int_0^{x-[x]} \left(y - \frac{1}{2}\right) dy = \frac{1}{2}(x - [x])^2 - \frac{1}{2}(x - [x]) + c, \forall x \in \mathbb{R}.$$

此时又由 $\int_0^1 b_1(y) dy = 0$ 可得

$$\begin{aligned} b_2(x) &= b_2(x - [x]) = \int_0^{x-[x]} b_1(y) dy = \int_{[x]}^x b_1(y - [x]) dy = \int_{[x]}^x b_1(y) dy \\ &= \sum_{k=0}^{[x]-1} \int_0^1 b_1(y) dy + \int_{[x]}^x b_1(y) dy = \sum_{k=0}^{[x]-1} \int_0^1 b_1(y+k) dy + \int_{[x]}^x b_1(y) dy \\ &= \sum_{k=0}^{[x]-1} \int_k^{k+1} b_1(y) dy + \int_{[x]}^x b_1(y) dy = \int_0^{[x]} b_1(y) dy + \int_{[x]}^x b_1(y) dy \\ &= \int_0^x b_1(y) dy, \forall x \in \mathbb{R}. \end{aligned}$$

故此时周期延拓得到的 $b_2(x)$ 恰好就是 $b_1(x)$ 的一个原函数. 即 $b_1(x)$ 在 \mathbb{R} 上有连续且周期为 1 的原函数 $b_2(x), f'(x)$ 在 \mathbb{R} 上连续. 因此我们可以对 $b_1(x)$ 进行分部积分. 即此时

$$\int_a^b b_1(x) f'(x) dx = \int_a^b f'(x) db_2(x)$$

成立. 并且此时 $b_2(x) = \frac{1}{2}(x - [x])^2 - \frac{1}{2}(x - [x]) + c, \forall x \in \mathbb{R}$. 其中 c 为任意常数.

如果我们想要继续分部积分, 就需要 $b_3(x)$ 是 $b_2(x)$ 的一个原函数. 按照上述构造的想法, 实际上, 我们只需期望 $b_3(1) = b_3(0)$ 和 $b_3(x) = \int_0^x b_2(y) dy, \forall x \in [0, 1]$. 即

$$\int_0^1 b_2(x) dx = b_3(1) = b_3(0) = 0,$$

$$b_3(x) = \int_0^x b_2(y) dy, \forall x \in [0, 1].$$

然后以此构造出 $[0, 1]$ 上的 $b_3(x)$, 再对其做周期 1 延拓, 就能得到 \mathbb{R} 上的 $b_3(x)$, 并且 $b_3(x)$ 满足在 \mathbb{R} 上连续且周期为 1. 进而可以利用这个 $b_3(x)$ 继续对原积分进行分部积分, 得到更加精细的估计.

而由 $\int_0^1 b_2(x) dx = b_3(1) = b_3(0) = 0$ 可知

$$\int_0^1 b_2(x) dx = \int_0^1 \left(\frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{2}x + c\right) dx = 0 \Rightarrow c = \frac{1}{12}.$$

于是如果我们还需要继续分部积分的话, 此时 $b_1(x)$ 的原函数 $b_2(x)$ 就被唯一确定了(如果只进行一次分部积分, 那么 c 可以任取. 但是一般情况下, 无论是否还需要继续分部积分, 我们都会先取定这里的 $c = \frac{1}{12}$). 此时这个唯一

确定的 $b_2(x)$ 在 \mathbb{R} 上连续且周期为 1, 并且

$$b_2(x) = \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{2}x + \frac{1}{12}, x \in [0, 1);$$

$$b_2(x) = \frac{1}{2}(x - [x])^2 - \frac{1}{2}(x - [x]) + \frac{1}{12}, b_2(x) = \int_0^x b_1(y) dy, |b_2(x)| \leq \frac{1}{12}, \forall x \in \mathbb{R}.$$

依次下去我们给出计算 $b_n, n \in \mathbb{N}$ 的算法.

定义 2.1 ($b_n(x)$ 定义和算法)

我们令 $b_1(x)$ 为 $x - \frac{1}{2}, x \in [0, 1)$ 的周期 1 延拓. 对所有 $n = 2, 3, \dots, b_n(x)$ 是 $b_{n-1}(x)$ 的一个原函数.



笔记 $b_n(x)$ 的算法:

根据上述构造 $b_2(x), b_3(x)$ 的想法可知, 我们只需期望 $b_n(1) = b_n(0)$ 和 $b_n(x) = \int_0^x b_{n-1}(y) dy, \forall x \in [0, 1)$. 即

$$\int_0^1 b_{n-1}(x) dx = b_n(1) = b_n(0) = 0,$$

$$b_n(x) = \int_0^x b_{n-1}(y) dy, \forall x \in [0, 1).$$

然后以此构造出 $[0, 1)$ 上的 $b_n(x)$, 再对其做周期 1 延拓, 就能得到 \mathbb{R} 上的 $b_n(x)$, 并且 $b_n(x)$ 满足在 \mathbb{R} 上连续且周期为 1. 并且根据 $\int_0^1 b_{n-1}(x) dx = b_n(1) = b_n(0) = 0$ 我们可唯一确定 $b_{n-1}(x)$ 在 $[0, 1)$ 上的表达式. 从而可以唯一确定 $b_n(x)$ 之前的所有 $b_{n-1}(x)$ 在 \mathbb{R} 上的表达式. 又因为这个过程可以无限地进行下去, 所以我们其实可以唯一确定所有的 $b_n(x)$ 在 \mathbb{R} 上的表达式, 方便我们后续可按照我们的需要对原积分进行多次分部积分.

根据上述 $b_n(x)$ 的定义和算法, 可知 $b_n(x)$ 是连续且周期为 1 的函数. 而连续的周期函数一定有界, 故一定存在 $M_n > 0$, 使得对 $\forall x \in \mathbb{R}$, 有 $|b_n(x)| \leq M_n$.

注 我们可以利用这些 $b_n(x)$ 不断地对原积分进行分部积分, 得到更加精细的估计, 而且这个过程可以一直进行下去. 因此无论我们需要多么精确的估计, 都可以通过这样的分部积分方式来得到. 具体例题见例题 2.6, 例题 2.46.

结论 我们计算一些 $b_n(x)$ 以备用:

$$b_1(x) = x - \frac{1}{2}, x \in [0, 1).$$

$$b_1(x) = x - [x] - \frac{1}{2}, |b_1(x)| \leq \frac{1}{2}, x \in \mathbb{R}.$$

$$b_2(x) = \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{2}x + \frac{1}{12}, x \in [0, 1).$$

$$b_2(x) = \frac{1}{2}(x - [x])^2 - \frac{1}{2}(x - [x]) + \frac{1}{12}, |b_2(x)| \leq \frac{1}{12}, x \in \mathbb{R}.$$

$$b_3(x) = \frac{x^3}{6} - \frac{x^2}{4} + \frac{x}{12}, x \in [0, 1).$$

$$b_3(x) = \frac{(x - [x])^3}{6} - \frac{(x - [x])^2}{4} + \frac{(x - [x])}{12}, |b_3(x)| \leq \frac{2\sqrt{3} - 3}{36}, x \in \mathbb{R}.$$

$$b_4(x) = \frac{x^4}{24} - \frac{x^3}{12} + \frac{x^2}{24} - \frac{1}{720}, x \in [0, 1).$$

$$b_4(x) = \frac{(x - [x])^4}{24} - \frac{(x - [x])^3}{12} + \frac{(x - [x])^2}{24} - \frac{1}{720}, |b_4(x)| \leq \frac{1}{720}, x \in \mathbb{R}.$$

命题 2.8 ($b_n(x)$ 的傅立叶级数表达式)

对 $k \in \mathbb{N}$, 我们有

$$\begin{aligned} b_1(x) &\sim -\frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n\pi x)}{n}, \\ b_{2k}(x) &= \frac{2(-1)^{k+1}}{(2\pi)^{2k}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n\pi x)}{n^{2k}}, \\ b_{2k+1}(x) &= \frac{2(-1)^{k+1}}{(2\pi)^{2k+1}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n\pi x)}{n^{2k+1}}. \end{aligned}$$



注 $b_1(x)$ 的傅立叶级数并不总是收敛到 $b_1(x)$. 事实上, 由狄利克雷收敛定理, 我们知道

$$-\frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n\pi x)}{n} = \begin{cases} b_1(x), & x \text{不是整数} \\ 0, & x \text{是整数} \end{cases}.$$

证明

命题 2.9 ($b_n(x)$ 基本性质)

对每个 $k \in \mathbb{N}$, 我们有

1.

$$b_{2k+1}(0) = 0, \quad b_{2k}(0) = \frac{B_{2k}}{(2k)!}.$$

其中 B_{2k} 是 Bernoulli 数.

$$\begin{aligned} B_0 &= 1, & B_1 &= -\frac{1}{2}, & B_2 &= \frac{1}{6}, & B_4 &= -\frac{1}{30}, & B_6 &= \frac{1}{42}, & B_8 &= -\frac{1}{30}, & B_{10} &= -\frac{5}{66}, \dots \\ B_{2k+1} &= 0, & k &= 1, 2, \dots \end{aligned}$$

2.

$$|b_k(x)| \leq \frac{2\zeta(k)}{(2\pi)^k}.$$

其中 $\zeta(x)$ 是 Riemann Zeta 函数, 定义为

$$\zeta(x) \triangleq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^x}, \quad x > 1 \quad \text{或} \quad \zeta(s) = \frac{1}{\Gamma(s)} \int_0^{\infty} \frac{x^{s-1}}{e^x - 1} dx, \quad s > 1.$$



证明



定理 2.5 (Euler-Maclaurin 公式)

设 $a, b \in \mathbb{Z}, m \in \mathbb{N}, f \in D^{2m}[a, b], f^{(2m)} \in L^1[a, b]$. 则有

$$\sum_{k=a}^b f(k) - \int_a^b f(x) dx = \frac{f(b) + f(a)}{2} + \sum_{k=1}^m [f^{(2k-1)}(b) - f^{(2k-1)}(a)] b_{2k}(0) - \int_a^b b_{2m}(x) f^{(2m)}(x) dx.$$



证明 由定理 2.4, 我们有

$$\sum_{k=a}^b f(k) = \int_a^b f(x) dx + \frac{f(a) + f(b)}{2} + \int_a^b b_1(x) f'(x) dx. \quad (2.29)$$

现在利用 b_2 周期性和分部积分得

$$\int_a^b b_1(x) f'(x) dx = \int_a^b f'(x) db_2(x) = [f'(b) - f'(a)] b_2(0) - \int_a^b b_2(x) f''(x) dx.$$

代入等式 (2.29), 就证明了定理中 $m = 2$ 的情况, 类似的反复分部积分即可对一般 m 得到等式

$$\sum_{k=a}^b f(k) - \int_a^b f(x)dx = \frac{f(b) + f(a)}{2} + \sum_{k=2}^m [f^{(k-1)}(b) - f^{(k-1)}(a)] b_k(0) + (-1)^{m+1} \int_a^b b_m(x) f^{(m)}(x)dx.$$

又因为命题 2.9 中的 $b_{2k+1}(0) = 0, k \in \mathbb{N}$, 代入上式, 这就完成了定理的证明. \square

例题 2.46 估计 $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k}, n \rightarrow \infty$.

解 **解法一:** 一方面, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$ 我们有

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = \sum_{k=1}^n \int_k^{k+1} \frac{1}{k} dx \geq \sum_{k=1}^n \int_k^{k+1} \frac{1}{x} dx = \int_1^{n+1} \frac{1}{x} dx = \ln(n+1).$$

另一方面, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$ 我们也有

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = 1 + \sum_{k=2}^n \int_{k-1}^k \frac{1}{k} dx \leq 1 + \sum_{k=2}^n \int_{k-1}^k \frac{1}{x} dx = 1 + \int_1^n \frac{1}{x} dx = 1 + \ln n.$$

于是对 $\forall n \in \mathbb{N}$ 都有

$$\ln(n+1) \leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \leq 1 + \ln n.$$

从而对 $\forall n \in \mathbb{N}$ 都有

$$\frac{\ln(n+1)}{\ln n} \leq \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k}}{\ln n} \leq \frac{1}{\ln n} + 1.$$

令 $n \rightarrow \infty$, 由夹逼准则可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k}}{\ln n} = 1$. 即 $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \sim \ln n, n \rightarrow \infty$.

解法二 (E-M 公式): 由 E-M 公式可得

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = \int_1^n \frac{1}{x} dx + \frac{1 + \frac{1}{n}}{2} - \int_1^n \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{x^2} dx = \ln n + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} - \int_1^n \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{x^2} dx. \quad (2.30)$$

因为 $\int_1^n \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{x^2} dx \leq \int_1^n \frac{1}{2x^2} dx$, 而 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_1^n \frac{1}{2x^2} dx$ 存在, 所以可设

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_1^n \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{x^2} dx = \int_1^{+\infty} \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{x^2} dx \triangleq C < \infty.$$

于是 $\int_1^n \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{x^2} dx = C - \int_n^{+\infty} \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{x^2} dx$. 从而

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} &= \ln n + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} - \int_1^n \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{x^2} dx \\ &= \ln n + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} - \left[C - \int_n^{+\infty} \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{x^2} dx \right] \\ &= \ln n + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} - C + \int_n^{+\infty} \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{x^2} dx \\ &\leq \ln n + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} - C + \int_n^{+\infty} \frac{1}{2x^2} dx \\ &= \ln n + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} - C + \frac{1}{2n}. \end{aligned}$$

故 $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = \ln n + \frac{1}{2} - C + \frac{1}{2n} + O\left(\frac{1}{n}\right) = \ln n + \frac{1}{2} - C + O\left(\frac{1}{n}\right), \forall n \in \mathbb{N}$. 此时令 $\frac{1}{2} - C = \frac{1}{2} - \int_1^{+\infty} \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{x^2} dx \triangleq \gamma$ (欧拉常数). 则

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = \ln n + \gamma + O\left(\frac{1}{n}\right), \forall n \in \mathbb{N}. \quad (2.31)$$

由 $b_n(x)$ 的构造和分部积分可知, 上述结果只是对 $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$ 的一个最粗糙的估计. 实际上, 我们可以利用分部积分得到更加精细的估计. 记 $b_1(x) = x - [x] - \frac{1}{2}$, $b_2(x) = \frac{1}{2}(x - [x])^2 - \frac{1}{2}(x - [x]) + \frac{1}{12}$. 则不难发现 $b_2(x)$ 是连续且周期为 1 的函数, $b_2(x)$ 是 $b_1(x)$ 在 \mathbb{R} 上的一个原函数, 并且 $|b_2(x)| \leq \frac{1}{12}$, $x \in \mathbb{R}$. 而由

$$\int_1^{+\infty} \frac{b_1(x)}{x^2} dx \leq \int_1^{+\infty} \frac{1}{2x^2} dx < +\infty.$$

可知 $\int_1^{+\infty} \frac{b_1(x)}{x^2} dx$ 收敛. 于是设 $\int_1^{+\infty} \frac{b_1(x)}{x^2} dx \triangleq C$. 从而再对(2.30)分部积分得到

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} &= \ln n + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} - \int_1^n \frac{b_1(x)}{x^2} dx = \ln n + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} - \left(\int_1^{+\infty} \frac{b_1(x)}{x^2} dx - \int_n^{+\infty} \frac{b_1(x)}{x^2} dx \right) \\ &= \ln n + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} - C + \int_n^{+\infty} \frac{b_1(x)}{x^2} dx = \ln n + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} - C + \int_n^{+\infty} \frac{1}{x^2} db_2(x) \\ &= \ln n + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} - C + \frac{b_2(x)}{x^2} \Big|_n^{+\infty} + 2 \int_n^{+\infty} \frac{b_2(x)}{x^3} dx \\ &= \ln n + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} - C + 2 \int_n^{+\infty} \frac{b_2(x)}{x^3} dx - \frac{b_2(n)}{n^2}. \end{aligned} \quad (2.32)$$

又由 $|b_2(x)| \leq \frac{1}{12}$, $\forall x \in \mathbb{R}$ 可知

$$\left| 2 \int_n^{+\infty} \frac{b_2(x)}{x^3} dx - \frac{b_2(n)}{n^2} \right| \leq 2 \left| \int_n^{+\infty} \frac{b_2(x)}{x^3} dx \right| + \frac{|b_2(n)|}{n^2} \leq \frac{1}{6} \left| \int_n^{+\infty} \frac{1}{x^3} dx \right| + \frac{1}{12n^2} = \frac{1}{6n^2}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

即

$$2 \int_n^{+\infty} \frac{b_2(x)}{x^3} dx - \frac{b_2(n)}{n^2} = O\left(\frac{1}{n^2}\right), \forall n \in \mathbb{N}. \quad (2.33)$$

再结合(2.32)和(2.33)式可得

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = \ln n + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} - C + O\left(\frac{1}{n^2}\right), \forall n \in \mathbb{N}.$$

记 $\gamma \triangleq \frac{1}{2} - C$ (γ 为欧拉常数), 则我们就得到了比(2.31)式更加精细的估计:

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = \ln n + \gamma + \frac{1}{2n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right), \forall n \in \mathbb{N}.$$

□

例题 2.47 计算

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^m (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n}.$$

笔记 估计交错级数的想法: 将原交错级数分奇偶子列, 观察奇偶子列的关系 (一般奇偶子列的阶相同), 再估计奇子列或偶子列, 进而得到原级数的估计.

解 注意到原级数的奇子列有

$$\sum_{n=1}^{2m-1} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} = \sum_{n=1}^{2m-2} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} + (-1)^{2m-2} \frac{\ln(2m-1)}{2m-1} = \sum_{n=1}^{2m-2} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} + \frac{\ln(2m-1)}{2m-1}, \forall m \in \mathbb{N}.$$

从而

$$\sum_{n=1}^{2m-1} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} = \sum_{n=1}^{2m-2} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} + o(1), m \rightarrow +\infty. \quad (2.34)$$

因此我们只需要估计原级数的偶子列 $\sum_{n=1}^{2m} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n}$ 即可. 又注意到

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{2m} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} &= \sum_{n=1}^m \left[(-1)^{2n-2} \frac{\ln(2n-1)}{2n-1} + (-1)^{2n-1} \frac{\ln 2n}{2n} \right] = \sum_{n=1}^m \left[\frac{\ln(2n-1)}{2n-1} - \frac{\ln 2n}{2n} \right] \\ &= \sum_{n=1}^{2m} \frac{\ln n}{n} - \sum_{n=1}^m \frac{\ln 2n}{2n} - \sum_{n=1}^m \frac{\ln 2n}{2n} = \sum_{n=1}^{2m} \frac{\ln n}{n} - \sum_{n=1}^m \frac{\ln 2n}{n} \\ &= \sum_{n=1}^{2m} \frac{\ln n}{n} - \sum_{n=1}^m \frac{\ln 2 + \ln n}{n}. \end{aligned} \quad (2.35)$$

由例题 2.46 可知

$$\sum_{n=1}^m \frac{\ln 2}{n} = \ln 2(\ln m + \gamma + o(1)) = \ln 2 \cdot \ln m + \gamma \ln 2 + o(1), m \rightarrow +\infty. \quad (2.36)$$

又由 E-M 公式 可知

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^m \frac{\ln n}{n} &= \frac{\ln m}{2m} + \int_1^m \frac{\ln x}{x} dx + \int_1^m \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1 - \ln x}{x^2} dx \\ &= \frac{\ln m}{2m} + \frac{1}{2} \ln^2 m + \int_1^m \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1 - \ln x}{x^2} dx. \end{aligned} \quad (2.37)$$

因为

$$\left| \int_1^m \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1 - \ln x}{x^2} dx \right| \leq \frac{1}{2} \left| \int_1^m \frac{1 - \ln x}{x^2} dx \right|, \forall m \in \mathbb{N}.$$

并且 $\int_1^m \frac{1 - \ln x}{x^2} dx$ 收敛, 所以 $\lim_{m \rightarrow +\infty} \int_1^m \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1 - \ln x}{x^2} dx = \int_1^{+\infty} \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1 - \ln x}{x^2} dx = C < \infty$. 即 $\int_1^m \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1 - \ln x}{x^2} dx = C + o(1), m \rightarrow +\infty$. (2.38)

于是结合(2.37)(2.38)式可得

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^m \frac{\ln n}{n} &= \frac{\ln m}{2m} + \frac{1}{2} \ln^2 m + \int_1^m \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1 - \ln x}{x^2} dx \\ &= o(1) + \frac{1}{2} \ln^2 m + C + o(1) \\ &= \frac{1}{2} \ln^2 m + C + o(1), m \rightarrow +\infty. \end{aligned} \quad (2.39)$$

因此由(2.35)(2.36)(2.39)式可得

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{2m} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} &= \sum_{n=1}^{2m} \frac{\ln n}{n} - \sum_{n=1}^m \frac{\ln 2 + \ln n}{n} = \frac{1}{2} \ln^2 2m + C + o(1) - \left[\ln 2 \cdot \ln m + \gamma \ln 2 + o(1) + \frac{1}{2} \ln^2 m + C + o(1) \right] \\ &= \frac{1}{2} \ln^2 2m - \frac{1}{2} \ln^2 m - \ln 2 \cdot \ln m - \gamma \ln 2 + o(1) = \frac{1}{2} (\ln 2 + \ln m)^2 - \frac{1}{2} \ln^2 m - \ln 2 \cdot \ln m - \gamma \ln 2 + o(1) \\ &= \frac{\ln^2 2}{2} - \gamma \ln 2 + o(1), m \rightarrow +\infty. \end{aligned}$$

即 $\lim_{m \rightarrow +\infty} \sum_{n=1}^{2m} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} = \frac{\ln^2 2}{2} - \gamma \ln 2$. 再结合(2.34)式可得

$$\lim_{m \rightarrow +\infty} \sum_{n=1}^{2m-1} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} = \lim_{m \rightarrow +\infty} \sum_{n=1}^{2m-2} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} = \frac{\ln^2 2}{2} - \gamma \ln 2.$$

故 $\lim_{m \rightarrow +\infty} \sum_{n=1}^m (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} = \frac{\ln^2 2}{2} - \gamma \ln 2$.

□

例题 2.48 设 $f \in C^1[1, +\infty)$ 且 $\int_1^\infty |f'(x)|dx < \infty$, 证明 $\int_1^\infty f(x)dx$ 收敛等价于 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n f(k)$ 存在.

笔记 关键想法参考:E-M 公式和命题 6.4.

证明 由E-M 公式可知

$$\sum_{k=1}^n f(k) = \frac{f(1) + f(n)}{2} + \int_1^n f(x)dx + \int_1^n \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) f'(x)dx. \quad (2.40)$$

注意到 $0 \leq \left| \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) f'(x) \right| \leq \frac{1}{2} |f'(x)|$, 并且 $\int_1^\infty |f'(x)|dx$ 收敛, 因此 $\int_1^\infty \left| \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) f'(x) \right| dx$ 也收敛.

从而 $\int_1^\infty \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) f'(x)dx$ 也收敛, 故由 Henie 归结原则可知 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_1^n \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) f'(x)dx$ 存在.

(1) 若 $\int_1^\infty f(x)dx$ 存在, 则由 Henie 归结原则可知 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_1^n f(x)dx$ 存在. 又由 $\int_1^\infty |f'(x)|dx < \infty$ 可知 $\int_1^\infty f'(x)dx$ 收敛. 于是

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) - f(1)] = \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_1^x f'(y)dy = \int_1^\infty f'(x)dx < \infty.$$

由此可知 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在. 从而由 Henie 归结原则可知 $\lim_{n \rightarrow +\infty} f(n)$ 也存在. 又由 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_1^n \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) f'(x)dx$ 存

在, 再结合(2.40)式可知 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n f(k)$ 存在.

(2) 若 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n f(k)$ 存在, 则 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f(n) = 0$. 又由 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_1^n \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) f'(x)dx$ 存在, 再结合(2.40)式可知 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_1^n f(x)dx$ 也存在. 于是对 $\forall x \geq 1$, 一定存在 $n \in \mathbb{N}$, 使得 $n \leq x < n+1$. 从而可得

$$\int_1^x f(x)dx = \int_1^n f(x)dx + \int_n^x f(x)dx. \quad (2.41)$$

并且

$$\int_n^x f(x)dx \leq \int_n^x |f(x)|dx \leq \int_n^{n+1} |f(x)|dx \leq \sup_{y \geq n} |f(y)|. \quad (2.42)$$

对(2.42)式两边同时令 $x \rightarrow +\infty$, 则 $n \rightarrow +\infty$. 进而可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_n^x f(x)dx \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \sup_{y \geq n} |f(y)| = \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |f(x)|.$$

由于此时 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$, 因此 $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |f(x)| = \lim_{x \rightarrow +\infty} |f(x)| = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$. 从而

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_n^x f(x)dx \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |f(x)| = 0.$$

故 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_n^x f(x)dx = 0$. 于是再对(2.41)式两边同时令 $x \rightarrow +\infty$, 则 $n \rightarrow +\infty$. 从而可得

$$\int_1^\infty f(x)dx = \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_1^x f(x)dx = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_1^n f(x)dx + \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_n^x f(x)dx = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_1^n f(x)dx.$$

又因为此时 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_1^n f(x)dx$ 存在, 所以 $\int_1^\infty f(x)dx$ 也存在.

□

例题 2.49

1. 先证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=2}^n \frac{1}{k \ln k} - \ln \ln n \right)$$

存在.

2. 再用积分放缩法求 $\sum_{k=2}^n \frac{1}{k \ln k}, n \rightarrow \infty$ 的等价无穷大.



笔记 研究和式的收敛性, 可以考虑研究差分的阶, 使得容易估计.

证明

1. 设

$$a_n \triangleq \sum_{k=2}^n \frac{1}{k \ln k} - \ln \ln n, n = 2, 3, \dots$$

我们有

$$\begin{aligned} a_{n+1} - a_n &= \frac{1}{(n+1) \ln(n+1)} - \ln \ln(n+1) + \ln \ln n \\ &= \frac{1}{(n+1) \ln(n+1)} - \ln \left[\ln n + \ln \left(1 + \frac{1}{n} \right) \right] + \ln \ln n \\ &= \frac{1}{(n+1) \ln(n+1)} - \ln \ln n - \ln \left(1 + \frac{\ln(1 + \frac{1}{n})}{\ln n} \right) + \ln \ln n \\ &= \frac{1}{(n+1) \ln(n+1)} - \ln \left(1 + \frac{1}{n \ln n} + O\left(\frac{1}{n^2 \ln n}\right) \right) \\ &= \frac{1}{(n+1) \ln(n+1)} - \frac{1}{n \ln n} + O\left(\frac{1}{n^2 \ln n}\right). \end{aligned}$$

注意到

$$\sum_{n=2}^{\infty} \left| O\left(\frac{1}{n^2 \ln n}\right) \right| < \infty, \sum_{n=2}^{\infty} \left[\frac{1}{(n+1) \ln(n+1)} - \frac{1}{n \ln n} \right] = -\frac{1}{2 \ln 2},$$

于是

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\sum_{k=2}^n (a_{k+1} - a_k) + a_2 \right]$$

存在.

2. 注意到对 $\forall n \geq 2$ 且 $n \in \mathbb{N}$, 都有

$$\sum_{k=2}^n \frac{1}{k \ln k} = \sum_{k=2}^n \int_k^{k+1} \frac{1}{k \ln k} dx \geq \sum_{k=2}^n \int_k^{k+1} \frac{1}{x \ln x} dx = \int_2^{n+1} \frac{1}{x \ln x} dx = \ln \ln(n+1) - \ln \ln 2. \quad (2.43)$$

同时, 也有

$$\sum_{k=2}^n \frac{1}{k \ln k} = \sum_{k=2}^n \int_{k-1}^k \frac{1}{k \ln k} dx \leq \sum_{k=2}^n \int_{k-1}^k \frac{1}{x \ln x} dx = \int_1^n \frac{1}{x \ln x} dx = \ln \ln n. \quad (2.44)$$

从而对 $\forall n \geq 2$ 且 $n \in \mathbb{N}$, 由(2.43)(2.44)式可得

$$\ln \ln(n+1) - \ln \ln 2 \leq \sum_{k=2}^n \frac{1}{k \ln k} \leq \ln \ln n.$$

于是对 $\forall n \geq 2$ 且 $n \in \mathbb{N}$, 我们有

$$\frac{\ln \ln(n+1) - \ln \ln 2}{\ln \ln n} \leq \frac{\sum_{k=2}^n \frac{1}{k \ln k}}{\ln \ln n} \leq 1.$$

令 $n \rightarrow \infty$, 由夹逼准则可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=2}^n \frac{1}{k \ln k}}{\ln \ln n} = 1$. 即 $\sum_{k=2}^n \frac{1}{k \ln k} \sim \ln \ln n, n \rightarrow \infty$.

□

例题 2.50 用积分放缩法得到 $\sum_{n=1}^{\infty} x^{n^2}, x \rightarrow 1^-$ 的等价无穷大.

证明 注意到对 $\forall x \in (0, 1)$, 固定 x , 都有

$$\sum_{n=1}^{\infty} x^{n^2} = -1 + \sum_{n=0}^{\infty} x^{n^2} = -1 + \sum_{n=0}^{\infty} \int_n^{n+1} x^{n^2} dt \geq -1 + \sum_{n=0}^{\infty} \int_n^{n+1} x^{t^2} dt = -1 + \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^n x^{t^2} dt. \quad (2.45)$$

同时也有

$$\sum_{n=1}^{\infty} x^{n^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{n-1}^n x^{t^2} dt \leq \sum_{n=1}^{\infty} \int_{n-1}^n x^{t^2} dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^n x^{t^2} dt. \quad (2.46)$$

又由于 $x \in (0, 1)$, 因此 $\ln x \in (-\infty, 0)$. 从而

$$\int_0^{\infty} x^{t^2} dt = \int_0^{\infty} e^{t^2 \ln x} dt \stackrel{\text{令 } y=t\sqrt{-\ln x}}{=} \frac{1}{\sqrt{-\ln x}} \int_0^{\infty} e^{-y^2} dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{-\ln x}}.$$

故 $\int_0^{\infty} x^{t^2} dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{-\ln x}}$ 收敛. 于是由 Henie 归结原则可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^n x^{t^2} dt = \int_0^{\infty} x^{t^2} dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{-\ln x}}. \quad (2.47)$$

从而对 $\forall x \in (0, 1)$, 结合(2.45)(2.46)(2.47)式可得

$$-1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{-\ln x}} = -1 + \lim_{n \rightarrow \infty} \int_1^n x^{t^2} dt \leq \sum_{n=1}^{\infty} x^{n^2} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^n x^{t^2} dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{-\ln x}}.$$

即

$$-\sqrt{-\ln x} + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \leq \sqrt{-\ln x} \sum_{n=1}^{\infty} x^{n^2} \leq \frac{\sqrt{\pi}}{2}, \forall x \in (0, 1).$$

令 $x \rightarrow 1^-$, 则 $\lim_{x \rightarrow 1^-} \sqrt{-\ln x} \sum_{n=1}^{\infty} x^{n^2} = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$. 即 $\sum_{n=1}^{\infty} x^{n^2} \sim \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{-\ln x}}, x \rightarrow 1^-$.

又由 $\ln(1+x) \sim x, x \rightarrow 0$ 可知 $-\ln x = -\ln(1+x-1) \sim 1-x, x \rightarrow 1^-$. 因此

$$\sum_{n=1}^{\infty} x^{n^2} \sim \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{-\ln x}} \sim \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{1-x}}, x \rightarrow 1^-.$$

□

2.3 Stirling 公式

对于阶乘问题, 最好用的估计工具就是 Stirling 公式. 与组合数相关的极限问题, 都可以尝试将其全部转化为阶乘然后估计大小.

定理 2.6 (Stirling 公式)

$$n! \sim \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n, n \rightarrow \infty.$$

♥

笔记 提示: 用欧拉麦克劳林公式估计 $\sum_{k=1}^n \ln k, n \rightarrow \infty$ 的渐近展开式, 以此结合 Wallis 公式: $\frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} \sim \sqrt{\pi n}, n \rightarrow \infty$ 证明.

证明 由E-M 公式可知, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$\sum_{k=1}^n \ln k = \frac{\ln n}{2} + \int_1^n \ln x dx + \int_1^n \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) \frac{1}{x} dx = \frac{\ln n}{2} + n \ln n - n + 1 + \int_1^n \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) \frac{1}{x} dx. \quad (2.48)$$

由 Dirichlet 判别法可知, $\int_1^{+\infty} \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) \frac{1}{x} dx$ 收敛. 则可设 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_1^n \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) \frac{1}{x} dx = \int_1^{+\infty} \left(x - [x] - \frac{1}{2}\right) \frac{1}{x} dx \triangleq C_0 < \infty$. 记 $b_1(x) = x - [x] - \frac{1}{2}$, 再令 $b_2(x) = \frac{1}{2}(x - [x])^2 - \frac{1}{2}(x - [x]) + \frac{1}{12}, x \in \mathbb{R}$. 则不难发现 $b_2(x)$ 在 \mathbb{R} 上连续且周期为 1, 并且

$$b_2(x) = \int_0^x b_1(y) dy, \quad |b_2(x)| \leq \frac{1}{12}, \forall x \in \mathbb{R}.$$

从而对(2.48)式使用分部积分可得

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \ln k &= \frac{\ln n}{2} + n \ln n - n + 1 + \int_1^n \frac{b_1(x)}{x} dx = \frac{\ln n}{2} + n \ln n - n + 1 + \int_1^{+\infty} \frac{b_1(x)}{x} dx - \int_n^{+\infty} \frac{b_1(x)}{x} dx \\ &= \frac{\ln n}{2} + n \ln n - n + 1 + C_0 - \int_n^{+\infty} \frac{1}{x} db_2(x) = \frac{\ln n}{2} + n \ln n - n + 1 + C_0 - \frac{b_2(x)}{x} \Big|_n^{+\infty} - \int_n^{+\infty} \frac{b_2(x)}{x^2} dx \\ &= \left(n + \frac{1}{2}\right) \ln n - n + 1 + C_0 + \frac{b_2(n)}{n} - \int_n^{+\infty} \frac{b_2(x)}{x^2} dx, \forall n \in \mathbb{N}. \end{aligned}$$

又因为 $|b_2(x)| \leq \frac{1}{12}$, $\forall x \in \mathbb{R}$. 所以对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 我们有

$$\left| \frac{b_2(n)}{n} - \int_n^{+\infty} \frac{b_2(x)}{x^2} dx \right| \leq \frac{1}{12} \left(\frac{1}{n} + \int_n^{+\infty} \frac{1}{x^2} dx \right) = \frac{1}{6n}.$$

故 $\frac{b_2(n)}{n} - \int_n^{+\infty} \frac{b_2(x)}{x^2} dx = O\left(\frac{1}{n}\right)$, $\forall n \in \mathbb{N}$. 于是再记 $C = 1 + C_0$, 则

$$\sum_{k=1}^n \ln k = \left(n + \frac{1}{2}\right) \ln n - n + C + O\left(\frac{1}{n}\right), \forall n \in \mathbb{N}. \quad (2.49)$$

注意到

$$(2n)!! = 2^n n!, n = 0, 1, 2, \dots. \quad (2.50)$$

于是由 Wallis 公式: $\frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} \sim \sqrt{\pi n}, n \rightarrow \infty$. 再结合(2.49)(2.50)可得

$$\begin{aligned} \sqrt{\pi} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(2n)!!}{(2n-1)!! \sqrt{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{[(2n)!!]^2}{(2n)!! \sqrt{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(2^n n!)^2}{(2n)!! \sqrt{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4^n n! \cdot n!}{(2n)!! \sqrt{n}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4^n n! \prod_{k=1}^n k}{\sqrt{n} \prod_{k=n+1}^{2n} k} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4^n n! e^{\sum_{k=1}^n \ln k}}{\sqrt{n} e^{\sum_{k=n+1}^{2n} \ln k}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4^n n! e^{(n+\frac{1}{2}) \ln n - n + C + O(\frac{1}{n})}}{\sqrt{n} e^{(2n+\frac{1}{2}) \ln 2n - 2n + C + O(\frac{1}{n})}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4^n n! e^{(n+\frac{1}{2}) \ln n - n + C + O(\frac{1}{n})} - [(2n+\frac{1}{2}) \ln 2n - 2n + C + O(\frac{1}{n})]}{\sqrt{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4^n n! e^{-n \ln n + n - (2n+\frac{1}{2}) \ln 2 + O(\frac{1}{n})}}{\sqrt{n}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4^n n! 2^{-2n-\frac{1}{2}} e^n}{n^n \sqrt{n}} e^{O(\frac{1}{n})} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n! e^n}{n^n \sqrt{2n}} e^{O(\frac{1}{n})}. \end{aligned}$$

从而 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n! e^n}{n^n \sqrt{2n}} = \frac{\sqrt{\pi}}{\lim_{n \rightarrow \infty} e^{O(\frac{1}{n})}} = \sqrt{\pi}$. 因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n!}{\sqrt{n} (\frac{n}{e})^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n! e^n}{n^n \sqrt{n}} = \sqrt{2\pi}$. 故 $n! \sim \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n, n \rightarrow \infty$.

□

例题 2.51 设 n, v 为正整数且 $1 < v < n$, 满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{v - \frac{n}{2}}{\sqrt{n}} = \lambda > 0$, 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n}}{2^n} C_n^v = \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-2\lambda^2}$.

证明 根据条件, 显然在 $n \rightarrow \infty$ 时 v 也会趋于无穷, 设 $v = \frac{n}{2} + w\sqrt{n}$, 则 $w = \frac{v - \frac{n}{2}}{\sqrt{n}}$, 从而 $\lim_{n \rightarrow \infty} w = \lambda > 0$, 则有

$$\frac{\sqrt{n}}{2^n} C_n^v = \frac{\sqrt{n}}{2^n} \frac{n!}{v!(n-v)!}, \quad n! \sim \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n, n \rightarrow \infty.$$

从而

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-2\lambda^2} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n}}{2^n} C_n^v = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n}}{2^n} \frac{n!}{v!(n-v)!} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n}}{2^n} \frac{\sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n}{\sqrt{2\pi v} \left(\frac{v}{e}\right)^v \sqrt{2\pi(n-v)} \left(\frac{n-v}{e}\right)^{n-v}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^n}{2^n v^v (n-v)^{n-v}} \frac{n}{\sqrt{v(n-v)}} \\ &\iff \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^n}{2^n \left(\frac{n}{2} + w\sqrt{n}\right)^v \left(\frac{n}{2} - w\sqrt{n}\right)^{n-v}} \frac{n}{2\sqrt{v(n-v)}} = e^{-2\lambda^2}. \end{aligned}$$

又

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{2\sqrt{v(n-v)}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{2\sqrt{\left(\frac{n}{2} + w\sqrt{n}\right)\left(\frac{n}{2} - w\sqrt{n}\right)}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4w^2}{n}}} = 1,$$

故

$$\begin{aligned} & \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^n}{2^n \left(\frac{n}{2} + w\sqrt{n}\right)^v \left(\frac{n}{2} - w\sqrt{n}\right)^{n-v}} \frac{n}{2\sqrt{v(n-v)}} = e^{-2\lambda^2} \\ \iff & \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\left(\frac{n}{2} + w\sqrt{n}\right) + \left(\frac{n}{2} - w\sqrt{n}\right)}}{2^{\left(\frac{n}{2} + w\sqrt{n}\right) + \left(\frac{n}{2} - w\sqrt{n}\right)} \left(\frac{n}{2} + w\sqrt{n}\right)^{\frac{n}{2} + w\sqrt{n}} \left(\frac{n}{2} - w\sqrt{n}\right)^{\frac{n}{2} - w\sqrt{n}}} = e^{-2\lambda^2} \\ \iff & \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\left(\frac{n}{2} + w\sqrt{n}\right) + \left(\frac{n}{2} - w\sqrt{n}\right)}}{(n + 2w\sqrt{n})^{\frac{n}{2} + w\sqrt{n}} (n - 2w\sqrt{n})^{\frac{n}{2} - w\sqrt{n}}} = e^{-2\lambda^2} \\ \iff & \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\left(1 + \frac{2w}{\sqrt{n}}\right)^{\frac{n}{2} + w\sqrt{n}} \left(1 - \frac{2w}{\sqrt{n}}\right)^{\frac{n}{2} - w\sqrt{n}}} = e^{-2\lambda^2} \\ \iff & \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\left(\frac{n}{2} + w\sqrt{n}\right) \ln \left(1 + \frac{2w}{\sqrt{n}}\right) + \left(\frac{n}{2} - w\sqrt{n}\right) \ln \left(1 - \frac{2w}{\sqrt{n}}\right) \right] = 2\lambda^2. \end{aligned} \quad (2.51)$$

又由 Taylor 公式可得

$$\begin{aligned} & \left(\frac{n}{2} + w\sqrt{n}\right) \ln \left(1 + \frac{2w}{\sqrt{n}}\right) + \left(\frac{n}{2} - w\sqrt{n}\right) \ln \left(1 - \frac{2w}{\sqrt{n}}\right) \\ &= \left(\frac{n}{2} + w\sqrt{n}\right) \left(\frac{2w}{\sqrt{n}} - \frac{2w^2}{n} + O\left(\frac{1}{n\sqrt{n}}\right)\right) + \left(\frac{n}{2} - w\sqrt{n}\right) \left(-\frac{2w}{\sqrt{n}} - \frac{2w^2}{n} + O\left(\frac{1}{n\sqrt{n}}\right)\right) \\ &= w\sqrt{n} + w^2 + O\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right) - w\sqrt{n} + w^2 + O\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right) = 2w^2 + O\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right), n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

再结合 $\lim_{n \rightarrow \infty} w = \lambda$ 可知(2.51)式成立, 因此结论得证. □

2.4 Abel 变换

定理 2.7 (Abel 变换)

设 $\{a_n\}_{n=1}^N, \{b_n\}_{n=1}^N$ 是数列, 则有恒等式

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N a_k b_k &= (a_1 - a_2)b_1 + \cdots + (a_{N-1} - a_N)(b_1 + b_2 + \cdots + b_{N-1}) + a_N(b_1 + b_2 + \cdots + b_N) \\ &= \sum_{j=1}^{N-1} (a_j - a_{j+1}) \sum_{i=1}^j b_i + a_N \sum_{i=1}^N b_i. \end{aligned}$$

 **笔记** Abel 变换的证明想法“强行裂项”是一种很重要的思想.

证明 为了计算 $\sum_{j=1}^{N-1} (a_j - a_{j+1}) \sum_{i=1}^j b_i + a_N \sum_{i=1}^N b_i$, 我们来强行构造裂项, 差什么就给他补上去再补回来, 即:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{N-1} (a_j - a_{j+1}) \sum_{i=1}^j b_i + a_N \sum_{i=1}^N b_i = \sum_{j=1}^{N-1} \left(a_j \sum_{i=1}^j b_i - a_{j+1} \sum_{i=1}^j b_i \right) + a_N \sum_{i=1}^N b_i \\ &= \sum_{j=1}^{N-1} \left(a_j \sum_{i=1}^j b_i - a_{j+1} \sum_{i=1}^{j+1} b_i \right) + \sum_{j=1}^{N-1} \left(a_{j+1} \sum_{i=1}^{j+1} b_i - a_{j+1} \sum_{i=1}^j b_i \right) + a_N \sum_{i=1}^N b_i \\ &= a_1 b_1 - a_N \sum_{i=1}^N b_i + \sum_{j=1}^{N-1} a_{j+1} b_{j+1} + a_N \sum_{i=1}^N b_i = \sum_{j=1}^N a_j b_j. \end{aligned}$$

□

命题 2.10 (经典乘积极限结论)

设 $a_1 \geq a_2 \geq \cdots \geq a_n \geq 0$ 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, 极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n a_k b_k$ 存在. 证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (b_1 + b_2 + \cdots + b_n) a_n = 0.$$

笔记 为了估计 $\sum_{j=1}^n b_j$, 前面的有限项不影响. 而要用上极限 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$ 收敛, 自然想到 $\sum_{j=1}^n b_j = \sum_{j=1}^n \frac{b_j a_j}{a_j}$ 和 Abel 变换. 而 a_j 的单调性能用在 Abel 变换之后去绝对值.

证明 不妨设 $a_1 \geq a_2 \geq \cdots \geq a_n > 0$. 则由于级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$ 收敛, 故对 $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得

$$\left| \sum_{i=N+1}^m a_i b_i \right| \leq \varepsilon, \forall m \geq N+1.$$

当 $n \geq N+1$, 由 Abel 变换, 我们有

$$\begin{aligned} \left| \sum_{j=N+1}^n b_j \right| &= \left| \sum_{j=N+1}^n \frac{a_j b_j}{a_j} \right| = \left| \sum_{j=N+1}^{n-1} \left(\frac{1}{a_j} - \frac{1}{a_{j+1}} \right) \sum_{i=N+1}^j a_i b_i + \frac{1}{a_n} \sum_{i=N+1}^n a_i b_i \right| \\ &\leq \sum_{j=N+1}^{n-1} \left(\left| \frac{1}{a_j} - \frac{1}{a_{j+1}} \right| \cdot \left| \sum_{i=N+1}^j a_i b_i \right| \right) + \frac{1}{|a_n|} \left| \sum_{i=N+1}^n a_i b_i \right| \\ &\leq \left| \sum_{i=N+1}^n a_i b_i \right| \cdot \sum_{j=N+1}^{n-1} \left(\left| \frac{1}{a_j} - \frac{1}{a_{j+1}} \right| \right) + \frac{1}{|a_n|} \left| \sum_{i=N+1}^n a_i b_i \right| \\ &\leq \varepsilon \left[\sum_{j=N+1}^{n-1} \left(\frac{1}{a_{j+1}} - \frac{1}{a_j} \right) + \frac{1}{a_n} \right] = \varepsilon \left(\frac{2}{a_n} - \frac{1}{a_{N+1}} \right). \end{aligned}$$

因此我们有

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| a_n \sum_{j=1}^n b_j \right| \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| a_n \sum_{j=1}^N b_j \right| + \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| a_n \sum_{j=N+1}^n b_j \right| \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| a_n \sum_{j=1}^N b_j \right| + \varepsilon \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left(2 - \frac{a_n}{a_{N+1}} \right) = 2\varepsilon.$$

由 ε 任意性即可得 $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| a_n \sum_{j=1}^n b_j \right| = 0$, 于是就证明了 $\lim_{n \rightarrow \infty} (b_1 + b_2 + \cdots + b_n) a_n = 0$.

□

2.5 Stolz 定理

2.5.1 数列 Stolz 定理

定理 2.8 (Stolz 定理)

(a): 设 x_n 是严格递增数列且满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}.$$

(b): 设 x_n 是严格递减数列且满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} y_n = 0$, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}.$$

(c): 分别在 (a),(b) 的条件下, 若还有 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}$ 存在或者为确定符号的 ∞ , 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}. \quad (2.52)$$



注 注意 (c) 由 (a),(b) 是显然的, 且只有 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}$ 存在或者为确定符号的 ∞ 时才 (2.52) 式成立. 他和我们的洛必达法则有一定的相似程度. 即 Stolz 定理是离散的洛必达法则.

证明 我们仅证明 x_n 是严格递增数列且满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$ 和 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} < \infty$ 时有

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}. \quad (2.53)$$

记 $A \triangleq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}$, 由上极限定义我们知道对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得 $\frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \leq A + \varepsilon, \forall n \geq N$.

利用 x_n 严格递增时, 成立 $y_{n+1} - y_n \leq (A + \varepsilon)(x_{n+1} - x_n), n \geq N$, 然后求和得

$$\sum_{j=N}^{n-1} (y_{j+1} - y_j) \leq (A + \varepsilon) \sum_{j=N}^{n-1} (x_{j+1} - x_j), \forall n \geq N + 1.$$

即

$$y_n - y_N \leq (A + \varepsilon)(x_n - x_N), \forall n \geq N + 1.$$

令 $n \rightarrow +\infty$, 取上极限就得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{y_n}{x_n} - \frac{y_N}{x_N}}{1 - \frac{x_N}{x_n}} = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n - y_N}{x_n - x_N} \leq A + \varepsilon.$$

由 ε 任意性得到式 (2.53). □

命题 2.11

设 $\{a_n\}$ 为一个数列, p 为固定的正整数. 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_{n+p} - a_n) = \lambda$, 其中 λ 为常数, 证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n} = \frac{\lambda}{p}.$$



证明 考虑 $\left\{ \frac{a_n}{n} \right\}$ 的 p 个互不相交的子列 $\left\{ \frac{a_{np+k}}{np+k} \right\}, k = 0, 1, 2, \dots, p-1$. 由条件可得, 对 $\forall k \in [0, p-1] \cap \mathbb{N}$, 都有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (a_{(n+1)p+k} - a_{np+k}) = \lim_{n \rightarrow \infty} (a_{n+p} - a_n) = \lambda.$$

从而由 Stolz 定理可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{np+k}}{np+k} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{(n+1)p+k} - a_{np+k}}{(n+1)p+k - np+k} = \frac{\lambda}{p}.$$

于是由命题 1.1 可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n} = \frac{\lambda}{p}.$$



命题 2.12 (Cauchy 命题)

若 $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n$ 存在或者为确定符号的 ∞ , 则有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} y_n.$$



笔记 这个命题说明 Stolz 定理是一种有效的把求和消去的降阶方法.

证明 容易由 Stolz 定理的 (a) 直接得出.

□

定理 2.9 (反向 Stolz 定理/反向 Cauchy 命题)

对某个 $C > 0$, 如果有 $n(a_n - a_{n-1}) \geq -C, \forall n \geq 2$, 且

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n} = a \in \mathbb{R},$$

则我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a.$$

♡

笔记 反向 Stolz 定理本身是习题, 作为定理去应用的机会非常少.

笔记 不妨设 $a = 0$, 记

$$b_1 = a_1, b_n = a_n - a_{n-1}, \forall n \geq 2, S_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n.$$

证明的想法是用 S_n, S_m 来表示 a_n, m 是一个待定的自然数. 即由

$$S_{n+m} = S_n + ma_n + mb_{n+1} + (m-1)b_{n+2} + \cdots + b_{n+m}$$

推出

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{S_{n+m} - S_n}{m} - \frac{mb_{n+1} + (m-1)b_{n+2} + \cdots + b_{n+m}}{m} \\ &\leq \frac{|S_{n+m}| + |S_n|}{m} + \frac{1}{m} \left[m \frac{C}{n+1} + (m-1) \frac{C}{n+2} + \cdots + \frac{C}{n+m} \right]. \end{aligned}$$

然后想办法取合适的 m 即可.

证明 不妨设 $a = 0$, 记

$$b_1 = a_1, b_n = a_n - a_{n-1}, \forall n \geq 2, S_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n.$$

我们有 $b_n \geq -\frac{C}{n}$.

对任何 $\varepsilon \in (0, 1)$, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得 $|S_n| \leq n\varepsilon, \forall n \geq N$, 于是当 $n \geq N$, 有

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{S_{n+[n\sqrt{\varepsilon}]} - S_n}{[n\sqrt{\varepsilon}]} - \frac{1}{[n\sqrt{\varepsilon}]} \left([n\sqrt{\varepsilon}]b_{n+1} + ([n\sqrt{\varepsilon}] - 1)b_{n+2} + \cdots + b_{n+[n\sqrt{\varepsilon}]} \right) \\ &\leq \frac{|S_{n+[n\sqrt{\varepsilon}]}| + |S_n|}{[n\sqrt{\varepsilon}]} + \frac{1}{[n\sqrt{\varepsilon}]} \left([n\sqrt{\varepsilon}] \frac{C}{n+1} + ([n\sqrt{\varepsilon}] - 1) \frac{C}{n+2} + \cdots + \frac{C}{n+[n\sqrt{\varepsilon}]} \right) \\ &\leq \frac{|S_{n+[n\sqrt{\varepsilon}]}| + |S_n|}{[n\sqrt{\varepsilon}]} + \frac{1}{[n\sqrt{\varepsilon}]} \left([n\sqrt{\varepsilon}] \frac{C}{n} + ([n\sqrt{\varepsilon}] - 1) \frac{C}{n} + \cdots + \frac{C}{n} \right) \\ &= \frac{|S_{n+[n\sqrt{\varepsilon}]}| + |S_n|}{[n\sqrt{\varepsilon}]} + \frac{[n\sqrt{\varepsilon}] + 1}{2n} C \\ &\leq \frac{2n\varepsilon}{[n\sqrt{\varepsilon}]} + \frac{[n\sqrt{\varepsilon}] + 1}{2n} C + \varepsilon, \end{aligned} \tag{2.54}$$

于是我们得到

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n \leq 2\sqrt{\varepsilon} + \frac{C}{2}\sqrt{\varepsilon} + \varepsilon.$$

另外一方面, 当 $n \geq \frac{N}{1-\sqrt{\varepsilon}} > N$, 有 $n - [n\sqrt{\varepsilon}] \geq n(1 - \sqrt{\varepsilon}) \geq N$, 因此

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{S_n - S_{n-[n\sqrt{\varepsilon}]}}{[n\sqrt{\varepsilon}]} + \frac{([n\sqrt{\varepsilon}] - 1)b_n + ([n\sqrt{\varepsilon}] - 2)b_{n-1} + \cdots + b_{n-[n\sqrt{\varepsilon}]+2}}{[n\sqrt{\varepsilon}]} \\ &\geq \frac{S_n - S_{n-[n\sqrt{\varepsilon}]}}{[n\sqrt{\varepsilon}]} - \frac{([n\sqrt{\varepsilon}] - 1)\frac{C}{n} + ([n\sqrt{\varepsilon}] - 2)\frac{C}{n} + \cdots + \frac{C}{n-[n\sqrt{\varepsilon}]+2}}{[n\sqrt{\varepsilon}]} \\ &\geq \frac{S_n - S_{n-[n\sqrt{\varepsilon}]}}{[n\sqrt{\varepsilon}]} - \frac{C}{(n - [n\sqrt{\varepsilon}])[n\sqrt{\varepsilon}]} \left(([n\sqrt{\varepsilon}] - 1) + ([n\sqrt{\varepsilon}] - 2) + \cdots + 1 \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\geq -\frac{|S_n| + |S_{n-[n\sqrt{\varepsilon}]}|}{[n\sqrt{\varepsilon}]} - \frac{C}{2} \frac{[n\sqrt{\varepsilon}] - 1}{n - [n\sqrt{\varepsilon}]} \\
&\geq -\frac{2n\varepsilon}{[n\sqrt{\varepsilon}]} - \frac{C}{2} \frac{[n\sqrt{\varepsilon}] - 1}{n - [n\sqrt{\varepsilon}]} + \varepsilon,
\end{aligned} \tag{2.55}$$

于是我们得到

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \geq -2\sqrt{\varepsilon} - \frac{C}{2} \frac{\sqrt{\varepsilon}}{1 - \sqrt{\varepsilon}} + \varepsilon.$$

由 ε 任意性即得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0.$$

□

命题 2.13

若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = l \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\} \cup \{-\infty\}$ 且 $a_n > 0$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = l$.

◆

证明 由 Stolz 定理可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\ln a_n}{n}} \xrightarrow{\text{Stolz 定理}} \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\ln a_{n+1} - \ln a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = l.$$

□

命题 2.14

若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = l \in \mathbb{R}, a_n > 0$, 并且对某个 $C > 0$, 如果有 $n(a_n - a_{n-1}) \geq -C, \forall n \geq 2$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = l$.

◆

证明 由反向 Stolz 定理可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\ln a_{n+1} - \ln a_n} \xrightarrow{\text{反向 Stolz 定理}} \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\sum_{k=0}^n (\ln a_{k+1} - \ln a_k)}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\ln a_n - \ln a_0}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\ln a_n}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = l.$$

□

2.5.1.1 利用 Stolz 定理求数列极限

例题 2.5.2 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{\ln \sum_{k=1}^n k^{2020}}.$$

笔记 本题计算过程中使用了 Lagrange 中值定理, 只是过程省略了而已 (以后这种过程都会省略).

证明 由 Stolz 定理可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{\ln \sum_{k=1}^n k^{2020}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln(n+1) - \ln n}{\ln \sum_{k=1}^{n+1} k^{2020} - \ln \sum_{k=1}^n k^{2020}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln(1 + \frac{1}{n})}{\ln \frac{\sum_{k=1}^{n+1} k^{2020}}{\sum_{k=1}^n k^{2020}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n}}{\ln(1 + \frac{(n+1)^{2020}}{\sum_{k=1}^n k^{2020}})}.$$

又由 Stolz 定理可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)^{2020}}{\sum_{k=1}^n k^{2020}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+2)^{2020} - (n+1)^{2020}}{(n+1)^{2020}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2020 \cdot n^{2019}}{(n+1)^{2020}} = 0.$$

于是再利用 Stolz 定理 可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n}}{\ln(1 + \frac{(n+1)^{2020}}{\sum_{k=1}^n k^{2020}})} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n}}{\frac{(n+1)^{2020}}{\sum_{k=1}^n k^{2020}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n k^{2020}}{n \cdot (n+1)^{2020}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n k^{2020}}{n^{2021}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)^{2020}}{(n+1)^{2021} - n^{2021}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)^{2020}}{2021 \cdot n^{2020}} = \frac{1}{2021}. \end{aligned}$$

故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{\ln \sum_{k=1}^n k^{2020}} = \frac{1}{2021}$.

□

例题 2.53

(1) 计算极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k}}{\ln n}$.

(2) 证明下述极限存在 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n \right)$.

(3) 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n - \gamma \right)$.

笔记 注意, $\gamma \triangleq \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n \right) \approx 0.577 \dots$ 是没有初等表达式的, 我们只能规定为一个数字, 这个数字叫做欧拉常数, 截至目前, 人类甚至都不知道 γ 会不会是一个分数.

解

(1) 直接由 Stolz 定理 可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k}}{\ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n+1}}{\ln(n+1) - \ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n+1}}{\frac{1}{n}} = 1.$$

(2) 记 $c_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n$, 则

$$\begin{aligned} c_{n+1} - c_n &= \frac{1}{n+1} + \ln n - \ln(n+1) = \frac{1}{n+1} - \ln \left(1 + \frac{1}{n} \right) \\ &= \frac{1}{n+1} - \left[\frac{1}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right) \right] = -\frac{1}{n(n+1)} + O\left(\frac{1}{n^2}\right) \\ &= O\left(\frac{1}{n^2}\right), n \rightarrow +\infty. \end{aligned}$$

从而存在常数 $C > 0$, 使得 $|c_{n+1} - c_n| \leq \frac{C}{n^2}$, 又因为 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{C}{n^2}$ 收敛, 所以由比较原则可知 $\sum_{n=1}^{\infty} |c_{n+1} - c_n|$ 也收敛.

由于数列级数绝对收敛一定条件收敛, 因此 $\sum_{n=1}^{\infty} (c_{n+1} - c_n)$ 也收敛, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n (c_{k+1} - c_k) = \lim_{n \rightarrow \infty} (c_{n+1} - c_1)$

存在. 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n \right)$ 也存在.

(3) 由 Stolz 定理 可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n - \gamma \right) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n - \gamma}{\frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n+1} - \ln \left(1 + \frac{1}{n} \right)}{\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\left(\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n} \right) n^2} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left[\frac{1}{n+1} - \ln \left(1 + \frac{1}{n} \right) \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{n(n+1)} \cdot n^2} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left[\frac{1}{n+1} - \ln \left(1 + \frac{1}{n} \right) \right] \end{aligned}$$

$$= -\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left[\frac{1}{n+1} - \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{2n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right) \right) \right] = \frac{1}{2}.$$

因此我们得到了调和级数的渐进估计:

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = \ln n + \gamma + \frac{1}{2n} + o\left(\frac{1}{n}\right), n \rightarrow \infty.$$

□

例题 2.54 计算

1. $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n]{n!}}{n};$
2. $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sqrt[n+1]{(n+1)!} - \sqrt[n]{n!} \right).$

证明

1. 由 Stolz 定理 可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n]{n!}}{n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e^{\sum_{k=1}^n \ln k}}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n} - \ln n} = e^{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln k - n \ln n}{n}} \\ &= e^{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln(n+1) - (n+1) \ln(n+1) + n \ln n}{1}} = e^{\lim_{n \rightarrow \infty} n \ln \frac{n+1}{n}} \\ &= e^{\lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{n}{n+1} - 1 \right)} = e^{-1}. \end{aligned}$$

2. 注意到

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sqrt[n+1]{(n+1)!} - \sqrt[n]{n!} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(e^{\frac{\sum_{k=1}^{n+1} \ln k}{n+1}} - e^{\frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n}} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n}} \left(e^{\frac{\sum_{k=1}^{n+1} \ln k}{n+1} - \frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n}} - 1 \right).$$

由上一小题可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n]{n!}}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e^{\sum_{k=1}^n \ln k}}{n} = e^{-1}.$$

故 $e^{\frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n}} \sim \frac{n}{e}, n \rightarrow \infty$. 并且

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\sum_{k=1}^{n+1} \ln k}{n+1} - \frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n} \right) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \sum_{k=1}^{n+1} \ln k - (n+1) \sum_{k=1}^n \ln k}{n(n+1)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \ln(n+1) - \sum_{k=1}^n \ln k}{n(n+1)} \\ &= -\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n(n+1)} \xrightarrow{\text{Stolz 定理}} -\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{2(n+1)} = 0. \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sqrt[n+1]{(n+1)!} - \sqrt[n]{n!} \right) &= \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n}} \left(e^{\frac{\sum_{k=1}^{n+1} \ln k}{n+1} - \frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n}} - 1 \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{e} \cdot \left(\frac{\sum_{k=1}^{n+1} \ln k}{n+1} - \frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n} \right) \\ &\equiv \frac{1}{e} \lim_{n \rightarrow \infty} n \cdot \frac{n \ln(n+1) - \sum_{k=1}^n \ln k}{n(n+1)} = \frac{1}{e} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \ln(n+1) - \sum_{k=1}^n \ln k}{n+1} \\ &\xrightarrow{\text{Stolz 定理}} \frac{1}{e} \lim_{n \rightarrow \infty} \left[(n+1) \ln(n+2) - \sum_{k=1}^{n+1} \ln k - n \ln(n+1) + \sum_{k=1}^n \ln k \right] \\ &= \frac{1}{e} \lim_{n \rightarrow \infty} [(n+1) \ln(n+2) - (n+1) \ln(n+1)] = \frac{1}{e} \lim_{n \rightarrow \infty} (n+1) \ln \left(1 + \frac{1}{n+1} \right) \\ &= \frac{1}{e} \lim_{n \rightarrow \infty} (n+1) \left[\frac{1}{n+1} + o\left(\frac{1}{n+1}\right) \right] = \frac{1}{e}. \end{aligned}$$

□

例题 2.55 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln C_n^k}{n^2}.$$

笔记 注意到, 分子求和时, 不是单纯的 $\sum_{k=0}^{n+1} \ln C_n^k - \sum_{k=0}^n \ln C_n^k$, 而是 $\sum_{k=0}^{n+1} \ln C_{n+1}^k - \sum_{k=0}^n \ln C_n^k$.

组合数的定义和性质可以参考 Binomial Coefficient.

结论 $C_a^b = \frac{a}{b} C_{a-1}^{b-1}$.

解 由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln C_n^k}{n^2} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{n+1} \ln C_{n+1}^k - \sum_{k=1}^n \ln C_n^k}{n^2 - (n-1)^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{n+1} \ln C_{n+1}^k - \sum_{k=1}^n \ln C_n^k}{2n} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{n+1} \ln C_{n+1}^k - \sum_{k=1}^n \ln C_n^k}{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln \left(\frac{n+1}{k} C_n^{k-1} \right) - \sum_{k=1}^n \ln C_n^k}{2n} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln(n+1) - \sum_{k=1}^n \ln k + \sum_{k=1}^n (\ln C_n^{k-1} - \ln C_n^k)}{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \ln(n+1) - \sum_{k=1}^n \ln k - (\ln C_n^0 - \ln C_n^n)}{2n} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \ln(n+1) - \sum_{k=1}^n \ln k}{2n} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1) \ln(n+2) - n \ln(n+1) - \ln(n+1)}{1} \\ &= \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} (n+1) \ln \frac{n+2}{n+1} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} (n+1) \left(\frac{n+2}{n+1} - 1 \right) = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

□

例题 2.56 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{n+1}{2^k(n+1-k)}$

笔记 倒序求和与顺序求和相等!(看到 $n+1-k$, 就应该想到倒序求和)

解 由 Stolz 公式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{n+1}{2^k(n+1-k)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{n+1}{2^{n+1-k} k} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{2^k}{k}}{\frac{2^{n+1}}{n+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{2^n}{n}}{\frac{2^{n+1}}{n+1} - \frac{2^n}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n}}{\frac{2}{n+1} - \frac{1}{n}} = 1.$$

□

例题 2.57 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} n(H_n - \ln n - \gamma)$, 其中 γ 为欧拉常数, $H_n = 1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}$.

证明

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} n(H_n - \ln n - \gamma) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{H_n - \ln n - \gamma}{\frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{H_{n+1} - H_n - \ln(n+1) + \ln n}{\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n+1} - \ln(1 + \frac{1}{n})}{-\frac{1}{n^2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left(\ln(1 + \frac{1}{n}) - \frac{1}{n+1} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{2n^2} - \frac{1}{n+1} \right) = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

□

注 类似的, 你可以继续计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(n(H_n - \ln n - \gamma) - \frac{1}{2} \right)$, 并且仅用 Stolz 公式就能证明存在一列 c_1, \dots, c_k 使得

$$H_n = \ln n + \gamma + \frac{c_1}{n} + \frac{c_2}{n^2} + \dots + \frac{c_k}{n^k} + O\left(\frac{1}{n^{k+1}}\right), n \rightarrow \infty.$$

例题 2.58 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt{1 + \frac{k}{n}}$.

笔记 这题也可以凑定积分定义是显然的.

证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt{1 + \frac{k}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \sqrt{n+k}}{n\sqrt{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2n+1} + \sqrt{2n+2} - \sqrt{n+1}}{\frac{3}{2}\sqrt{n}} = \frac{2}{3}(2\sqrt{2} - 1).$$

□

命题 2.15

设 $\alpha \neq 0$, 证明

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{\alpha}} = \frac{n^{1-\alpha}}{1-\alpha} + o(n^{1-\alpha}).$$

◆

证明 由 Stolz 公式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k^{\alpha}}}{n^{1-\alpha}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{(n+1)^{\alpha}}}{(n+1)^{1-\alpha} - n^{1-\alpha}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^{\alpha} \cdot (1-\alpha) n^{-\alpha}} = \frac{1}{1-\alpha}.$$

□

2.5.1.2 利用 Stolz 定理求抽象数列极限

例题 2.59 设 $x_1 > 0, x_{n+1} = x_n + \frac{1}{x_n \sqrt{n}}$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} n^{-\frac{1}{4}} x_n$.

证明 归纳易证 x_n 单调递增, 如果 x_n 有界则设 $x_n \leq A < \infty$, 代入条件可知 $x_{n+1} - x_n = \frac{1}{\sqrt{n}x_n} \geq \frac{1}{A\sqrt{n}}$, 从而

$x_{n+1} = \sum_{k=1}^n (x_{k+1} - x_k) \geq \sum_{k=1}^n \frac{1}{A\sqrt{n}}$. 而这个不等式右边发散, 故 x_n 也发散, 矛盾. 所以 x_n 单调递增趋于无穷, 下面用 Stolz 公式求极限

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^2}{\sqrt{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1}^2 - x_n^2}{\frac{1}{2\sqrt{n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(x_{n+1} - x_n)(x_{n+1} + x_n)}{\frac{1}{2\sqrt{n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{x_n \sqrt{n}} \left(2x_n + \frac{1}{x_n \sqrt{n}}\right)}{\frac{1}{2\sqrt{n}}} = 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \left(2 + \frac{1}{x_n^2 \sqrt{n}}\right) = 4.$$

因此所求的极限是 2.

□

注

1. 直接用 stolz 会做不出来:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{n^{\frac{1}{4}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1} - x_n}{\frac{1}{4}n^{-\frac{3}{4}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{x_n \sqrt{n}}}{n^{-\frac{3}{4}}} = 4 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{-\frac{1}{4}}}{x_n}.$$

设 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{n^{\frac{1}{4}}} = A$, 则由上式可得 $A = \frac{4}{A}$, 解得 $A = 2$.

但是注意我们事先并没有论证上式最后一个极限存在, 所以不满足 Stolz 定理的条件, 这导致前面的等号都不一定成立. 因此不可以“解方程”得到所求极限为 2.

2. 上述证明中最后一步求原式平方的极限而不求其他次方的极限的原因: 我们也可以待定系数自己探索出数列的阶并算出这样的结果, 待定 $a, b > 0$, 则由 Stolz 定理可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^a}{n^b} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1}^a - x_n^a}{bn^{b-1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(x_n + \frac{1}{x_n \sqrt{n}}\right)^a - x_n^a}{bn^{b-1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^a \left(\left(1 + \frac{1}{x_n \sqrt{n}}\right)^a - 1\right)}{bn^{b-1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^a \frac{a}{x_n^2 \sqrt{n}}}{bn^{b-1}} = \frac{a}{b} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^{a-2}}{n^{b-\frac{1}{2}}}.$$

我们希望上式最后一个极限能够直接算出具体的数, 因此令 $a = 2, b = \frac{1}{2}$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^a}{n^b} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^2}{\sqrt{n}} = \frac{a}{b} = 4$. 故

实际书写中我们只需要利用 Stolz 定理求出 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^2}{\sqrt{n}}$ 即可.

类似题目的最后一步求的极限式都是通过这种待定系数的方式得到的, 并不是靠猜.

例题 2.60 设 $0 < x_0 < y_0 < \frac{\pi}{2}$, $x_{n+1} = \sin x_n$, $y_{n+1} = \sin y_n$ ($n \geq 0$). 证明: $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{x_n}{y_n} = 1$.

证明 因为 $x_{n+1} = \sin x_n < x_n$ ($n \geq 0$), 所以数列 $\{x_n\}$ 严格递减有下界. 设 $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = a$, 则 $\sin a = a$, 于是 $a = 0$, 即 $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = 0$. 同理, $\lim_{n \rightarrow +\infty} y_n = 0$.

另外, 由 $0 < x_0 < y_0 < \frac{\pi}{2}$ 可以推得 $0 < x_n < y_n < \frac{\pi}{2}$ ($n \geq 0$). 取正整数 ℓ 使得 $y_\ell < x_0$, 则 $y_\ell < x_0 < y_0$, 从而对任意的正整数 n 有

$$y_{n+\ell} < x_n < y_n$$

进而

$$\frac{y_{n+\ell}}{y_n} < \frac{x_n}{y_n} < 1$$

注意到 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{y_{n+\ell}}{y_n} = 1$, 由夹逼准则即得 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{x_n}{y_n} = 1$.

□

注 事实上, 通过待定系数, 利用 Stolz 公式做形式计算可以得到 x_n 的阶. 待定 $\alpha, \beta > 0$, 由 Stolz 公式可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} n^\beta x_n^\alpha &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^\beta}{\frac{1}{x_n^\alpha}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\beta n^{\beta-1}}{\frac{1}{\sin^\alpha x_n} - \frac{1}{x_n^\alpha}} \\ &= \beta \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\beta-1} x_n^\alpha \sin^\alpha x_n}{x_n^\alpha - \sin^\alpha x_n} = \beta \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\beta-1} x_n^{2\alpha}}{x_n^\alpha - (x_n - \frac{1}{6}x_n^3 + o(x_n^3))^\alpha} \\ &= \beta \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\beta-1} x_n^{2\alpha}}{C_\alpha^1 x_n^{\alpha-1} \cdot \frac{1}{6}x_n^3 + o(x_n^{\alpha+2})} = \frac{6\beta}{\alpha} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\beta-1}}{x_n^{2-\alpha} + o(x_n^{2-\alpha})}. \end{aligned}$$

于是取 $\alpha = 2, \beta = 1$, 可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} nx_n^2 = \frac{6 \cdot 1}{2} = 3$. 同理可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} ny_n^2 = 3$. 故 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt{n}x_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt{ny_n} = \sqrt{3}$.

例题 2.61 设 $k \geq 2, a_0 > 0, a_{n+1} = a_n + \frac{1}{\sqrt[k]{a_n}}$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{k+1}}{n^k}$.

笔记 这题很容易能猜出要先对原极限开 k 次方再用 Stolz 定理求解.

实际上, 我们也可以同例题 2.59 一样, 待定系数自己探索出数列的阶并算出这样的结果, 待定 $a, b > 0$, 则由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{a(k+1)}}{n^{bk}} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}^{a(k+1)} - a_n^{a(k+1)}}{bkn^{bk-1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(a_n + a_n^{-\frac{1}{k}}\right)^{a(k+1)} - a_n^{a(k+1)}}{bkn^{bk-1}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{a(k+1)} \left[\left(1 + a_n^{-\frac{1}{k}-1}\right)^{a(k+1)} - 1\right]}{bkn^{bk-1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{a(k+1) \frac{1}{k+1}}}{bkn^{bk-1}} = \frac{k+1}{bk^2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{a(k+1)-\frac{k+1}{k}}}{n^{bk-1}}. \end{aligned}$$

我们希望上式最后一个极限能够直接算出具体的数值, 因此令 $a = b = \frac{1}{k}$, 于是 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{a(k+1)}}{n^{bk}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{1+\frac{1}{k}}}{n^{bk}} = \frac{k+1}{k^2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{\frac{k+1}{k}-\frac{k+1}{k}}}{n^{\frac{k}{k}-1}} = \frac{k+1}{k}$. 故实际书写中我们只需要利用 Stolz 定理求出 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{1+\frac{1}{k}}}{n}$ 即可.

证明 归纳易证 a_n 单调递增, 假设 a_n 有界, 则由单调有界定理可知, a_n 收敛, 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = A < \infty$. 则由递推条件可得, $A = A + \frac{1}{\sqrt[k]{A}}$, 无解, 矛盾. 于是 a_n 单调递增且无上界, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = +\infty$. 根据 Stolz 公式有

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{1+\frac{1}{k}}}{n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(a_{n+1}^{1+\frac{1}{k}} - a_n^{1+\frac{1}{k}} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(a_n + a_n^{-\frac{1}{k}} \right)^{1+\frac{1}{k}} - a_n^{1+\frac{1}{k}} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n^{1+\frac{1}{k}} \left(\left(1 + a_n^{-\frac{1}{k}-1} \right)^{1+\frac{1}{k}} - 1 \right) \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} x^{1+\frac{1}{k}} \left(\left(1 + x^{-(1+\frac{1}{k})} \right)^{1+\frac{1}{k}} - 1 \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} x^{1+\frac{1}{k}} \left(1 + \frac{1}{k} \right) x^{-(1+\frac{1}{k})} = 1 + \frac{1}{k} \end{aligned}$$

因此所求极限是 $\left(1 + \frac{1}{k}\right)^k$.

□

注 如果题目没给出需要求的极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{k+1}}{n^k}$, 而是问求 a_n 的渐近展开式 (只展开一项), 那么我们就需要待定系数自己探索 a_n 的阶. 待定 $\alpha > 0$, 由二项式定理得到

$$\begin{aligned} a_{n+1}^\alpha &= \left(a_n + \frac{1}{\sqrt[k]{a_n}} \right)^\alpha = a_n^\alpha + \alpha a_n^{\alpha-1} \frac{1}{\sqrt[k]{a_n}} + o\left(a_n^{\alpha-1-\frac{1}{k}}\right) \\ \Rightarrow a_{n+1}^\alpha &\approx a_n^\alpha + \alpha a_n^{\alpha-1-\frac{1}{k}} \Rightarrow a_{n+1}^\alpha - a_n^\alpha \approx \alpha a_n^{\alpha-1-\frac{1}{k}}. \end{aligned}$$

从而令 $\alpha = 1 + \frac{1}{k}$, 则

$$a_{n+1}^{1+\frac{1}{k}} = a_{n+1}^\alpha = \sum_{k=1}^n (a_{k+1}^\alpha - a_k^\alpha) \approx \sum_{k=1}^n \alpha a_k^{\alpha-1-\frac{1}{k}} = \sum_{k=1}^n \alpha = \alpha n = \frac{k+1}{k} n.$$

这样就能写出 a_n 渐近展开式的第一项, 即 $a_n = \left(\frac{kn}{k+1} \right)^{1+\frac{1}{k}} + o\left(n^{1+\frac{1}{k}}\right)$.

例题 2.62 设 k 为正整数, 正数列 $\{x_n\}$ 满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n(x_1^k + x_2^k + \dots + x_n^k) = 1$, 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} nx_n^{k+1} = \frac{1}{k+1}$.

证明 设 $S_n = x_1^k + x_2^k + \dots + x_n^k$, 则 S_n 单调递增. 如果 S_n 有界, 则 x_n 趋于零, $x_n S_n \rightarrow 0$, 这与已知条件矛盾, 所以 S_n 单调递增趋于正无穷, 进一步结合条件可知 x_n 趋于零. 注意到

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1} S_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1} S_{n+1} S_n}{S_{n+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n}{S_{n+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{1 + \frac{x_{n+1}}{S_{n+1}}} = 1.$$

下面运用等价无穷小替换和 Stolz 公式来求极限:

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} nx_n^{k+1} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{nx_n^{k+1} S_n^{k+1}}{S_n^{k+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{S_n^{k+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{S_{n+1}^{k+1} - S_n^{k+1}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(S_{n+1} - S_n)(S_{n+1}^k + S_{n+1}^{k-1} S_n + \dots + S_{n+1} S_n^{k-1} + S_n^k)} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{x_{n+1}^k (S_{n+1}^k + S_{n+1}^{k-1} S_n + \dots + S_{n+1} S_n^{k-1} + S_n^k)} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(x_{n+1} S_{n+1})^k + (x_{n+1} S_{n+1})^{k-1} (x_{n+1} S_n) + \dots + (x_{n+1} S_{n+1}) (x_{n+1} S_n)^{k-1} + (x_{n+1} S_n)^k} \\ &= \frac{1}{k+1}. \end{aligned}$$

□

例题 2.63 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \sum_{k=1}^n a_k^2 = 1$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[3]{n} a_n$.

解 因为 $\left\{ \sum_{k=1}^n a_k^2 \right\}$ 单调递增, 故由单调有界定理可知, $\left\{ \sum_{k=1}^n a_k^2 \right\}$ 的极限要么为有限数, 要么为 $+\infty$. 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n a_k^2 = c < \infty$, 则由级数收敛知 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, 于是 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \sum_{k=1}^n a_k^2 = 0 \neq 1$ 矛盾! 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n a_k^2 = +\infty$. 从而

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n \sum_{k=1}^n a_k^2 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sum_{k=1}^n a_k^2} = 0.$$

并且由 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \sum_{k=1}^n a_k^2 = 1$ 可知 $a_n \sim \frac{1}{\sum_{k=1}^n a_k^2}, n \rightarrow \infty$. 于是

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{na_n^3} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(\sum_{k=1}^n a_k^2 \right)^3}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\left(\sum_{k=1}^{n+1} a_k^2 \right)^3 - \left(\sum_{k=1}^n a_k^2 \right)^3 \right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\left(a_{n+1}^2 + \sum_{k=1}^n a_k^2 \right)^3 - \left(\sum_{k=1}^n a_k^2 \right)^3 \right] \end{aligned}$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n a_k^2 \right)^3 \left[\left(\frac{a_{n+1}^2}{\sum_{k=1}^n a_k^2} + 1 \right)^3 - 1 \right]$$

又由于 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}^2}{\sum_{k=1}^n a_k^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1}^2 a_n = 0$, 因此由 Taylor 公式可知 $\left(\frac{a_{n+1}^2}{\sum_{k=1}^n a_k^2} + 1 \right)^3 - 1 \sim \frac{3a_{n+1}^2}{\sum_{k=1}^n a_k^2}, n \rightarrow \infty$. 从而上式可化为

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{na_n^3} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n a_k^2 \right)^3 \left[\left(\frac{a_{n+1}^2}{\sum_{k=1}^n a_k^2} + 1 \right)^3 - 1 \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n a_k^2 \right)^3 \frac{3a_{n+1}^2}{\sum_{k=1}^n a_k^2} \\ &= 3 \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1}^2 \left(\sum_{k=1}^n a_k^2 \right)^2 = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1}^2 \left(\sum_{k=1}^{n+1} a_k^2 - a_{n+1}^2 \right)^2 \\ &= 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \left[a_{n+1}^2 \left(\sum_{k=1}^{n+1} a_k^2 \right)^2 - 2a_{n+1}^4 \sum_{k=1}^{n+1} a_k^2 + a_{n+1}^6 \right] \\ &= 3 + 0 + 0 = 3. \end{aligned}$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[3]{na_n} = \frac{1}{\sqrt[3]{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{na_n^3}}} = \frac{1}{\sqrt[3]{3}}$.

□

例题 2.64

1. 设 $x_{n+1} = \ln(1+x_n)$, $n = 1, 2, \dots$, $x_1 > 0$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n(nx_n - 2)}{\ln n}$.
2. 设 $x_{n+1} = \sin x_n$, $n = 1, 2, \dots$, $x_1 \in (0, \pi)$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\ln n} (1 - \sqrt{\frac{n}{3}} x_n)$.
3. 设 $x_1 = 1$, $x_{n+1} = x_n + \frac{1}{x_n}$, $n = 1, 2, \dots$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2n}(x_n - \sqrt{2n})}{\ln n}$.

解

1. 由 $\ln(1+x) \leq x, \forall x \in \mathbb{R}$ 可知 $x_{n+1} \leq x_n, \forall n \in \mathbb{N}$. 并且 $x_1 > 0$, 假设 $x_n > 0$, 则 $x_{n+1} = \ln(1+x_n) > 0$. 从而由数学归纳法, 可知 $x_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$. 于是由单调有界定理, 可知数列 $\{x_n\}$ 收敛. 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a \geq 0$. 对 $x_{n+1} = \ln(1+x_n)$ 两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 可得

$$a = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \ln(1+x_n) = \ln(1+a).$$

故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a = 0$. 进而, 由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{nx_n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{x_n}}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{x_{n+1}} - \frac{1}{x_n} \right) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\ln(1+x_n)} - \frac{1}{x_n} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\ln(1+x)} - \frac{1}{x} \right) \\ &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \ln(1+x)}{x \ln(1+x)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \left(x - \frac{x^2}{2} + o(x^2) \right)}{x^2} = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} nx_n = 2$. 即 $x_n \sim \frac{2}{n}, n \rightarrow \infty$.

因而, 再结合 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n(nx_n - 2)}{\ln n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{nx_n \left(n - \frac{2}{x_n} \right)}{\ln n} = 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n - \frac{2}{x_n}}{\ln n} \\ &= 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 + \frac{2}{x_n} - \frac{2}{x_{n+1}}}{\ln \left(1 + \frac{1}{n} \right)} = 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 + \frac{2}{x_n} - \frac{2}{x_{n+1}}}{\frac{1}{n}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 + \frac{2}{x_n} - \frac{2}{\ln(1+x_n)}}{\frac{x_n}{2}} = 4 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 + \frac{2}{x} - \frac{2}{\ln(1+x)}}{x} \\
&= 4 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(x+2)\ln(1+x) - 2x}{x^2 \ln(1+x)} = 4 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(x+2)\left(x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + o(x^3)\right) - 2x}{x^3} \\
&= 4 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-\frac{x^3}{2} + \frac{2x^3}{3} + o(x^3)}{x^3} = \frac{2}{3}.
\end{aligned}$$

实际上, 由上述计算我们可以得到 x_n 在 $n \rightarrow \infty$ 时的渐进估计:

$$\begin{aligned}
\frac{n(nx_n - 2)}{\ln n} &= \frac{2}{3} + o(1) \Rightarrow nx_n - 2 = \frac{2 \ln n}{3n} + o\left(\frac{\ln n}{n}\right) \\
\Rightarrow x_n &= \frac{2}{n} + \frac{2 \ln n}{3n^2} + o\left(\frac{\ln n}{n^2}\right), n \rightarrow \infty.
\end{aligned}$$

2. 由 $\sin x \leq x, \forall x \in \mathbb{R}$ 可知 $x_{n+1} \leq x_n, \forall n \in \mathbb{N}$. 又由于 $0 < x_1 < \pi$ 及 $0 < x_{n+1} = \sin x_n < 1, \forall n \in \mathbb{N}$, 故归纳可得 $0 \leq x_n \leq 1, \forall n \geq 2$. 因此 $\{x_n\}$ 极限存在, 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a < \infty$. 从而对 $x_{n+1} = \sin x_n$ 两边同时令 $n \rightarrow \infty$ 可得

$$a = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sin x_n = \sin a.$$

故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a = 0$. 于是由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned}
\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3}{nx_n^2} &= 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{x_n^2}}{n} = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{x_{n+1}^2} - \frac{1}{x_n^2} \right) = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\sin^2 x_n} - \frac{1}{x_n^2} \right) \\
&= 3 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 - \sin^2 x}{x^2 \sin^2 x} = 3 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 - \left(x - \frac{x^3}{3!} + o(x^3)\right)^2}{x^4} \\
&= 3 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{x^4}{3} + o(x^4)}{x^4} = 1.
\end{aligned}$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{n}{3}} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{\frac{3}{nx_n^2}}} = 1$, $\lim_{n \rightarrow \infty} nx_n^2 = 3$. 即 $x_n \sim \sqrt{\frac{3}{n}}, n \rightarrow \infty$. 进而, 再结合 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned}
\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\ln n} \left(1 - \sqrt{\frac{n}{3}} x_n\right) &\xrightarrow{\text{平方差公式/有理化}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \left(1 - \frac{n}{3} x_n^2\right)}{\ln n \left(1 + \sqrt{\frac{n}{3}} x_n\right)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{nx_n^2 \left(\frac{1}{x_n^2} - \frac{n}{3}\right)}{\ln n \left(1 + \sqrt{\frac{n}{3}} x_n\right)} \\
&= \frac{3}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{x_n^2} - \frac{n}{3}}{\ln n} = \frac{3}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{x_{n+1}^2} - \frac{1}{x_n^2} - \frac{1}{3}}{\ln \left(1 + \frac{1}{n}\right)} \\
&= \frac{3}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{\sin^2 x_n} - \frac{1}{x_n^2} - \frac{1}{3}}{\frac{1}{n}} = \frac{3}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{\sin^2 x_n} - \frac{1}{x_n^2} - \frac{1}{3}}{\frac{x_n^2}{3}} \\
&= \frac{9}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{\sin^2 x} - \frac{1}{x^2} - \frac{1}{3}}{x^2} = \frac{9}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 - \sin^2 x - \frac{1}{3}x^2 \sin^2 x}{x^4 \sin^2 x} \\
&= \frac{9}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 - \left(x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + o(x^5)\right)^2 - \frac{1}{3}x^2 \left(x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + o(x^5)\right)^2}{x^6} \\
&= \frac{9}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-\frac{x^6}{36} - \frac{x^6}{60} + \frac{x^6}{9} + o(x^6)}{x^6} = \frac{3}{10}.
\end{aligned}$$

(最后几步的计算除了用 Taylor 展开也可以用洛朗展开计算, 即先用长除法算出 $\frac{1}{\sin^2 x} = \frac{1}{x^2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{15}x^2 + o(x^2)$, 再直接带入计算得到结果, 实际上利用洛朗展开计算更加简便.)

3. 由条件可知 $x_{n+1} = x_n + \frac{1}{x_n} \geq x_n, \forall n \in \mathbb{N}$. 又 $x_1 = 1 > 0$, 故归纳可得 $x_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$. 由单调有界定理可知数列 $\{x_n\}$ 的极限要么是 $+\infty$, 要么是有限数. 假设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a < \infty$, 则对 $x_{n+1} = x_n + \frac{1}{x_n}$ 两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 可得

$a = a + \frac{1}{a} \Rightarrow \frac{1}{a} = 0$ 矛盾. 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$. 于是由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{\sqrt{n}} &= \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^2}{n}} = \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1}^2 - x_n^2}{n+1-n}} = \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(x_n + \frac{1}{x_n} \right)^2 - x_n^2 \right)} \\ &= \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(2 + \frac{1}{x_n^2} \right)} = \sqrt{2}. \end{aligned}$$

因此 $x_n \sim \sqrt{2n}, n \rightarrow \infty$. 从而 $x_n + \sqrt{2n} \sim 2\sqrt{2n}, n \rightarrow \infty$. 再结合 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2n}(x_n - \sqrt{2n})}{\ln n} &\xrightarrow{\text{平方差公式/有理化}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2n}(x_n^2 - 2n)}{(x_n + \sqrt{2n}) \ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2n}(x_n^2 - 2n)}{2\sqrt{2n} \ln n} \\ &= \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^2 - 2n}{\ln n} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1}^2 - x_n^2 - 2}{\ln(n+1) - \ln n} \\ &= \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(x_n + \frac{1}{x_n} \right)^2 - x_n^2 - 2}{\frac{1}{n}} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(x_n + \frac{1}{x_n} \right)^2 - x_n^2 - 2}{\frac{2}{x_n^2}} \\ &= \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{2}{x_n^2}}{\frac{2}{x_n^2}} = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

□

例题 2.65 讨论级数 $\sum_{n=1}^{\infty} v_n^s$ 的敛散性, 其中 $v_1 = \sin x > 0, v_{n+1} = \sin v_n (n = 1, 2, \dots)$.

证明 由条件可知 $v_{n+1} = \sin v_n \leq v_n, \forall n \in \mathbb{N}$. 故 $\{v_n\}$ 递减且有下界 0. 因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} v_n = a \in [0, +\infty)$, 从而对 $v_{n+1} = \sin v_n$ 两边取极限得

$$a = \sin a \implies a = 0.$$

由 Stolz 公式得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} nv_n^2 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{v_{n+1}^2} - \frac{1}{v_n^2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{v_n^2 v_{n+1}^2}{v_n^2 - v_{n+1}^2} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{v_n^2 \sin^2 v_n}{v_n^2 - \sin^2 v_n} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^2 \sin^2 x}{x^2 - \sin^2 x} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^4}{x^2 - \left(x - \frac{x^3}{6} + o(x^3) \right)^2} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^4}{\frac{x^4}{3} + o(x^4)} = 3. \end{aligned}$$

故

$$v_n^2 \sim \frac{3}{n} \implies v_n \sim \sqrt{\frac{3}{n}}, \quad n \rightarrow \infty.$$

又 $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\sqrt{\frac{3}{n}} \right)^s = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{3}{n} \right)^{\frac{s}{2}}$ 当且仅当 $s > 2$ 时收敛, $s \leq 2$ 时发散. 故 $\sum_{n=1}^{\infty} v_n^s$ 当且仅当 $s > 2$ 时收敛, $s \leq 2$ 时发散.

□

例题 2.66 设 $a_1 = 1, a_{n+1} = a_n + \frac{1}{S_n}, S_n = \sum_{k=1}^n a_k$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{\sqrt{\ln n}}$.

解 由于 $a_{n+1} = a_n + \frac{1}{S_n}, \forall n \in \mathbb{N}$, 并且 $a_1 > 0$, 故由数学归纳法可知 $a_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$. 又 $a_2 = a_1 + a_1 > a_1$, 再根据递推式, 可以归纳得到数列 $\{a_n\}$ 单调递增. 因此, 数列 $\{a_n\}$ 要么 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a < \infty$, 要么 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = +\infty$. 由条件可知 $a_{n+1} - a_n = \frac{1}{S_n} \geq \frac{1}{na_1} = \frac{1}{n}, \forall n \in \mathbb{N}$. 从而对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$a_n = a_n - a_{n-1} + a_{n-1} - a_{n-2} + \dots + a_2 - a_1 \geq \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} + \dots + 1 = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k}.$$

而 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k} = +\infty$, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = +\infty$. 于是由 Stolz 定理, 可知

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^2}{\ln n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}^2 - a_n^2}{\ln(1 + \frac{1}{n})} = \lim_{n \rightarrow \infty} n(a_{n+1}^2 - a_n^2) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \left[\left(a_n + \frac{1}{S_n} \right)^2 - a_n^2 \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{2a_n}{S_n} + \frac{1}{S_n^2} \right). \end{aligned}$$

根据 Stolz 定理, 可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{S_n^2} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_{n+1}^2} = 0; \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{na_n}{S_n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)a_{n+1} - na_n}{a_{n+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[n + 1 - \frac{na_n}{a_{n+1}} \right]. \end{aligned}$$

由递推公式, 可得对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 有

$$\begin{aligned} 1 = n + 1 - n &\leq n + 1 - \frac{na_n}{a_{n+1}} = n + 1 - \frac{na_n}{a_n + \frac{1}{S_n}} = 1 + \frac{\frac{n}{a_n S_n}}{1 + \frac{1}{a_n S_n}} \\ &= 1 + \frac{n}{1 + a_n S_n} \leq 1 + \frac{n}{1 + a_1 S_n} = 1 + \frac{n}{1 + S_n}. \end{aligned}$$

又由 Stolz 定理, 可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{1 + S_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_{n+1}} = 0$. 故由夹逼准则可知, $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{na_n}{S_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[n + 1 - \frac{na_n}{a_{n+1}} \right] = 1$. 于是

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^2}{\ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{2a_n}{S_n} + \frac{1}{S_n^2} \right) = 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{na_n}{S_n} + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{S_n^2} = 2 + 0 = 2.$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{\sqrt{\ln n}} = \sqrt{2}$.

□

2.5.2 函数 Stolz 定理

定理 2.10 (函数 Stolz 定理)

设 $T > 0, f, g : [0, +\infty) \rightarrow \mathbb{R}$ 是内闭有界函数.

(1) 设 $g(x+T) > g(x)$, 若有 $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = +\infty$ 且

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x+T) - f(x)}{g(x+T) - g(x)} = A \in \mathbb{R} \cup \{-\infty, +\infty\}.$$

则有

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = A.$$

(2) 设 $0 < g(x+T) < g(x)$, 若有

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = 0,$$

且

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x+T) - f(x)}{g(x+T) - g(x)} = A \in \mathbb{R} \cup \{-\infty, +\infty\}.$$

则有

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = A.$$

♡

注 考试中, 如果要用函数 Stolz 定理, 不要直接证明这个抽象的版本 (直接证明这个定理太繁琐). 而是根据具体问题, 利用夹逼准则和数列 Stolz 定理进行证明. 具体可见例题 2.67.

证明 我们仅考虑 $A \in \mathbb{R}$, 其余情况类似, 为了书写方便, 我们不妨设 $A = 0$, 否则用 $f - Ag$ 代替 f 即可. 不妨设 $T = 1$, 否则用 $f(Tx)$ 代替 f 即可.

(1) 对任何 $\varepsilon > 0$, 由条件知存在某个 $X \in \mathbb{N}$, 使得对任何 $x > X$ 都有

$$|f(x+1) - f(x)| < \varepsilon[g(x+1) - g(x)], g(x) > 0. \quad (2.56)$$

于是对 $\forall x > X$, 利用(2.56)式, 我们有

$$\begin{aligned} \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| &= \left| \frac{\sum_{k=1}^{[x]-X} [f(x-k+1) - f(x-k)]}{g(x)} + \frac{f(x-[x]+X)}{g(x)} \right| \\ &\leq \left| \frac{\sum_{k=1}^{[x]-X} [f(x-k+1) - f(x-k)]}{g(x)} \right| + \left| \frac{f(x-[x]+X)}{g(x)} \right| \\ &\stackrel{(2.56) \text{ 式}}{\leq} \varepsilon \frac{\sum_{k=1}^{[x]-X} [g(x-k+1) - g(x-k)]}{|g(x)|} + \left| \frac{f(x-[x]+X)}{g(x)} \right| \\ &= \varepsilon \frac{g(x) - g(x-[x]+X)}{|g(x)|} + \left| \frac{f(x-[x]+X)}{g(x)} \right| \\ &\stackrel{g>0}{\leq} \varepsilon + \left| \frac{f(x-[x]+X)}{g(x)} \right|. \end{aligned}$$

于是利用 f 在 $[X, X+1]$ 有界及 $X \leq x - [x] + X < X+1$, 我们有

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| \leq \varepsilon,$$

由 ε 任意性即得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = 0.$$

这就完成了证明.

(2) 任何 $\varepsilon > 0$, 由条件可知存在某个 $X \in \mathbb{N}$, 使得对任何 $x > X$ 都有

$$|f(x+1) - f(x)| < \varepsilon[g(x) - g(x+1)]. \quad (2.57)$$

于是对 $\forall x > X, \forall n \in \mathbb{N}$, 利用(2.57)可得

$$\begin{aligned} \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| &= \left| \frac{\sum_{k=1}^n [f(x+k-1) - f(x+k)] + f(x+n)}{g(x)} \right| \\ &\leq \frac{\sum_{k=1}^n |f(x+k-1) - f(x+k)|}{g(x)} + \frac{|f(x+n)|}{g(x)} \\ &\leq \varepsilon \frac{\sum_{k=1}^n [g(x+k-1) - g(x+k)]}{g(x)} + \frac{|f(x+n)|}{g(x)} \\ &= \varepsilon \frac{g(x) - g(x+n)}{g(x)} + \frac{|f(x+n)|}{g(x)} \\ &\leq \varepsilon + \frac{|f(x+n)|}{g(x)}. \end{aligned}$$

再利用 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = 0$ 得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|f(x+n)|}{g(x)} = 0 \Rightarrow \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| \leq \varepsilon, \forall x > X.$$

从而结论得证.

□

例题 2.67

$$(1) \text{ 设 } \alpha > -1, \text{ 计算 } \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}}.$$

$$(2) \text{ 计算 } \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln x}.$$

$$(3) \text{ 计算 } \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \int_0^x (t - [t]) dt, \text{ 这里 } [\cdot] \text{ 表示向下取整函数.}$$

笔记 虽然这几个问题的思路都是函数 Stolz 定理, 但是注意在考试中我们不能直接使用这个定理, 需要我们结合具体问题给出这个定理的证明. 具体可见下述证明.

注 第(1)题如果直接洛必达得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{|\sin x|}{\alpha+1} \text{ 不存在,}$$

因此无法运用洛必达, 但也无法判断原本的极限, 而需要其他方法确定其极限.

证明

(1) 直接使用函数 Stolz 定理: 由函数 Stolz 定理、Lagrange 中值定理和积分中值定理可知

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^{x+\pi} t^\alpha |\sin t| dt - \int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{(x+\pi)^{\alpha+1} - x^{\alpha+1}} \\ &\xrightarrow{\text{Lagrange 中值定理}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_x^{x+\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{\pi(\alpha+1)x^\alpha} \xrightarrow{\text{积分中值定理}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\theta_x^\alpha \int_x^{x+\pi} |\sin t| dt}{\pi(\alpha+1)x^\alpha}, \end{aligned}$$

其中 $x \leq \theta_x \leq x+\pi$. 从而 $\theta_x \sim x, x \rightarrow +\infty$. 于是

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\theta_x^\alpha \int_x^{x+\pi} |\sin t| dt}{\pi(\alpha+1)x^\alpha} = \frac{1}{\pi(\alpha+1)} \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_x^{x+\pi} |\sin t| dt \\ &\xrightarrow{\text{定理 8.1}} \frac{1}{\pi(\alpha+1)} \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_0^\pi |\sin t| dt = \frac{2}{\pi(\alpha+1)}. \end{aligned}$$

不直接使用函数 Stolz 定理(考试中的书写): 对 $\forall x \in (0, +\infty)$, 存在唯一的 $n \in \mathbb{N}$, 使得 $n\pi \leq x \leq (n+1)\pi$. 故

$$\frac{\int_0^{n\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{[(n+1)\pi]^{\alpha+1}} \leq \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}} \leq \frac{\int_0^{(n+1)\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{(n\pi)^{\alpha+1}}, \forall x \in [0, +\infty). \quad (2.58)$$

又由数列 Stolz 定理、Lagrange 中值定理和积分中值定理可知

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^{(n+1)\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{(n\pi)^{\alpha+1}} &\xrightarrow{\text{Stolz 定理}} \frac{1}{\pi^{\alpha+1}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_{n\pi}^{(n+1)\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{(n+1)^{\alpha+1} - n^{\alpha+1}} \\ &\xrightarrow{\text{积分中值定理}} \frac{1}{\pi^{\alpha+1}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(n\pi)^\alpha \int_{n\pi}^{(n+1)\pi} |\sin t| dt}{(\alpha+1)n^{\alpha+1}} = \frac{2}{\pi(\alpha+1)}, \end{aligned} \quad (2.59)$$

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^{n\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{[(n+1)\pi]^{\alpha+1}} &\xrightarrow{\text{Stolz 定理}} \frac{1}{\pi^{\alpha+1}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_{(n-1)\pi}^{n\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{(n+1)^{\alpha+1} - n^{\alpha+1}} \\ &\xrightarrow{\text{积分中值定理}} \frac{1}{\pi^{\alpha+1}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(n\pi)^\alpha \int_{(n-1)\pi}^{n\pi} |\sin t| dt}{(\alpha+1)n^{\alpha+1}} = \frac{2}{\pi(\alpha+1)}. \end{aligned} \quad (2.60)$$

又因为 $n\pi \leq x \leq (n+1)\pi, \forall x \in (0, +\infty)$, 所以 $n \rightarrow +\infty$ 等价于 $x \rightarrow +\infty$. 于是利用(2.58)(2.59)(2.60)式, 由夹逼准则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}} = \frac{2}{\pi(\alpha+1)}.$$

(2) 直接使用函数 Stolz 定理: 由函数 Stolz 定理、Lagrange 中值定理和积分中值定理可知

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln x} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^{x+\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt - \int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln(x+\pi) - \ln x} \xrightarrow{\text{Lagrange 中值定理}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_x^{x+\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\frac{\pi}{x}} \\ &\xrightarrow{\text{积分中值定理}} \frac{1}{\pi} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{\theta_x} \int_x^{x+\pi} |\sin t| dt \xrightarrow{\text{定理 8.1}} \frac{1}{\pi} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{\theta_x} \int_0^\pi |\sin t| dt = \frac{2}{\pi} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{\theta_x}. \end{aligned} \quad (2.61)$$

其中 $x \leq \theta_x \leq x + \pi$. 从而 $\theta_x \sim x, x \rightarrow +\infty$. 再结合(2.61)式可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln x} = \frac{2}{\pi} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{\theta_x} = \frac{2}{\pi}.$$

不直接使用函数 Stolz 定理(考试中的书写):对 $\forall x \in (0, +\infty)$, 存在唯一的 $n \in \mathbb{N}$, 使得 $n\pi \leq x \leq (n+1)\pi$. 故

$$\frac{\int_0^{n\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln((n+1)\pi)} \leq \frac{\int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln x} \leq \frac{\int_0^{(n+1)\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln(n\pi)}, \forall x > 0. \quad (2.62)$$

又由数列 Stolz 定理和积分中值定理可知

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^{(n+1)\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln(n\pi)} &\xrightarrow{\text{Stolz 定理}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_{n\pi}^{(n+1)\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln(n\pi) - \ln((n-1)\pi)} \\ &\xrightarrow{\text{积分中值定理}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n\pi} \int_{n\pi}^{(n+1)\pi} |\sin t| dt}{\ln(1 + \frac{1}{n-1})} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2(n-1)}{n\pi} = \frac{2}{\pi}, \end{aligned} \quad (2.63)$$

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^{n\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln((n+1)\pi)} &\xrightarrow{\text{Stolz 定理}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_{n\pi}^{(n+1)\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln((n+2)\pi) - \ln((n+1)\pi)} \\ &\xrightarrow{\text{积分中值定理}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n\pi} \int_{n\pi}^{(n+1)\pi} |\sin t| dt}{\ln(1 + \frac{1}{n+1})} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2(n+1)}{n\pi} = \frac{2}{\pi}. \end{aligned} \quad (2.64)$$

又因为 $n\pi \leq x \leq (n+1)\pi, \forall x \in (0, +\infty)$, 所以 $n \rightarrow +\infty$ 等价于 $x \rightarrow +\infty$. 于是利用(2.62)(2.63)(2.64)式, 由夹逼准则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln x} = \frac{2}{\pi}.$$

(3) 直接使用函数 Stolz 定理: 注意到 $t - [t]$ 是 \mathbb{R} 上周期为 1 的非负函数, 故由函数 Stolz 定理可知

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \int_0^x (t - [t]) dt &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^{x+1} (t - [t]) dt - \int_0^x (t - [t]) dt}{x+1 - x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_x^{x+1} (t - [t]) dt \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_x^{x+1} (t - [t]) dt \xrightarrow{\text{定理 8.1}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_0^1 (t - [t]) dt = \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_0^1 t dt = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

不直接使用函数 Stolz 定理(考试中的书写):对 $\forall x \in (0, +\infty)$, 存在唯一的 $n \in \mathbb{N}$, 使得 $n \leq x \leq n+1$. 故

$$\frac{\int_0^n (t - [t]) dt}{n+1} \leq \frac{1}{x} \int_0^x (t - [t]) dt \leq \frac{\int_0^{n+1} (t - [t]) dt}{n}, \forall x > 0. \quad (2.65)$$

又由数列 Stolz 定理可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^{n+1} (t - [t]) dt}{n} \xrightarrow{\text{Stolz 定理}} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_n^{n+1} (t - [t]) dt = \int_0^1 (t - [t]) dt = \int_0^1 t dt = 1, \quad (2.66)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^n (t - [t]) dt}{n+1} \xrightarrow{\text{Stolz 定理}} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{n-1}^n (t - [t]) dt = \int_0^1 (t - [t]) dt = \int_0^1 t dt = 1. \quad (2.67)$$

又因为 $n \leq x \leq n+1, \forall x \in (0, +\infty)$, 所以 $n \rightarrow +\infty$ 等价于 $x \rightarrow +\infty$. 于是利用(2.65)(2.66)(2.67)式, 由夹逼准则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \int_0^x (t - [t]) dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{x} \int_0^x (t - [t]) dt = 1.$$

□

例题 2.68 设 φ 是 \mathbb{R} 上内闭黎曼可积且周期为 $T > 0$ 的函数, 计算

$$\lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{\ln \lambda} \int_0^T \frac{\varphi(\lambda x)}{x} dx \right),$$

其中 $\int_0^T \frac{\varphi(\lambda x)}{x} dx$ 在 $\lambda \in (0, +\infty)$ 收敛.

注 因为 $x = 0$ 是 $\int_0^T \frac{1}{x} dx$ 的奇点, 所以不能直接用 Riemann 引理计算.(这里也难以实现去奇点再使用 Riemann 引理的操作)

解 由函数 Stolz 定理知

$$\begin{aligned}\lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{\ln \lambda} \int_0^T \frac{\varphi(\lambda x)}{x} dx \right) &= \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{\ln \lambda} \int_0^{\lambda T} \frac{\varphi(x)}{x} dx \right) = \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{\ln(1 + \frac{1}{\lambda})} \int_{\lambda T}^{(\lambda+1)T} \frac{\varphi(x)}{x} dx \right) \\ &= \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \lambda \int_0^T \frac{\varphi(x + \lambda T)}{x + \lambda T} dx = \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \int_0^T \frac{\lambda}{x + \lambda T} \varphi(x) dx.\end{aligned}$$

注意到

$$\begin{aligned}\overline{\lim}_{\lambda \rightarrow +\infty} \left(\int_0^T \frac{\lambda}{x + \lambda T} \varphi(x) dx - \frac{1}{T} \int_0^T \varphi(x) dx \right) &\leq \overline{\lim}_{\lambda \rightarrow +\infty} \int_0^T \frac{x}{T(x + \lambda T)} \varphi(x) dx \\ &\leq \overline{\lim}_{\lambda \rightarrow +\infty} \int_0^T \frac{x}{\lambda T^2} \varphi(x) dx \leq \frac{1}{T^2} \overline{\lim}_{\lambda \rightarrow +\infty} \frac{1}{\lambda} \int_0^T x |\varphi(x)| dx = 0.\end{aligned}$$

故

$$\lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{\ln \lambda} \int_0^T \frac{\varphi(\lambda x)}{x} dx \right) = \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \int_0^T \frac{\lambda}{x + \lambda T} \varphi(x) dx = \frac{1}{T} \int_0^T \varphi(x) dx.$$

□

2.6 递推数列求极限和估阶

2.6.1 “折线图(蛛网图)”分析法

关于递推数列求极限的问题, 可以先画出相应的“折线图”, 然后根据“折线图(蛛网图)”的性质来判断数列的极限. 这种方法可以帮助我们快速得到数列的极限, 但是对于数列的估阶问题, 这种方法并不适用.

注 这种方法只能用来分析问题, 严谨的证明还是需要用单调性分析法或压缩映像法书写.

一般的递推数列问题, 我们先画“折线图(蛛网图)”分析, 分析出数列(或奇偶子列)的收敛情况, 就再用单调分析法或压缩映像法严谨地书写证明.

如果递推函数是单调递增的, 则画蛛网图分析起来非常方便, 书写证明过程往往用单调有界(单调性分析法)就能解决问题.

例题 2.69 设 $u_1 = b, u_{n+1} = u_n^2 + (1 - 2a)u_n + a^2$, 求 a, b 的值使得 u_n 收敛, 并求其极限.

笔记 显然递推函数只有一个不动点 $x = a$, 画蛛网图分析能够快速地得到取不同初值时, u_n 的收敛情况. 但是注意需要严谨地书写证明过程.

解 由条件可得

$$u_{n+1} = u_n^2 + (1 - 2a)u_n + a^2 = (u_n - a)^2 + u_n \geq u_n.$$

故 u_n 单调递增. (i) 若 $b > a$, 则由 u_n 单调递增可知, $u_n > a, \forall n \in \mathbb{N}$. 又由单调有界定理可知 u_n 要么发散到 $+\infty$, 要么收敛到一个有限数. 假设 u_n 收敛, 则可设 $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = u > u_1 > a$. 从而由递推条件可得

$$u = (u - a)^2 + u \Rightarrow u = a$$

矛盾. 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = +\infty$.

(ii) 若 $b = a$, 则由递推条件归纳可得 $u_n = a, \forall n \in \mathbb{N}$.

(iii) 若 $b \in [a - 1, a]$, 令 $f(x) = x^2 + (1 - 2a)x + a^2$, 则

$$a - 1 < a - \frac{1}{4} = f\left(\frac{2a - 1}{2}\right) \leq f(x) \leq \max\{f(a - 1), f(a)\} = a, \forall x \in [a - 1, a].$$

由于 $u_1 = b \in [a - 1, a]$, 假设 $u_n \in [a - 1, a]$, 则

$$a - 1 \leq u_{n+1} = f(u_n) \leq a.$$

由数学归纳法可得 $u_n \in [a - 1, a], \forall n \in \mathbb{N}$. 于是由单调有界定理可知 u_n 收敛. 再对 $u_{n+1} = u_n^2 + (1 - 2a)u_n + a^2$ 两边同时取极限, 解得 $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = a$.

(iv) 若 $b < a - 1$, 则

$$u_2 = (u_1 - a)^2 + u_1 > a \Leftrightarrow (b - a)^2 + b > a \Leftrightarrow (b - a)(b - a + 1) > 0.$$

由 $b < a - 1$ 可知上式最后一个不等式显然成立, 故 $u_2 > a$. 于是由 (i) 同理可证 $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = +\infty$.

综上, 只有当 $a \in \mathbb{R}, b \in [a - 1, a]$ 时, 数列 u_n 才收敛, 极限为 a . □

例题 2.70 设 $x_1 > 0, x_1 \neq 1, x_{n+1} = \frac{x_n^2}{2(x_n - 1)}$, 证明 x_n 收敛并求极限.

笔记 显然递推函数有两个不动点 $x = 0, 2$, 画蛛网图分析能够快速地得到取不同初值时, x_n 的收敛情况. 这里利用压缩映像书写过程更加简便.

解 (i) 如果 $x_1 > 1$, 则归纳易证 $x_n \geq 2, \forall n \geq 2$, 所以

$$|x_{n+1} - 2| = \left| \frac{x_n^2}{2(x_n - 1)} - 2 \right| = \frac{(x_n - 2)^2}{2(x_n - 1)} = |x_n - 2| \left| \frac{x_n - 2}{2(x_n - 1)} \right| \leq \frac{1}{2} |x_n - 2| \leq \cdots \leq \frac{1}{2^n} |x_1 - 2|$$

令 $n \rightarrow \infty$, 由此可知 x_n 的极限是 2.

(ii) 如果 $x_1 \in (0, 1)$, 则归纳易证 $x_n \leq 0, \forall n \geq 2$, 所以

$$|x_{n+1}| = \left| \frac{x_n^2}{2(x_n - 1)} \right| = |x_n| \left| \frac{x_n}{2(x_n - 1)} \right| \leq \frac{1}{2} |x_n| \leq \cdots \leq \frac{1}{2^n} |x_1|$$

令 $n \rightarrow \infty$, 由此可知 x_n 的极限是 0. □

例题 2.71 设 $S_1 = 1, S_{n+1} = S_n + \frac{1}{S_n} - \sqrt{2}$, 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

笔记 递推函数性质及例题分析递推函数递减时候, 意味着奇偶两个子列具有相反的单调性, 本题没有产生新的不动点, 是容易的.

画蛛网图分析表明递推函数 (在 $(0, 1)$ 内) 是递减的, 所以数列不单调, 但是奇偶子列分别单调, 并且 (这一步只能说“似乎”, 因为对于不同的递减的递推式, 可能结论是不一样的, 取决于二次复合有没有新的不动点) 奇子列单调递增趋于 $\frac{1}{\sqrt{2}}$, 偶子列单调递减趋于 $\frac{1}{\sqrt{2}}$, 数列的范围自然是在 $[S_1, S_2]$ 之间, 显然不动点只有 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 一个, 因此证明单调有界即可解决问题.

证明 $S_1 = 1, S_2 = 2 - \sqrt{2}$, 先证明 $S_n \in [2 - \sqrt{2}, 1]$ 恒成立, 采用归纳法. $n = 1, 2$ 时显然成立, 如果 n 时成立, 则 $n+1$ 时, 注意 $f(x) = x + \frac{1}{x} - \sqrt{2}$ 在区间 $(0, 1)$ 中单调递减, 所以

$$2 - \sqrt{2} \leq S_{n+1} = S_n + \frac{1}{S_n} - \sqrt{2} \leq 2 - \sqrt{2} + \frac{1}{2 - \sqrt{2}} - \sqrt{2} = 2 - 2\sqrt{2} + \frac{2 + \sqrt{2}}{2} = 3 - \frac{3}{2}\sqrt{2} \leq 1$$

这就证明了 S_n 是有界数列, 且 $S_3 \leq S_1, S_4 \geq S_2$, 下面证明 S_{2n-1} 递减, S_{2n} 递增: 注意函数 $f(x) = x + \frac{1}{x} - \sqrt{2}$ 在区间 $(0, 1)$ 中单调递减, 所以如果已知 $S_{2n+1} \leq S_{2n-1}, S_{2n+2} \geq S_{2n}$, 则

$$S_{2n+3} = f(S_{2n+2}) \leq f(S_{2n}) = S_{2n+1}, S_{2n+4} = f(S_{2n+3}) \geq f(S_{2n+1}) = S_{2n+2}$$

根据归纳法可得单调性, 这说明 S_{2n-1}, S_{2n} 都是单调有界的, 因此极限存在, 设

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_{2n-1} = a, \lim_{n \rightarrow \infty} S_{2n} = b, a, b \in [2 - \sqrt{2}, 1]$$

在递推式 $S_{n+1} = S_n + \frac{1}{S_n} - \sqrt{2}$ 中分别让 n 取奇数, 偶数, 然后令 $n \rightarrow \infty$ 取极限, 可得关于极限 a, b 的方程组 $a = b + \frac{1}{b} - \sqrt{2}, b = a + \frac{1}{a} - \sqrt{2}$, 希望证明 $a = b = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 为了解这个方程组, 三种方法:

方法一: 直接硬算, 将其中一个式子代入到另一个中

$$\begin{aligned} a &= b + \frac{1}{b} - \sqrt{2} = a + \frac{1}{a} - \sqrt{2} + \frac{1}{a + \frac{1}{a} - \sqrt{2}} - \sqrt{2} = \frac{1 - 3\sqrt{2}a + 7a^2 - 3\sqrt{2}a^3 + a^4}{a(1 - \sqrt{2}a + a^2)} \\ &1 - 3\sqrt{2}a + 7a^2 - 3\sqrt{2}a^3 + a^4 - a^2(1 - \sqrt{2}a + a^2) = -(\sqrt{2}a - 1)^3 = 0 \end{aligned}$$

由此可知 $a = b = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 所以数列 S_n 收敛于 $\frac{1}{\sqrt{2}}$.

方法二: 上面硬算起来实在太麻烦了, 我们可以先对递推式变形化简, 减小计算量

$$\begin{aligned} S_{n+1} &= S_n + \frac{1}{S_n} - \sqrt{2} = \frac{S_n^2 - \sqrt{2}S_n + 1}{S_n} = \frac{\left(S_n - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 + \frac{1}{2}}{S_n} \\ \implies S_{n+1} - \frac{\sqrt{2}}{2} &= \frac{\left(S_n - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2}S_n}{S_n} = \frac{\left(S_n - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)(S_n - \sqrt{2})}{S_n}. \end{aligned}$$

然后对奇偶子列 (代入递推式) 分别取极限可得方程组

$$a - \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{\left(b - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)(b - \sqrt{2})}{b}, b - \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{\left(a - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)(a - \sqrt{2})}{a}$$

如果 a, b 之中有一个是 $\frac{1}{\sqrt{2}}$, 则另一个也是, 显然数列 S_n 收敛于 $\frac{1}{\sqrt{2}}$, 如果都不是则

$$\begin{aligned} a - \frac{\sqrt{2}}{2} &= \frac{\left(b - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)(b - \sqrt{2})}{b} = \frac{\left(a - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)(a - \sqrt{2})(b - \sqrt{2})}{ab} \\ \Rightarrow (a - \sqrt{2})(b - \sqrt{2}) - ab &= 2 - \sqrt{2}(a + b) = 0 \Rightarrow a + b = \sqrt{2} \\ \Rightarrow a - \frac{\sqrt{2}}{2} &= \frac{\sqrt{2}}{2} - b = \frac{\left(b - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)(b - \sqrt{2})}{b} \Rightarrow b - \sqrt{2} = -b, b = \frac{\sqrt{2}}{2} = a. \end{aligned}$$

导致矛盾.

方法三: (最快的方法): 如果 $a \neq b$, 则根据方程组 $a = b + \frac{1}{b} - \sqrt{2}, b = a + \frac{1}{a} - \sqrt{2}$ 有

$$ab = b^2 - \sqrt{2}b + 1 = a^2 - \sqrt{2}a + 1 \Rightarrow a^2 - b^2 = \sqrt{2}(a - b) \Rightarrow a + b = \sqrt{2}$$

$$\Rightarrow b = a + \frac{1}{a} - \sqrt{2} = \sqrt{2} - a \Rightarrow 2\sqrt{2} = 2a + \frac{1}{a} \geq 2\sqrt{2a \cdot \frac{1}{a}} = 2\sqrt{2}$$

最后一个不等式等号成立当且仅当 $a = \frac{\sqrt{2}}{2}$, 由此可知 $a = b = \frac{1}{\sqrt{2}}$ 矛盾.

□

注 一般来说, 递推函数递减时候是否收敛完全取决于递推函数二次复合之后在区间内 (这个数列的最大, 最小值对应的区间) 是否会有新的不动点, 如果没有就收敛, 如果有, 则通常奇偶子列收敛到不同极限, 于是数列不收敛. 可以看到核心是二次复合后是否有新的不动点, 也即解方程 $f(f(x)) = x$, 一般不建议硬算, 尤其是多项式或者分式类型, 往往化为两个方程 $a = f(b), b = f(a)$ 然后作差会比较方便, 只有出现超越函数时候, 才有必要真的把二次复合化简算出来, 然后硬解方程, 或者求导研究问题, 这样“迫不得已”的例子见豌豆讲义.

例题 2.72 定义数列 $a_0 = x, a_{n+1} = \frac{a_n^2 + y^2}{2}, n = 0, 1, 2, \dots$, 求 $D \triangleq \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : \text{数列 } a_n \text{ 收敛}\}$ 的面积. 解

□

2.6.2 单调性分析法

命题 2.16 (不动点)

设数列 $\{x_n\}$ 满足递推公式 $x_{n+1} = f(x_n), n \in \mathbb{N}$. 若有 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \xi$, 同时又成立 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = f(\xi)$ 则极限 ξ 一定是方程 $f(x) = x$ 的根 (这时称 ξ 为函数 f 的不动点).

◆

证明 对 $x_{n+1} = f(x_n)$ 两边取极限即得.

□

关于递推数列求极限和估阶的问题, 单调性分析法只适用于

$$x_{n+1} = f(x_n), n \in \mathbb{N}.$$

f 是递增或者递减的类型, 且大多数情况只适用于 f 递增情况, 其余情况不如压缩映像思想方便快捷. 显然递推数列 $x_{n+1} = f(x_n)$ 确定的 x_n 如果收敛于 $x \in \mathbb{R}$, 则当 f 连续时一定有 $f(x) = x$, 此时我们也把这个 x 称为 f 的不动点. 因此 $f(x) = x$ 是 x_n 收敛于 $x \in \mathbb{R}$ 的必要条件.

命题 2.17 (递增函数递推数列)

设 f 是递增函数, 则递推

$$x_{n+1} = f(x_n), n \in \mathbb{N}. \quad (2.68)$$

确定的 x_n 一定单调, 且和不动点大小关系恒定.



笔记 本结论表明由递增递推(2.68)确定的数列的单调性和有界性, 完全由其 $x_2 - x_1$ 和 x_1 与不动点 x_0 的大小关系确定. 即 $x_2 > x_1 \Rightarrow x_{n+1} > x_n, \forall n \in \mathbb{N}_+$. $x_1 > x_0 \Rightarrow x_n > x_0, \forall n \in \mathbb{N}_+$.

证明 我们只证一种情况, 其余情况是完全类似的. 设 x_0 是 f 的不动点且 $x_1 \leq x_0, x_2 \geq x_1$, 则若 $x_n \leq x_{n+1}, x_n \leq x_0, n \in \mathbb{N}$, 运用 f 递增性有

$$x_{n+1} = f(x_n) \leq f(x_0) = x_0, x_{n+2} = f(x_{n+1}) \geq f(x_n) = x_{n+1}.$$

由数学归纳法即证明了**命题 2.17**.

□

命题 2.18 (递减函数递推数列)

设 f 是递减函数, 则递推

$$x_{n+1} = f(x_n), n \in \mathbb{N}. \quad (2.69)$$

确定的 $\{x_n\}$ 一定不单调, 且和不动点大小关系交错. 但 $\{x_n\}$ 的两个奇偶子列 $\{x_{2k-1}\}$ 和 $\{x_{2k}\}$ 分别为单调数列, 且具有相反的单调性.



笔记 我们注意到 $f \circ f$ 递增就能把 f 递减转化为递增的情况, 本结论无需记忆或证明, 只记得思想即可. x_n 和不动点关系交错, 即若 x_0 为数列 x_n 的不动点, 且 $x_1 \geq x_0, x_2 \leq x_0$, 则 $x_3 \geq x_0, \dots, x_{2n} \leq x_0, x_{2n-1} \geq x_0, \dots$; 并且 $x_2 \leq x_1, x_3 \geq x_1, x_4 \leq x_2, x_5 \geq x_3, \dots, x_{2n} \leq x_{2n-2}, x_{2n-1} \geq x_{2n-3}, \dots$.

证明 由**命题 2.17**类似证明即可.

□

例题 2.73 递增/递减递推数列

- 设 $x_1 > -6, x_{n+1} = \sqrt{6+x_n}, n = 1, 2, \dots$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.
- 设 $x_1, a > 0, x_{n+1} = \frac{1}{4}(3x_n + \frac{a}{x_n^3}), n = 1, 2, \dots$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.
- 设 $x_1 = 2, x_n + (x_n - 4)x_{n-1} = 3, (n = 2, 3, \dots)$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.
- 设 $x_1 > 0, x_n e^{x_{n+1}} = e^{x_n} - 1, n = 1, 2, \dots$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.



笔记

- 不妨设 $x_1 \geq 0$ 的原因: 我们只去掉原数列 $\{x_n\}$ 的第一项, 得到一个新数列, 并且此时新数列是从原数列 $\{x_n\}$ 的第二项 x_2 开始的. 对于原数列 $\{x_n\}$ 而言, 有 $x_{n+1} = \sqrt{6+x_n} \geq 0, \forall n \in \mathbb{N}$. 故新数列的每一项都大于等于 0. 将新数列重新记为 $\{x_n\}$, 则 $x_1 \geq 0$. 若此时能够证得新数列收敛到 x_0 , 则由于数列去掉有限项不会影响数列的收敛性以及极限值, 可知原数列也收敛到 x_0 . 故不妨设 $x_1 \geq 0$ 是合理地.

(简单地说, 就是原数列用 x_2 代替 x_1 , 用 x_{n+1} 代替 $x_n, \forall n \in \mathbb{N}$, 而由 $x_1 > -6$, 可知 $x_2 = \sqrt{6+x_1} \geq 0$.)

注 这种不妨设的技巧在数列中很常用, 能减少一些不必要的讨论. 实际上就是去掉数列中有限个有问题的项, 而去掉这些项后对数列的极限没有影响.

解

- 不妨设 $x_1 \geq 0$, 则设 $f(x) = \sqrt{6+x}$, 则 $f(x)$ 单调递增.

当 $x_1 < 3$ 时, 由条件可知

$$x_2 - x_1 = \sqrt{6+x_1} - x_1 = \frac{(3-x_1)(2+x_1)}{\sqrt{6+x_1} + x_1}. \quad (2.70)$$

从而此时 $x_2 > x_1$. 假设当 $n = k$ 时, 有 $x_k < 3$. 则当 $n = k + 1$ 时, 就有

$$x_{k+1} = f(x_k) = \sqrt{6+x_k} < \sqrt{6+3} = 3.$$

故由数学归纳法, 可知 $x_n < 3, \forall n \in \mathbb{N}$.

假设当 $n = k$ 时, 有 $x_{k+1} \geq x_k$. 则当 $n = k + 1$ 时, 就有

$$x_{k+2} = f(x_{k+1}) \geq f(x_k) = x_{k+1}.$$

故由数学归纳法, 可知 $\{x_n\}$ 单调递增. 于是由单调有界定理, 可得数列 $\{x_n\}$ 收敛.

当 $x_1 \geq 3$ 时, 由(2.70)式可知, 此时 $x_2 \leq x_1$. 假设当 $n = k$ 时, 有 $x_k \geq 3$. 则当 $n = k + 1$ 时, 就有

$$x_{k+1} = f(x_k) = \sqrt{6+x_k} \geq \sqrt{6+3} = 3.$$

故由数学归纳法, 可知 $x_n \geq 3, \forall n \in \mathbb{N}$.

假设当 $n = k$ 时, 有 $x_{k+1} \leq x_k$. 则当 $n = k + 1$ 时, 就有

$$x_{k+2} = f(x_{k+1}) \leq f(x_k) = x_{k+1}.$$

故由数学归纳法, 可知 $\{x_n\}$ 单调递减. 于是由单调有界定理, 可得数列 $\{x_n\}$ 收敛.

综上, 无论 $x_1 > 3$ 还是 $x_1 \leq 3$, 都有数列 $\{x_n\}$ 收敛. 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$. 则对 $x_{n+1} = \sqrt{6+x_n}$ 两边同时令 $n \rightarrow \infty$

可得 $a = \sqrt{6+a}$, 解得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a = 3$.

2.

3.

4.

□

例题 2.74 设 $c, x_1 \in (0, 1)$, 数列 $\{x_n\}$ 满足 $x_{n+1} = c(1 - x_n^2)$, $x_2 \neq x_1$, 证明 x_n 收敛当且仅当 $c \in \left(0, \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$.

证明 根据题目显然有 $x_n \in (0, 1)$, 考虑函数 $f(x) = c(1 - x^2)$, 则 $f(x)$ 单调递减, 并且 $f(x) = x$ 在区间 $(0, 1)$ 中有唯一解 $t_0 = \frac{\sqrt{1+4c^2}-1}{2c}$, 则 $x_1 \neq t_0$, 不妨设 $x_1 \in (0, t_0)$ (若不然 $x_1 > t_0$, 则 $x_2 = f(x_1) < f(t_0) = t_0$, 从 x_2 开始考虑即可), 所以 $x_2 > t_0, x_3 < t_0, \dots$ 也即 $x_{2n-1} < t_0, x_{2n} > t_0$ 恒成立.

为了研究奇偶子列的单调性, 考虑二次复合, 计算有

$$f(f(x)) - x = c(1 - c^2(1 - x^2)^2) - x = (-cx^2 + c - x)(c^2x^2 + cx + 1 - c^2)$$

两个因子都是二次函数, 前者开口向下, 在 $(0, 1)$ 区间中与 $y = x$ 的唯一交点(横坐标)是 $t_0 = \frac{\sqrt{1+4c^2}-1}{2c}$, 后者开口向上, 解方程有(形式上) $x = \frac{-c \pm \sqrt{4c^2-3}}{2c}$.

因此我们应该以 $c = \frac{\sqrt{3}}{2}$ 分类, 当 $c \in \left(0, \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$ 时, $c^2x^2 + cx + 1 - c^2 \geq 0$ 也即当 $x \in (0, t_0)$ 时 $f(f(x)) \geq x, x \in (t_0, 1)$ 时 $f(f(x)) \leq x$, 代入可知

$$x_1 \leq x_3 \leq x_5 \leq \dots \leq t_0, x_2 \geq x_4 \geq x_6 \geq \dots \geq t_0$$

也即奇子列单调递增有上界 t_0 , 偶子列单调递减有下界 t_0 , 所以奇偶子列分别都收敛, 解方程 $f(f(x)) = x$ 可知其在 $(0, 1)$ 中有唯一解 $t_0 = \frac{\sqrt{1+4c^2}-1}{2c}$, 所以奇偶子列收敛到同一值, 数列收敛.

当 $c > \frac{\sqrt{3}}{2}$ 时, **方法一**: 显然有 $\frac{-c - \sqrt{4c^2-3}}{2c} < \frac{\sqrt{1+4c^2}-1}{2c} < \frac{-c + \sqrt{4c^2-3}}{2c}$, 从左至右依次记为 $t_1 < t_0 < t_2$. 采用反证法, 如果 x_n 收敛, 则解方程 $f(x) = x$ 可知 $x_n \rightarrow t_0$, 注意 $x_{2n-1} \in (0, t_0), x_{2n} \in (t_0, 1)$ 并且反证法表明这两个子列也都收敛到 t_0 , 则存在 N 使得 $n > N$ 时恒有 $x_{2n-1} \in (t_1, t_0), x_{2n} \in (t_0, t_2)$. 注意

$$f(f(x)) - x = (-cx^2 + c - x)(c^2x^2 + cx + 1 - c^2)$$

因此在区间 (t_1, t_0) 中 $f(f(x)) < x$, 区间 (t_0, t_2) 中 $f(f(x)) > x$, 所以 $n > N$ 时奇子列单调递减, 偶子列单调递增, 根据单调有界, 只能奇子列收敛到 t_1 , 偶子列收敛到 t_2 , 这与 $x_n \rightarrow t_0$ 矛盾.

方法二: 这个方法可以快速说明 $c > \frac{\sqrt{3}}{2}$ 时数列一定不收敛, 但是剩下一半似乎用不了. 显然 $f(x) = x$ 的解是 $t_0 = \frac{\sqrt{1+4c^2}-1}{2c}$, 如果 $c > \frac{\sqrt{3}}{2}$, 求导有 $f'(x) = -2cx$, $|f'(t_0)| = \sqrt{1+4c^2}-1 > 1$. 所以在 t_0 附近的一个邻域内都有 $|f'(x)| \geq 1+\delta > 1$, 而如果此时 x_n 收敛, 则必然收敛到 t_0 , 也就是说存在 x_N 落入 t_0 附近一个去心邻域内 (条件 $x_2 \neq x_1$ 保证了 $x_n \neq t_0$ 恒成立), 于是

$$|x_{N+1} - t_0| = |f(x_N) - f(t_0)| = |f'(\xi)| |x_N - t_0| \geq (1+\delta) |x_N - t_0|$$

以此类推下去, 显然 x_n 与 t_0 的距离只会越来越远, 因此不可能收敛到 t_0 导致矛盾. \square

注 **方法一**是标准方法也是通用的, 注意多项式时候一定有整除关系 $f(x)-x \mid f(f(x))-x$ 所以必定能因式分解. **方法二**则是回忆之前讲过的“极限点处导数大于等于 1 时候就不可能压缩映射”, 利用这个原理我们很快能发现 c 的分界线, 同时也能快速说明 $c > \frac{\sqrt{3}}{2}$ 时数列一定不收敛.

2.6.3 利用上下极限求递推数列极限

利用上下极限求递推数列极限, 首先要先确定数列有界, 进而说明上下极限存在. 其次, 运用这种方法前提是: 需要递推式中出现分式或负号, 这样对递推式两边分别取上、下极限后, 才会得到一个关于上极限和下极限的值的等式. 只有通过这个等式将上、下极限的值联系起来后, 才能利用反复抽子列或其他方法证明上、下极限相等.

例题 2.75 设 $A, B > 0, a_1 > A$ 以及 $a_{n+1} = A + \frac{B}{a_n}, n \in \mathbb{N}$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$.

证明 显然 $a_n > A > 0, \forall n \in \mathbb{N}$. 从而 $a_{n+1} = A + \frac{B}{a_n} \leq A + \frac{B}{A}, \forall n \in \mathbb{N}$. 故数列 $\{a_n\}$ 有界. 于是可设 $a = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n < \infty, b = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n < \infty$. 对等式 $a_{n+1} = A + \frac{B}{a_n}$ 两边同时关于 $n \rightarrow +\infty$ 取上下极限得到

$$\begin{aligned} a &= \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_{n+1} = A + \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{B}{a_n} = A + \frac{B}{\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n} = A + \frac{B}{b}, \\ b &= \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_{n+1} = A + \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{B}{a_n} = A + \frac{B}{\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n} = A + \frac{B}{a}. \end{aligned}$$

于是我们有 $\begin{cases} ab = Ab + B \\ ab = Aa + B \end{cases}$, 解得 $a = b = \frac{A \pm \sqrt{A^2 - 4B}}{2}$. 又由 $a_n > A > 0$, 可知 $a = b = \frac{A + \sqrt{A^2 - 4B}}{2}$. 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \frac{A + \sqrt{A^2 - 4B}}{2}$. \square

例题 2.76 设 $x_0, y_0 > 0, x_{n+1} = \frac{1}{x_n^2 + x_n y_n + 2y_n^2 + 1}, y_{n+1} = \frac{1}{2x_n^2 + x_n y_n + y_n^2 + 1}$, 证明: 数列 x_n, y_n 都收敛且极限相同.

注 $1 + \frac{3}{4}u^2$ 的放缩思路: 我们希望 $\frac{x}{(1 + \frac{3}{4}x^2)^2} < 1$, 待定 $m > 0$, 利用均值不等式可知

$$\left(1 + \frac{3}{4}x^2\right)^2 = \left(\overbrace{\frac{3}{4}x^2 + \frac{1}{m} + \frac{1}{m} + \cdots + \frac{1}{m}}^{m \uparrow}\right)^2 \geq \left((m+1) \sqrt[m+1]{\frac{3}{4}x^2 \cdot \frac{1}{m^m}}\right)^2 = \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{2}{m+1}} \cdot \frac{m+1}{m^{\frac{2m}{m+1}}} x^{\frac{4}{m+1}}.$$

从而我们希望 $x^{\frac{4}{m+1}} = x$, 即 $m = 3$. 这样就能使得

$$\frac{x}{(1 + \frac{3}{4}x^2)^2} \leq \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{2}{m+1}} \cdot \frac{m+1}{m^{\frac{2m}{m+1}}} x^{\frac{4}{m+1}} = \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{2}{3+1}} \cdot \frac{3+1}{3^{\frac{2 \cdot 3}{3+1}}} < 1.$$

故取 $m = 3$.

证明 根据条件可知 $x_n, y_n > 0$, 并且进一步归纳易证 $x_n, y_n \in [0, 1]$, 所以上下极限也都在 $[0, 1]$ 之间.

$$\begin{aligned} x_{n+1} - y_{n+1} &= \frac{1}{x_n^2 + x_n y_n + 2y_n^2 + 1} - \frac{1}{2x_n^2 + x_n y_n + y_n^2 + 1} \\ &= \frac{x_n^2 - y_n^2}{(x_n^2 + x_n y_n + 2y_n^2 + 1)(2x_n^2 + x_n y_n + y_n^2 + 1)} \end{aligned}$$

由均值不等式可得

$$x^2 + xy + y^2 = (x+y)^2 - xy \geq (x+y)^2 - \left(\frac{x+y}{2}\right)^2 = \frac{3}{4}(x+y)^2.$$

记 $u = x_n + y_n \geq 0$, 则由均值不等式可得

$$1 + \frac{3}{4}u^2 = \frac{3}{4}u^2 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} \geq 4\sqrt[4]{\frac{u^2}{36}} = 4\sqrt{\frac{|u|}{6}} \Rightarrow \frac{u}{(1 + \frac{3}{4}u^2)^2} \leq \frac{8}{3}.$$

于是

$$\begin{aligned} |x_{n+1} - y_{n+1}| &= \frac{|x_n - y_n|(x_n + y_n)}{(x_n^2 + x_n y_n + 2y_n^2 + 1)(2x_n^2 + x_n y_n + y_n^2 + 1)} \\ &\leq |x_n - y_n| \frac{x_n + y_n}{(x_n^2 + x_n y_n + y_n^2 + 1)(x_n^2 + x_n y_n + y_n^2 + 1)} \\ &\leq |x_n - y_n| \frac{x_n + y_n}{(1 + \frac{3}{4}(x_n + y_n)^2)^2} = |x_n - y_n| \frac{u}{(1 + \frac{3}{4}u^2)^2} \end{aligned}$$

故

$$|x_{n+1} - y_{n+1}| \leq \frac{3}{8}|x_n - y_n| \leq \dots \leq \left(\frac{3}{8}\right)^n|x_1 - y_1|.$$

上式两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 得到 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n - y_n) = 0$. 因此, 设 $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} y_n = A$, $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} y_n = B$, $A, B \in [0, 1]$, $A \geq B$ 利用上下极限的基本性质有

$$\begin{aligned} A &= \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{x_n^2 + x_n y_n + 2y_n^2 + 1} \leq \frac{1}{4B^2 + 1} \\ B &= \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{x_n^2 + x_n y_n + 2y_n^2 + 1} \geq \frac{1}{4A^2 + 1} \\ \Rightarrow A &\leq \frac{1}{4B^2 + 1} \leq \frac{1}{\frac{4}{(4A^2 + 1)^2} + 1} = \frac{(4A^2 + 1)^2}{(4A^2 + 1)^2 + 4} \end{aligned}$$

方法一: 去分母并化简, 因式分解得到 (这个方法难算, 建议用 mma, 或者慢慢手动拆)

$$A((4A^2 + 1)^2 + 4) - (4A^2 + 1)^2 = (2A - 1)^3(2A^2 + A + 1) \leq 0$$

于是 $A \leq \frac{1}{2}$, 同理可知 $B \geq \frac{1}{2}$, 所以 $A = B = \frac{1}{2}$, 因此 x_n, y_n 都收敛到 $\frac{1}{2}$.

方法二: 最后计算 A, B 时候如果采用上述方法硬做有点难算, 其实有巧妙一些的选择. 因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n - y_n) = 0$, 所以 $\lim_{n \rightarrow \infty} (4x_n^2 - (x_n^2 + x_n y_n + 2y_n^2)) = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n(x_n - y_n) + 2 \lim_{n \rightarrow \infty} (x_n + y_n)(x_n - y_n) = 0$ (有界量乘无穷小量). 进而上下极限也有等式 $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (x_n^2 + x_n y_n + 2y_n^2) = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} 4x_n^2 = 4A^2$, $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (x_n^2 + x_n y_n + 2y_n^2) = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} 4x_n^2 = 4B^2$ 代入可知

$$\begin{aligned} A &= \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{x_n^2 + x_n y_n + 2y_n^2 + 1} = \frac{1}{4B^2 + 1} \\ B &= \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{x_n^2 + x_n y_n + 2y_n^2 + 1} = \frac{1}{4A^2 + 1} \\ \Rightarrow 4AB^2 + A &= 4A^2B + B = 1, (4AB - 1)(B - A) = 0 \end{aligned}$$

所以若 $A = B$ 则显然成立, 进而由递推条件可得 $A = B = \frac{1}{2}$. 若 $A \neq B$ 则 $AB = \frac{1}{4}$, 代入有 $A + B = 1$, 显然解出 $A = B = \frac{1}{4}$ 矛盾.

□

注 有必要先来证明 $x_n - y_n \rightarrow 0$ 而不是上来直接设 x_n, y_n 的上下极限一共四个数字, 这样的话根本算不出来 (用 mma 都算不出来), 而如果证明了 $x_n - y_n \rightarrow 0$, 则只有两个变量了. 方法二好做是因为都是等式了, 所以可以作差

然后简单的因式分解解出来, 而方法一那样无脑硬算, 就要麻烦. 本题运用的若干上下极限性质都可以在任何一本数学分析教材上面找到证明. 只要你记住三点:

1. 逐项 (包括加法也包括乘法) 取上下极限通常都会成立一个确定方向的不等式.
2. 计算上下极限时候, 如果其中某一项极限就是存在的, 那么上下极限的不等式将会成为等式.
3. 对于都是正数的问题, 取倒数的上下极限运算规则就是你脑海中最自然的那种情况. 这样考试时候就算忘了具体的结论, 也可以通过画图和举例快速确定下来.

2.6.4 类递增/类递减递推数列

例题 2.77 类递增模型

1. 设 $c_1, c_2 > 0, c_{n+2} = \sqrt{c_{n+1}} + \sqrt{c_n}, n = 1, 2, \dots$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n$.
2. 设 $a_k \in (0, 1), 1 \leq k \leq 2021$ 且 $(a_{n+2021})^{2022} = a_n + a_{n+1} + \dots + a_{n+2020}, n = 1, 2, \dots$, 这里 $a_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$ 证明 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ 存在.

 **笔记** 解决此类问题一般先定界 (即确定 c_n 的上下界的具体数值), 再对等式两边同时取上下极限即可.

注 强行归纳出上下界, 即“先猜后证”. 就是先待定上下界再根据需要去取具体值.

1. 记 $b \triangleq \max\{c_1, c_2, 4\}$ 的原因: 为了证明数列 c_n 有界, 我们需要先定界 (即确定 c_n 的上下界的具体数值), 然后再利用数学归纳法证得数列 c_n 有界. 显然 c_n 有一个下界 0, 但上界无法直接观察出来. 为了确定出数列 c_n 的一个上界, 我们可以先假设 c_n 有一个上界 b (此时 b 是待定常数). 则 $c_{n+1} = \sqrt{c_n} + \sqrt{c_{n-1}} \leq \sqrt{b} + \sqrt{b} = 2\sqrt{b} \leq b$, 由此解得 $b \geq 4$. 又由数学归纳法的原理, 可知需要保证 b 同时也是 c_1, c_2 的上界. 故只要取 $b \geq 4, c_1, c_2$ 就一定能归纳出 b 是 c_n 的一个上界. 而我们取 $b \triangleq \max\{c_1, c_2, 4\}$ 满足这个条件.
2. 记 $M =$ 的原因: 同上一问, 假设数列 a_n 有一个上界 M (此时 M 是待定常数), 则

$$a_{n+2021} = \sqrt[2022]{a_n + a_{n+1} + \dots + a_{n+2020}} \leq \sqrt[2022]{M + M + \dots + M} = \sqrt[2022]{2021M} \leq M.$$

由此解得 $M \geq (2021)^{\frac{1}{2021}}$. 又由数学归纳法的原理, 可知需要保证 M 同时也是 $a_1, a_2, \dots, a_{2020}$ 的上界. 故只要取 $M \geq (2021)^{\frac{1}{2021}}, a_1, a_2, \dots, a_{2020}$ 就一定能归纳出 M 是 a_n 的一个上界. 而我们取

$$M = \max \left\{ (2021)^{\frac{1}{2021}}, a_1, a_2, \dots, a_{2020} \right\}$$

满足这个条件.

解

1. 记 $b \triangleq \max\{c_1, c_2, 4\}$, 则 $0 < c_1, c_2 \leq b$. 假设 $0 < c_n \leq b$, 则

$$0 < c_{n+1} = \sqrt{c_n} + \sqrt{c_{n-1}} \leq \sqrt{b} + \sqrt{b} = 2\sqrt{b} \leq b.$$

由数学归纳法, 可知对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有 $0 < c_n \leq b$ 成立. 即数列 $\{c_n\}$ 有界.

因此可设 $L = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} c_n < \infty, l = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} c_n < \infty$. 令 $c_{n+1} = \sqrt{c_n} + \sqrt{c_{n-1}}$ 两边同时对 $n \rightarrow \infty$ 取上下极限, 可得

$$L = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} c_{n+1} = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (\sqrt{c_n} + \sqrt{c_{n-1}}) \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt{c_n} + \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt{c_{n-1}} = 2\sqrt{L} \Rightarrow L \leq 4,$$

$$l = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} c_{n+1} = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (\sqrt{c_n} + \sqrt{c_{n-1}}) \geq \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt{c_n} + \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt{c_{n-1}} = 2\sqrt{l} \Rightarrow l \geq 4.$$

又 $l = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} c_n \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} c_n = L$, 故 $L = l = 4$. 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = 4$.

2. 取 $M = \max \left\{ (2021)^{\frac{1}{2021}}, a_1, a_2, \dots, a_{2020} \right\}$, 显然 $a_n > 0$ 且 $a_1, a_2, \dots, a_{2020} \leq M$. 假设 $a_k \leq M, k = 1, 2, \dots, n$ 则由条件可得

$$a_{n+1} = \sqrt[2022]{a_{n-2020} + a_{n-2019} + \dots + a_n} \leq \sqrt[2022]{M + M + \dots + M} = \sqrt[2022]{2021M} \leq M.$$

由数学归纳法, 可知 $0 < a_n \leq M, \forall n \in \mathbb{N}$. 即数列 a_n 有界. 因此可设 $A = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n < \infty, a = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n < \infty$. 由条件可得

$$a_{n+2021} = \sqrt[2022]{a_n + a_{n+1} + \dots + a_{n+2020}}.$$

上式两边同时对 $n \rightarrow \infty$ 取上下极限得到

$$A = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_{n+2021} = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[2022]{a_n + a_{n+1} + \cdots + a_{n+2020}} = \sqrt[2022]{\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (a_n + a_{n+1} + \cdots + a_{n+2020})} \\ \leq \sqrt[2022]{\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n + \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_{n+1} + \cdots + \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_{n+2020}} = \sqrt[2022]{A + A + \cdots + A} \Rightarrow A \leq (2021)^{\frac{1}{2021}},$$

$$a = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_{n+2021} = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[2022]{a_n + a_{n+1} + \cdots + a_{n+2020}} = \sqrt[2022]{\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (a_n + a_{n+1} + \cdots + a_{n+2020})} \\ \geq \sqrt[2022]{\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n + \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_{n+1} + \cdots + \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_{n+2020}} = \sqrt[2022]{a + a + \cdots + a} \Rightarrow a \geq (2021)^{\frac{1}{2021}}.$$

$$\text{又 } a = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = A, \text{ 故 } A = a = (2021)^{\frac{1}{2021}}. \text{ 即 } \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = (2021)^{\frac{1}{2021}}.$$

□

例题 2.78 类递减模型

- 设 $a_{n+2} = \frac{1}{a_{n+1}} + \frac{1}{a_n}$, $a_1, a_2 > 0, n = 1, 2, \dots$ 证明 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ 存在.
- 设 $x_1 = a > 0, x_2 = b > 0, x_{n+2} = 3 + \frac{1}{x_{n+1}^2} + \frac{1}{x_n^2}, n = 1, 2, \dots$ 证明 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 存在.



笔记 此类问题一定要记住, 先定界. 这里我们提供两种方法:

第一题我们使用上下极限, 再隔项抽子列的方法.(这里就算我们解不出不动点也能用这个方法证明极限存在.)

第二题我们使用构造二阶差分的线性递推不等式的方法. (这里也可以设出不动点 x_0 , 由条件可知, $x_0 = 3 + \frac{1}{x_0^2} + \frac{1}{x_0^2}$, 解出不动点. 然后两边减去不动点, 类似的去构造一个二阶线性递推数列, 然后待定系数放缩一下说明收敛.)

这类题如果不记住做题时会难以想到. 与类递增模型一样, 一开始要定界.

注 第二题的极限是一个无理数, 特征方程比较难解, 因此我们只证明极限的存在性.

证明

- 取 $a = \min \left\{ a_1, a_2, \frac{2}{a_1}, \frac{2}{a_2} \right\} > 0$, 则有 $0 < a \leq a_1, a_2 \leq \frac{2}{a}$ 成立. 假设 $0 < a \leq a_n, a_{n+1} \leq \frac{2}{a}$, 则由条件可得

$$a = \frac{a}{2} + \frac{a}{2} \leq a_{n+2} = \frac{1}{a_{n+1}} + \frac{1}{a_n} \leq \frac{1}{a} + \frac{1}{a} = \frac{2}{a}.$$

由数学归纳法, 可知 $0 < a \leq a_n \leq \frac{2}{a}, \forall n \in \mathbb{N}$. 即数列 a_n 有界. 于是可设 $A = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n < \infty, B = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n < \infty$. 由致密性定理, 可知存在一个子列 $\{a_{n_k}\}$, 使得

$$\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k+2} = A, \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k+1} = l_1 < \infty, \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = l_2 < \infty, \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k-1} = l_3 < \infty.$$

并且根据上下极限的定义, 可知 $B \leq l_1, l_2, l_3 \leq A$. 对等式 $a_{n+2} = \frac{1}{a_{n+1}} + \frac{1}{a_n}$ 两边同时关于 $n \rightarrow +\infty$ 取上下极限得到

$$A = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_{n+2} = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{a_{n+1}} + \frac{1}{a_n} \right) \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_{n+1}} + \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_n} \\ = \frac{1}{\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_{n+1}} + \frac{1}{\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n} = \frac{1}{B} + \frac{1}{B} = \frac{2}{B} \Rightarrow AB \leq 2.$$

$$B = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_{n+2} = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{a_{n+1}} + \frac{1}{a_n} \right) \geq \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_{n+1}} + \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_n} \\ = \frac{1}{\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_{n+1}} + \frac{1}{\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n} = \frac{1}{A} + \frac{1}{A} = \frac{2}{A} \Rightarrow AB \geq 2.$$

故 $AB = 2$. 因为 $\{a_{n_k}\}$ 是数列 a_n 的一个子列, 所以 $\{a_{n_k}\}$ 也满足 $a_{n_k+2} = \frac{1}{a_{n_k+1}} + \frac{1}{a_{n_k}}$, $\forall k \in \mathbb{N}$. 并且子列 $\{a_{n_k-1}\}, \{a_{n_k}\}, \{a_{n_k+1}\}, \{a_{n_k+2}\}$ 的极限都存在, 于是对 $a_{n_k+2} = \frac{1}{a_{n_k+1}} + \frac{1}{a_{n_k}}$ 等式两边同时关于 $k \rightarrow +\infty$ 取极

限, 再结合 $B \leq l_1, l_2, l_3 \leq A$ 得到

$$\begin{aligned} A &= \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k+2} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{a_{n_k+1}} + \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{a_{n_k}} \\ &= \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \leq \frac{1}{B} + \frac{1}{B} = \frac{2}{B} = A \Rightarrow l_1 = l_2 = B. \end{aligned}$$

同理再对 $a_{n_k+1} = \frac{1}{a_{n_k}} + \frac{1}{a_{n_k-1}}$ 等式两边同时关于 $k \rightarrow +\infty$ 取极限, 再结合 $B \leq l_1, l_2, l_3 \leq A$ 得到

$$\begin{aligned} B &= l_1 = \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k+1} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{a_{n_k}} + \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{a_{n_k-1}} \\ &= \frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_3} \geq \frac{1}{A} + \frac{1}{A} = \frac{2}{A} = B \Rightarrow l_2 = l_3 = A. \end{aligned}$$

故 $A = B = l_1 = l_2 = l_3$, 又由于 $AB = 2$, 因此 $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = A = B = \sqrt{2}$. 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \sqrt{2}$.

2. 证法一: 根据递推条件显然, $x_n \geq 3, \forall n \geq 3$. 从而 $x_5 = 3 + \frac{1}{x_4^2} + \frac{1}{x_3^2} \leq 3 + \frac{1}{9} + \frac{1}{9} < 4$. 假设 $x_n \leq 4, \forall n \geq 5$, 则

$$x_{n+1} = 3 + \frac{1}{x_n^2} + \frac{1}{x_{n-1}^2} \leq 3 + \frac{1}{9} + \frac{1}{9} < 4.$$

由数学归纳法可知 $x_n \in [3, 4], \forall n \geq 5$. 可设 $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = A \in [3, 4], \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = B \in [3, 4]$. 对 $x_{n+2} = 3 + \frac{1}{x_{n+1}^2} + \frac{1}{x_n^2}$

两边令 $n \rightarrow \infty$ 并分别取上、下极限得

$$A \leq 3 + \frac{2}{B^2}, \quad B \geq 3 + \frac{2}{A^2}.$$

从而

$$3A + \frac{2}{A} \leq AB \leq 3B + \frac{2}{B}.$$

又 $A \geq B \geq 3$, 且 $3x + \frac{2}{x}$ 在 $\left[\sqrt{\frac{2}{3}}, +\infty\right)$ 上严格递增, 故

$$3A + \frac{2}{A} \leq AB \leq 3B + \frac{2}{B} \leq 3A + \frac{2}{A}.$$

因此

$$AB = 3A + \frac{2}{A} = 3B + \frac{2}{B}.$$

故 $A = B$, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 存在.

证法二: 根据递推条件显然, $x_n \geq 3, \forall n \geq 3$. 从而 $x_5 = 3 + \frac{1}{x_4^2} + \frac{1}{x_3^2} \leq 3 + \frac{1}{9} + \frac{1}{9} < 4$. 假设 $x_n \leq 4, \forall n \geq 5$, 则

$$x_{n+1} = 3 + \frac{1}{x_n^2} + \frac{1}{x_{n-1}^2} \leq 3 + \frac{1}{9} + \frac{1}{9} < 4.$$

由数学归纳法可知 $x_n \in [3, 4], \forall n \geq 5$. 于是

$$\begin{aligned} |x_{n+2} - x_{n+1}| &= \left| \frac{1}{x_{n+1}^2} - \frac{1}{x_{n-1}^2} \right| \leq \left| \frac{1}{x_{n+1}^2} - \frac{1}{x_n^2} \right| + \left| \frac{1}{x_n^2} - \frac{1}{x_{n-1}^2} \right| = \frac{|x_n^2 - x_{n+1}^2|}{x_{n+1}^2 x_n^2} + \frac{|x_{n-1}^2 - x_n^2|}{x_n^2 x_{n-1}^2} \\ &= \frac{x_n + x_{n+1}}{x_{n+1}^2 x_n^2} |x_{n+1} - x_n| + \frac{x_n + x_{n-1}}{x_n^2 x_{n-1}^2} |x_n - x_{n-1}| \\ &= \frac{1}{x_{n+1} x_n} \left(\frac{1}{x_{n+1}} + \frac{1}{x_n} \right) |x_{n+1} - x_n| + \frac{1}{x_n x_{n-1}} \left(\frac{1}{x_n} + \frac{1}{x_{n-1}} \right) |x_n - x_{n-1}| \\ &\leq \frac{2}{27} |x_{n+1} - x_n| + \frac{2}{27} |x_n - x_{n-1}|, \forall n \geq 6. \end{aligned}$$

记 $q = \frac{1}{2} \in (0, 1), \lambda = \frac{1}{3}, u_n = |x_n - x_{n-1}|$, 则由上式可得

$$u_{n+2} \leq \frac{2}{27} u_{n+1} + \frac{2}{27} u_n \leq (q - \lambda) u_{n+1} + q \lambda u_n, \forall n \geq 6.$$

$$\iff u_{n+2} + \lambda u_{n+1} \leq q(u_{n+1} + \lambda u_n), \forall n \geq 6.$$

从而对 $\forall n \geq 10$, 我们有

$$u_n \leq u_n + \lambda u_{n-1} \leq q(u_{n-1} + \lambda u_{n-2}) \leq \cdots \leq q^{n-7}(u_7 + \lambda u_6).$$

于是对 $\forall n \geq 10$, 我们有

$$x_n \leq \sum_{k=10}^n |x_{k+1} - x_k| + x_6 = \sum_{k=10}^n u_k + x_6 \leq (u_7 + \lambda u_6) \sum_{k=10}^n q^{k-7} + x_6.$$

令 $n \rightarrow \infty$, 则由上式右边收敛可知, x_n 也收敛.

□

注

1. (1) 取 $a = \min \left\{ a_1, a_2, \frac{2}{a_1}, \frac{2}{a_2} \right\}$ 的原因: 为了证明数列 a_n 有界, 我们需要先定界, 然后再利用数学归纳法证得数列 a_n 有界. 显然 a_n 有一个下界 0, 但上界无法直接观察出来. 为了确定出数列 a_n 的上下界, 我们可以先假设 b 为数列 a_n 的一个上界 (此时 b 是待定常数), 但是我们根据 $a_n > 0$ 和 $a_{n+2} = \frac{1}{a_{n+1}} + \frac{1}{a_n}$ 只能得到 $a_{n+2} = \frac{1}{a_{n+1}} + \frac{1}{a_n} < +\infty$, 无法归纳法出 $a_n \leq b$, 故我们无法归纳出 $0 < a_n < b, \forall n \in \mathbb{N}$. 因此仅待定一个上界并不够, 下界并不能简单的取为 0, 我们还需要找到一个更接近下确界的大于零的下界, 不妨先假设这个下界为 $a > 0$ (此时 a 也是待定常数). 利用这个下界和递推式 $a_{n+2} = \frac{1}{a_{n+1}} + \frac{1}{a_n}$ 归纳出 $0 < a \leq a_n \leq b, \forall n \in \mathbb{N}$ (此时 a, b 都是待定常数). 于是由已知条件可得

$$\begin{aligned} a_{n+2} &= \frac{1}{a_{n+1}} + \frac{1}{a_n} \leq \frac{1}{a} + \frac{1}{a} = \frac{2}{a} \leq b \Rightarrow ab \geq 2, \\ a_{n+2} &= \frac{1}{a_{n+1}} + \frac{1}{a_n} \geq \frac{1}{b} + \frac{1}{b} = \frac{2}{b} \geq a \Rightarrow ab \leq 2. \end{aligned}$$

从而 $ab = 2$, 即 $b = \frac{2}{a}$. 进而 $0 < a \leq a_n \leq \frac{2}{a}$. 又由数学归纳法的原理, 可知我们需要同时保证 $0 < a \leq a_1, a_2 \leq \frac{2}{a}$. 因此找到一个合适的 a , 使得 $0 < a \leq a_1, a_2 \leq \frac{2}{a}$ 成立就一定能归纳出 $0 < a \leq a_n \leq \frac{2}{a}, \forall n \in \mathbb{N}$, 即数列 $\{a_n\}$ 有界. 而当我们取 $a = \min \left\{ a_1, a_2, \frac{2}{a_1}, \frac{2}{a_2} \right\}$ 时, 有 $a_1, a_2 \leq a, \frac{2}{a} \geq \frac{2}{a_1}, \frac{2}{a} \geq \frac{2}{a_2} = a_2$. 恰好满足这个条件.

- (2) 能取到一个子列 a_{n_k} , 使得 $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k+2} = A, \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k+1} = l_1 < \infty, \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = l_2 < \infty, \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k-1} = l_3 < \infty$ 成立的原因: 由 $A = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n$ 和上极限的定义 (上极限就是最大的子列极限), 可知存在一个子列 $\{a_{n_k}\}$, 使得 $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k+2} = A$. 因为数列 $\{a_{n_k+1}\}$ 有界 (因为数列 $\{a_n\}$ 有界), 所以由致密性定理可知 $\{a_{n_k+1}\}$ 一定存在一个收敛的子列 $\{a_{n_{k_j}+1}\}$, 并记 $\lim_{j \rightarrow \infty} a_{n_{k_j}+1} = l_1 < \infty$. 又因为 $\{a_{n_{k_j}+2}\}$ 是 $\{a_{n_k+2}\}$ 的子列, 所以 $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_{k_j}+2} = A$. 由于 $\{a_{n_{k_j}}\}$ 仍是 $\{a_n\}$ 的一个子列, 因此不妨将 $\{a_{n_{k_j}}\}$ 记作 $\{a_{n_k}\}$, 则此时有 $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k+2} = A, \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k+1} = l_1 < \infty$. 同理由于数列 $\{a_{n_k}\}$ 有界, 所以由致密性定理可知 $\{a_{n_k}\}$ 存在一个收敛的子列 $\{a_{n_{k_l}}\}$, 并记 $\lim_{l \rightarrow \infty} a_{n_{k_l}} = l_2$. 又因为 $\{a_{n_{k_l}+2}\}$ 是 $\{a_{n_k+2}\}$ 的子列, $\{a_{n_{k_l}+1}\}$ 是 $\{a_{n_k+1}\}$ 的子列, 所以 $\lim_{l \rightarrow \infty} a_{n_{k_l}+2} = A, \lim_{l \rightarrow \infty} a_{n_{k_l}+1} = l_1$. 由于 $\{a_{n_{k_l}}\}$ 仍是 $\{a_n\}$ 的一个子列, 因此不妨将 $\{a_{n_{k_l}}\}$ 记作 $\{a_{n_k}\}$, 则此时有 $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k+2} = A, \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k+1} = l_1 < \infty, \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = l_2 < \infty$. 再同理由于数列 $\{a_{n_k}\}$ 有界, 所以由致密性定理可知 $\{a_{n_k}\}$ 存在一个收敛的子列 $\{a_{n_{k_s}}\}$, 并记 $\lim_{s \rightarrow \infty} a_{n_{k_s}} = l_3$. 又因为 $\{a_{n_{k_s}+2}\}$ 是 $\{a_{n_k+2}\}$ 的子列, $\{a_{n_{k_s}+1}\}$ 是 $\{a_{n_k+1}\}$ 的子列, $\{a_{n_{k_s}}\}$ 是 $\{a_{n_k}\}$ 的子列, 所以 $\lim_{s \rightarrow \infty} a_{n_{k_s}+2} = A, \lim_{s \rightarrow \infty} a_{n_{k_s}+1} = l_1, \lim_{s \rightarrow \infty} a_{n_{k_s}} = l_2$. 由于 $\{a_{n_{k_s}}\}$ 仍是 $\{a_n\}$ 的一个子列, 因此不妨将 $\{a_{n_{k_s}}\}$ 记作 $\{a_{n_k}\}$, 则此时有 $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k+2} = A, \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k+1} = l_1 < \infty, \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = l_2 < \infty, \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k-1} = l_3 < \infty$.
2. 记 $q = \frac{1}{2} \in (0, 1), \lambda = \frac{1}{3}$ 的原因: 记 $u_n = |x_n - x_{n-1}|$, 则 $u_{n+2} \leq \frac{2}{27}(u_{n+1} + u_n)$, 类比二阶线性递推数列方法, 希望找到 $\lambda > 0, q \in (0, 1)$ 使得 $u_{n+2} + \lambda u_{n+1} \leq q(u_{n+1} + \lambda u_n)$ 恒成立, 这样一直递推下去就有 $u_{n+2} + \lambda u_{n+1} \leq Cq^n, C > 0$, 说明 $|x_{n+1} - x_n|$ 是以等比数列速度趋于零的, 根据级数收敛的比较判别法显然 x_n 收敛, 结论成立.

而对比已知不等式 $u_{n+2} \leq \frac{2}{27}(u_{n+1} + u_n)$ 和目标不等式 $u_{n+2} \leq (q - \lambda)u_{n+1} + q\lambda u_n$ 可知, 只要满足 $u_{n+2} \leq \frac{2}{27}(u_{n+1} + u_n) \leq (q - \lambda)u_{n+1} + q\lambda u_n, q \in (0, 1), \lambda > 0$ 即可达到目的. 即只需取合适的 q, λ 使其满足 $q - \lambda \geq \frac{2}{27}, q\lambda \geq \frac{2}{27}, q \in (0, 1), \lambda > 0$ 即可. 这明显有很多可以的取法, 例如 $q = \frac{1}{2}, \lambda = \frac{1}{3}$, 因此得证.

例题 2.79 设 $a_1, \dots, a_k, b_1, \dots, b_k > 0, k \geq 2, a_n = \sum_{i=1}^k \frac{b_i}{a_{n-i}}, n \geq k+1$, 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \sqrt{\sum_{i=1}^k b_i}$.

笔记 本题是**例题 2.78 第一题**的推广. 核心想法就是**反复抽收敛子列**.

证明 先证明数列是有界的, 为此取充分大的正数 M 使得

$$a_n \in \left[\frac{b_1 + b_2 + \dots + b_k}{M}, M \right], n = 1, 2, \dots, k$$

然后归纳证明对任意 $n \in \mathbb{N}^+$ 都有上述不等式成立, 若 n 时成立, 则 $n+1$ 时

$$\begin{aligned} a_{n+1} &= \frac{b_1}{a_n} + \frac{b_2}{a_{n-1}} + \dots + \frac{b_k}{a_{n-k+1}} \geq \frac{b_1 + b_2 + \dots + b_k}{M} \\ a_{n+1} &= \frac{b_1}{a_n} + \frac{b_2}{a_{n-1}} + \dots + \frac{b_k}{a_{n-k+1}} \leq \frac{b_1}{\frac{b_1 + \dots + b_k}{M}} + \frac{b_2}{\frac{b_1 + \dots + b_k}{M}} + \dots + \frac{b_k}{\frac{b_1 + \dots + b_k}{M}} = M \end{aligned}$$

因此 a_n 是有界数列, 设其上极限为 L , 下极限为 l , 则 $L \geq l$. 在递推式两边取上下极限可知

$$\begin{aligned} L &= \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{b_1}{a_{n-1}} + \frac{b_2}{a_{n-2}} + \dots + \frac{b_k}{a_{n-k}} \right) \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{b_1}{a_{n-1}} + \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{b_2}{a_{n-2}} + \dots + \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{b_k}{a_{n-k}} = \frac{b_1 + b_2 + \dots + b_k}{l} \\ l &= \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{b_1}{a_{n-1}} + \frac{b_2}{a_{n-2}} + \dots + \frac{b_k}{a_{n-k}} \right) \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_1}{a_{n-1}} + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_2}{a_{n-2}} + \dots + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_k}{a_{n-k}} = \frac{b_1 + b_2 + \dots + b_k}{L} \end{aligned}$$

所以 $Ll = b_1 + b_2 + \dots + b_k$, 只要证明 $L = l$ 便可得到需要的结论.

根据上极限定义, 可以取子列 $a_{n_i} \rightarrow L$, 不妨要求 $n_{i+1} - n_i > 2k + 2$, 然后关注各个 a_{n_i} 的上一项 a_{n_i-1} 构成的数列, 这也是一个有界数列, 所以一定存在收敛子列, 我们可以将其记为 $a_{n_{i_j}-1}, j = 1, 2, \dots$, 那么对于这个子列的每一项, 它后面的那一项 $a_{n_{i_j}}$ 构成的数列, 是之前取的数列 $a_{n_i} \rightarrow L$ 的子列, 自然成立 $\lim_{j \rightarrow \infty} a_{n_{i_j}-1} = l_1 \in [l, L]$, $\lim_{j \rightarrow \infty} a_{n_{i_j}} = L$, 为了方便起见, 我们将这两个数列分别记为 $a_{n_i-1}, a_{n_i} (n_{i_j})$ 的指标集是可列集, 按对角线或正方形法则排序)

进一步考虑每个 a_{n_i-1} 的上一项构成的数列, 作为有界数列一定存在收敛子列, 然后取出这个收敛子列, 则对于这个子列, 它后面一项构成的数列趋于 l_1 , 它后面第二项构成的数列趋于 L .

以此类推反复操作有限次(可以保证每次取的子列 $n_{i+1} - n_i \geq 2$, 从而反复取 $k+1$ 次后就有 $n_{i+1} - n_i \geq 2(k+1)$, 但本题用不上这个条件), 最终我们可以得到一列正整数 n_i 单调递增趋于无穷, 满足

$$a_{n_i} \rightarrow L, a_{n_i-1} \rightarrow l_1, a_{n_i-2} \rightarrow l_2, \dots, a_{n_i-k} \rightarrow l_k, a_{n_i-k-1} \rightarrow l_{k+1}, n_{i+1} - n_i \geq 2k + 2, l_1, \dots, l_{k+1} \in [l, L]$$

代入到条件递推式中, 取极限有

$$\begin{aligned} L &= \lim_{i \rightarrow \infty} a_{n_i} = \lim_{i \rightarrow \infty} \left(\frac{b_1}{a_{n_i-1}} + \frac{b_2}{a_{n_i-2}} + \dots + \frac{b_k}{a_{n_i-k}} \right) = \frac{b_1}{l_1} + \frac{b_2}{l_2} + \dots + \frac{b_k}{l_k} \leq \frac{b_1 + b_2 + \dots + b_k}{l} = L \\ \Rightarrow l_1 &= l_2 = \dots = l_k = l \\ l_1 &= \lim_{i \rightarrow \infty} a_{n_i-1} = \lim_{i \rightarrow \infty} \left(\frac{b_1}{a_{n_i-2}} + \frac{b_2}{a_{n_i-3}} + \dots + \frac{b_k}{a_{n_i-k-1}} \right) = \frac{b_1}{l_2} + \frac{b_2}{l_3} + \dots + \frac{b_k}{l_{k+1}} \geq \frac{b_1 + b_2 + \dots + b_k}{L} = l_1 \\ \Rightarrow l_2 &= l_3 = \dots = l_{k+1} = L \end{aligned}$$

于是 $L = l_1 = l_2 = l$ (这是公共的一个值, 注意 $k \geq 2$), 结论得证. 再对递推条件两边取极限得到极限值.

□

2.6.5 压缩映像

我们来看一种重要的处理模型, 压缩映像方法, 它是我们以后解决基础题的重要方法. 其思想内核有两种, 一种是找到不动点 x_0 , 然后得到某个 $L \in (0, 1)$, 使得

$$|x_n - x_0| \leq L|x_{n-1} - x_0| \leq \cdots \leq L^{n-1}|x_1 - x_0|.$$

还有一种是得到某个 $L \in (0, 1)$, 使得

$$|x_n - x_{n-1}| \leq L|x_{n-1} - x_{n-2}| \leq \cdots \leq L^{n-2}|x_2 - x_1|.$$

当数列由递推确定时, 我们有

$$|x_n - x_0| = |f(x_{n-1}) - f(x_0)|, |x_n - x_{n-1}| = |f(x_{n-1}) - f(x_{n-2})|,$$

因此往往可适用中值定理或者直接放缩法来得到渴望的 $L \in (0, 1)$, 特别强调 $L = 1$ 是不对的.

笔记 常规的递减递推数列求极限问题我们一般使用压缩映像证明. 压缩映像的书写过程往往比用递推函数的二次复合和数学归纳法的书写要简便的多.

注 当递推函数的不动点/极限点处导数大于等于 1 的时候, 就不可能压缩映射.

例题 2.80

1. 设 $x_1 > -1, x_{n+1} = \frac{1}{1+x_n}, n = 1, 2, \dots$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.

2. 求数列 $\sqrt{7}, \sqrt{7 - \sqrt{7}}, \sqrt{7 - \sqrt{7 + \sqrt{7}}}, \dots$ 极限.

解

1. **解法一 (递减递推归纳法):** 不妨设 $x_1 > 0$ (因为 $x_2 = \frac{1}{1+x_1} > 0$), 归纳可知 $x_n > 0$. 由于原递推函数是递减函数, 因此考虑递推函数的二次复合 $x_{n+2} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1+x_n}} = \frac{1+x_n}{2+x_n}$, 这个递推函数一定是单调递增的. 进而考虑

$$\frac{1+x}{2+x} - x = \frac{\left(x + \frac{\sqrt{5}+1}{2}\right)\left(\frac{\sqrt{5}-1}{2} - x\right)}{2+x}.$$

于是当 $x_1 \geq \frac{\sqrt{5}-1}{2}$ 时, 有 $x_3 - x_1 = \frac{1+x_1}{2+x_1} - x_1 \leq 0$, 即 $x_3 \leq x_1$. 从而由递增递推结论可知, $\{x_{2n-1}\}$ 单调递减且 $x_{2n-1} > \frac{\sqrt{5}-1}{2}, \forall n \in \mathbb{N}$. 此时 $x_2 < \frac{\sqrt{5}-1}{2}$ (由 $x = \frac{1}{1+x}$ 以及 $x_n > 0$ 可以解得不动点 $x_0 = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$, 又因为原数列是递减递推, 所以 x_n 与 x_0 大小关系交错. 而 $x_1 \geq \frac{\sqrt{5}-1}{2}$, 故 $x_2 < \frac{\sqrt{5}-1}{2}$). 于是 $x_4 - x_2 = \frac{1+x_2}{2+x_2} - x_2 > 0$, 即 $x_4 > x_2$. 从而由递增递推结论可知, $\{x_{2n}\}$ 单调递增且 $x_{2n} > \frac{\sqrt{5}-1}{2}, \forall n \in \mathbb{N}$.

因此由单调有界定理可知, $\{x_{2n}\}, \{x_{2n-1}\}$ 收敛. 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n} = a > 0, \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n-1} = b > 0$. 又由 $x_{2n} = \frac{1}{1+x_{2n}}, x_{2n-1} = \frac{1}{1+x_{2n-1}}, \forall n \in \mathbb{N}$, 再令 $n \rightarrow \infty$, 可得 $a = \frac{1}{1+a}, b = \frac{1}{1+b}$, 进而解得 $a = b = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$. 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n-1} = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$. 同理, 当 $x_1 < \frac{\sqrt{5}-1}{2}$ 时, 也有 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$.

解法二 (压缩映像): 不妨设 $x_1 > 0$ (用 $x_2 = \frac{1}{1+x_1} > 0$ 代替 x_1), 归纳可知 $x_n > 0$. 设 $x = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$, 则

$$|x_{n+1} - x| = \left| \frac{1}{1+x_n} - x \right| = \left| \frac{1}{1+x_n} - \frac{1}{1+x} \right| = \frac{|x_n - x|}{(1+x_n)(1+x)} \leq \frac{1}{1+x} |x_n - x|.$$

从而

$$|x_{n+1} - x| \leq \frac{1}{1+x} |x_n - x| \leq \frac{1}{(1+x)^2} |x_{n-1} - x| \leq \cdots \leq \frac{1}{(1+x)^n} |x_1 - x|.$$

于是令 $n \rightarrow \infty$, 得到 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_{n+1} - x| = 0$, 因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$.

2. 由条件可知, $x_{n+2} = \sqrt{7 - \sqrt{7 + x_n}}$, $\forall n \in \mathbb{N}$ (由此可解得 $x = 2$ 为不动点). 于是

$$\begin{aligned} |x_{n+2} - 2| &= |\sqrt{7 - \sqrt{7 + x_n}} - 2| = \frac{|3 - \sqrt{7 + x_n}|}{\sqrt{7 - \sqrt{7 + x_n}} + 2} \\ &= \frac{|2 - x_n|}{(\sqrt{7 - \sqrt{7 + x_n}} + 2)(3 + \sqrt{7 + x_n})} \leq \frac{1}{6}|x_n - 2|. \end{aligned}$$

从而对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$\begin{aligned} |x_{2n} - 2| &\leq \frac{1}{6}|x_{2n-2} - 2| \leq \frac{1}{6^2}|x_{2n-4} - 2| \leq \dots \leq \frac{1}{6^{n-1}}|x_2 - 2|; \\ |x_{2n+1} - 2| &\leq \frac{1}{6}|x_{2n-1} - 2| \leq \frac{1}{6^2}|x_{2n-3} - 2| \leq \dots \leq \frac{1}{6^n}|x_1 - 2|. \end{aligned}$$

上式两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 得到 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_{2n} - 2| = \lim_{n \rightarrow \infty} |x_{2n+1} - 2| = 0$. 因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n+1} = 2$. \square

例题 2.81 设数列 $x_1 \in \mathbb{R}$, $x_{n+1} = \cos x_n$, $n \in \mathbb{N}$, 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.

解 令 $g(x) = x - \cos x$, 则 $g'(x) = 1 + \sin x \geq 0$, 且 $g'(x)$ 不恒等于 0. 又 $g(0) = -1 < 0$, $g(1) = 1 - \cos 1 > 0$, 因此由零点存在定理可知, g 存在唯一零点 $x_0 \in (0, 1)$. 不妨设 $x_1 \in [-1, 1]$ (用 x_2 代替 x_1), 则 $x_n \in [-1, 1]$. 再令 $f(x) = \cos x$, 则 $f'(x) = -\sin x$. 于是记 $C \triangleq \max_{x \in [-1, 1]} |f'(x)| \in (0, 1)$.

故由 Lagrange 中值定理, 可得存在 $\theta_n \in (\min\{x_n, x_0\}, \max\{x_n, x_0\})$, 使得对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$|x_{n+1} - x_0| = |f(x_n) - f(x_0)| = |f'(\theta_n)| |x_n - x_0| \leq C |x_n - x_0|.$$

进而对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$|x_{n+1} - x_0| \leq C |x_n - x_0| \leq C^2 |x_{n-1} - x_0| \leq \dots \leq C^n |x_1 - x_0|.$$

上式两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 再结合 $C \in (0, 1)$, 可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_{n+1} - x_0| = 0$. 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$. \square

命题 2.19 (加强的压缩映像)

设可微函数 $f : [a, b] \rightarrow [a, b]$ 满足 $|f'(x)| < 1, \forall x \in [a, b]$. 证明: 对

$$x_1 \in [a, b], x_{n+1} = f(x_n), n \in \mathbb{N},$$

必有 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 存在.

注 注意到 f' 未必是连续函数, 所以 $\sup_{x \in [a, b]} |f'(x)|$ 未必可以严格小于 1.

笔记 实际上, 用压缩映像证明 $\{x_n\}$ 的极限是 x_0 , 也同时蕴含了 x_0 就是这个递推数列的唯一不动点 (反证由压缩映像易得此时 $\{x_n\}$ 有两个极限点, 再利用数列极限的唯一性易得).

证明 令 $g(x) = x - f(x)$, 则 $g(a) = a - f(a) \leq 0$, $g(b) = b - f(b) \geq 0$. 由零点存在定理可知, 存在 $x_0 \in [a, b]$, 使得 $x_0 = f(x_0)$. 令

$$h(x) = \begin{cases} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}, & x \neq x_0 \\ f'(x_0), & x = x_0 \end{cases}$$

则由导数定义可知 $h \in C[a, b]$. 又由 $|f'(x)| < 1, \forall x \in [a, b]$, 可知 $|h(x_0)| < 1$. 对 $\forall x \neq x_0$, 由 Lagrange 中值定理可知

$$|h(x)| = \left| \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \right| = |f'(\theta_x)| < 1, \quad \theta_x \in (\min\{x, x_0\}, \max\{x, x_0\})$$

故 $|h(x)| < 1, \forall x \in [a, b]$. 于是记 $L \triangleq \max_{x \in [a, b]} |h(x)| \in (0, 1)$. 因此再由 Lagrange 中值定理可得, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$|x_{n+1} - x_0| = |f(x_n) - f(x_0)| = |f'(\xi_n)| |x_n - x_0|, \quad \xi_n \in (\min\{x_n, x_0\}, \max\{x_n, x_0\})$$

从而对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$|f'(\xi_n)| = \left| \frac{f(x_n) - f(x_0)}{x_n - x_0} \right| = |h(x_n)| \leq L$$

进而对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$|x_{n+1} - x_0| = |f'(\xi_n)| |x_n - x_0| \leq L |x_n - x_0| \leq L^2 |x_{n-1} - x_0| \leq \cdots \leq L^n |x_1 - x_0|$$

上式两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_{n+1} - x_0| = 0$. 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$. □

命题 2.20 (反向压缩映像)

设 $x_{n+1} = f(x_n), n \in \mathbb{N}$ 满足

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a \in \mathbb{R}, x_n \neq a, \forall n \in \mathbb{N},$$

证明: 若 f 在 $x = a$ 可导, 则 $|f'(a)| \leq 1$. ◆

证明 (反证法) 假设 $|f'(a)| > 1$, 由导数定义及极限保号性可知, 存在 $r > 1, \delta > 0$, 使得

$$\left| \frac{f(x) - f(a)}{x - a} \right| \geq r > 1, \quad \forall x \in [a - \delta, a + \delta].$$

即

$$|f(x) - f(a)| \geq r|x - a|, \quad \forall x \in [a - \delta, a + \delta].$$

因为 f 在 $x = a$ 可导以及 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, 所以由 Heine 归结原则可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = f(a)$. 又 $x_{n+1} = f(x_n), \forall n \in \mathbb{N}$, 从而等式两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 可得 $a = f(a)$. 由于 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_n - a| = 0$, 因此存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得对 $\forall n \geq N$, 有

$$|x_{n+1} - a| = |f(x_n) - f(a)| \geq r|x_n - a|.$$

故对 $\forall n \geq N$, 有

$$|x_{n+1} - a| \geq r|x_n - a| \geq r^2|x_{n-1} - a| \geq \cdots \geq r^n|x_1 - x_0|.$$

上式两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 得到 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_{n+1} - a| = +\infty$, 矛盾. □

2.6.6 利用不等放缩求递推数列极限

例题 2.82 对 $x \geq 0$, 定义 $y_n(x) = \sqrt[n]{[x[x \cdots [x] \cdots]]}$, 这里一共 n 层取整, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n(x)$.

笔记 这里求极限运用了递推的想法找关系, 如果直接对取整函数用不等式放缩, 只能得到 $x - 1 < y_n(x) \leq x$, 这没什么用处, 因为放缩太粗糙了.

实际上, 由 Stolz 定理可知, 数列 $\frac{1}{n}$ 次幂的极限与其相邻两项项除的极限近似相等.

解 显然 $x \in [0, 1)$ 时 $y_n(x) = 0$, $x \in [1, 2)$ 时 $y_n(x) = 1$, 这两个式子对任意 n 都成立, 下面来看 $x \geq 2$ 时的极限.

令 $u_n(x) = (y_n(x))^n = \overbrace{[x[\cdots[x] \cdots]]}^{n \text{ 次复合}} \geq 0$, 由于单调递增函数的复合仍是单调递增函数, 且 $[x]$ 在 $[0, +\infty)$ 上单调递增, 故 $u_n(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上单调递增. 从而由 $u_n(x)$ 的单调性可得

$$u_n(x) \geq u_n(2) = \overbrace{[2[\cdots[2] \cdots]]}^{n \text{ 次复合}} = 2^n \rightarrow \infty, n \rightarrow \infty.$$

再结合 $[x]$ 的基本不等式: $x - 1 < [x] \leq x$ 可知

$$\begin{aligned} xu_{n-1}(x) - 1 &\leq u_n(x) = [xu_{n-1}(x)] \leq xu_{n-1}(x), \forall x \geq 2. \\ \Rightarrow x - \frac{1}{u_{n-1}(x)} &\leq \frac{u_n(x)}{u_{n-1}(x)} \leq x \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_n(x)}{u_{n-1}(x)} = x, \forall x \geq 2. \end{aligned}$$

再根据 Stolz 公式有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} y_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} u_n(x)^{\frac{1}{n}} = e^{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln u_n(x)}{n}} = e^{\lim_{n \rightarrow \infty} [\ln u_n(x) - \ln u_{n-1}(x)]} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_n(x)}{u_{n-1}(x)} = x.$$

因此

$$\lim_{n \rightarrow \infty} y_n(x) = \begin{cases} 0, & x \in [0, 1) \\ 1, & x \in [1, 2) \\ x, & x \geq 2 \end{cases}$$

□

2.6.7 可求通项

2.6.7.1 三角换元求通项

先来看能够直接构造出数列通项的例子. 这类问题只能靠记忆积累. 找不到递推数列通项就很难处理. 一般我们可以猜递推数列通项就是三角函数或双曲三角函数的形式, 再利用三角函数或双曲三角函数的性质递推归纳.

例题 2.83 设 $a_1 \in (0, 1), a_{n+1} = \sqrt{\frac{1+a_n}{2}}, n = 1, 2, \dots$, 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_1 a_2 \cdots a_n$.

笔记 本题是经典的例子, 注意此类问题如果不能求出通项就无法求出具体值, 本题便是一个能求出通项从而算出极限值的经典例子.

注 这类问题只能靠记忆积累.

解 利用

$$\cos \frac{\theta}{2} = \sqrt{\frac{1 + \cos \theta}{2}}, \theta \in \mathbb{R},$$

因为 $a_1 \in (0, 1)$, 所以一定存在 $\theta \in (0, \frac{\pi}{2})$, 使得 $a_1 = \cos \theta$. 则 $\theta = \arccos a_1, \sin \theta = \sqrt{1 - a_1^2}$. 并且由 $a_{n+1} = \sqrt{\frac{1+a_n}{2}}, n = 1, 2, \dots$ 可得

$$a_2 = \cos \frac{\theta}{2}, a_3 = \cos \frac{\theta}{2^2}, \dots, a_n = \cos \frac{\theta}{2^{n-1}}.$$

因此

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} a_1 a_2 \cdots a_n &= \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{k=0}^{n-1} \cos \frac{\theta}{2^k} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin \frac{\theta}{2^{n-1}}}{\sin \frac{\theta}{2^{n-1}}} \prod_{k=0}^{n-1} \cos \frac{\theta}{2^k} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin \frac{\theta}{2^{n-2}}}{2 \sin \frac{\theta}{2^{n-1}}} \prod_{k=0}^{n-2} \cos \frac{\theta}{2^k} \\ &= \cdots = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin 2\theta}{2^n \sin \frac{\theta}{2^{n-1}}} = \frac{\sin 2\theta}{2\theta} = \frac{\sin(2 \arccos a_1)}{2 \arccos a_1} = \frac{a_1 \sqrt{1 - a_1^2}}{\arccos a_1}. \end{aligned}$$

□

例题 2.84 设 $x_1 = \sqrt{5}, x_{n+1} = x_n^2 - 2$, 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_1 x_2 \cdots x_n}{x_{n+1}}.$$

笔记 这类问题只能靠记忆积累. 找不到递推数列通项就很难处理. 一般我们可以猜递推数列通项就是三角函数/双曲三角函数的形式, 再利用三角函数/双曲三角函数的性质递推归纳.

解 注意到 $\cos x = \frac{\sqrt{5}}{2}$ 在 \mathbb{R} 上无解, 因此推测类似的双曲三角函数可以做到. 设 $x_1 = 2 \cosh \theta, \theta \in (0, +\infty)$. 利用

$$\cosh x = 2 \cosh^2 \frac{x}{2} - 1, \forall x \in \mathbb{R},$$

我们归纳可证

$$x_n = 2 \cosh(2^{n-1} \theta), n = 1, 2, \dots.$$

于是利用 $\sinh(2x) = 2 \sinh x \cosh x, \forall x \in \mathbb{R}$, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_1 x_2 \cdots x_n}{x_{n+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^n \prod_{k=0}^{n-1} \cosh(2^k \theta)}{2 \cosh(2^n \theta)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^n \sinh \theta \prod_{k=0}^{n-1} \cosh(2^k \theta)}{2 \sinh \theta \cosh(2^n \theta)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^{n-1} \sinh(2\theta) \prod_{k=1}^{n-1} \cosh(2^k \theta)}{2 \sinh \theta \cosh(2^n \theta)}$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^{n-2} \sinh(2^2 \theta) \prod_{k=2}^{n-1} \cosh(2^k \theta)}{2 \sinh \theta \cosh(2^n \theta)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sinh 2^n \theta}{2 \sinh \theta \cosh(2^n \theta)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\tanh 2^n \theta}{2 \sinh \theta} = \frac{1}{2 \sinh \theta} = 1,$$

这里倒数第二个等号来自 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \tanh x = 1$. □

例题 2.85 设 $a_1 = 3, a_n = 2a_{n-1}^2 - 1, n = 2, 3, \dots$, 则计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{2^n a_1 a_2 \cdots a_{n-1}}.$$

注 因为双曲三角函数 $\cosh x$ 在 $(0, +\infty)$ 上的值域为 $(1, +\infty)$, 并且 $\cosh x$ 在 $(0, +\infty)$ 上严格递增, 所以一定存在唯一的 $\theta \in (0, +\infty)$, 使得 $a_1 = \cosh \theta = 3$.

证明 设 $a_1 = \cosh \theta = 3, \theta \in (0, +\infty)$. 则利用 $\cosh 2\theta = 2 \cosh^2 \theta - 1$, 再结合条件归纳可得

$$a_n = 2a_{n-1}^2 - 1 = \cosh 2^{n-1} \theta, \quad n = 2, 3, \dots$$

于是

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{2^n a_1 a_2 \cdots a_{n-1}} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\cosh 2^{n-1} \theta}{2^n \prod_{k=1}^{n-1} \cosh 2^{k-1} \theta} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sinh \theta \cosh 2^{n-1} \theta}{2^n \sinh \theta \prod_{k=1}^{n-1} \cosh 2^{k-1} \theta} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sinh \theta \cosh 2^{n-1} \theta}{2^{n-1} \sinh 2\theta \prod_{k=2}^{n-1} \cosh 2^{k-1} \theta} = \dots = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sinh \theta \cosh 2^{n-1} \theta}{2 \sinh 2^{n-1} \theta} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sinh \theta}{2 \tanh 2^{n-1} \theta} \xrightarrow{\lim_{n \rightarrow \infty} \tanh 2^{n-1} \theta = 1} \frac{\sinh \theta}{2} = \frac{\sqrt{\cosh^2 \theta - 1}}{2} = \sqrt{2}. \end{aligned}$$

□

例题 2.86 设 $y_0 \geq 2, y_n = y_{n-1}^2 - 2, n \in \mathbb{N}$, 计算 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{y_0 y_1 \cdots y_n}$.

笔记 关于求和的问题, 要注意求和的通项能否凑成相邻两项相减的形式, 从而就能直接求和消去中间项, 进而将求和号去掉.

注 因为双曲三角函数 $2 \cosh x$ 在 $(0, +\infty)$ 上的值域为 $(1, +\infty)$, 并且 $2 \cosh x$ 在 $(0, +\infty)$ 上严格递增, 所以一定存在唯一的 $\theta \in (0, +\infty)$, 使得 $y_0 = 2 \cosh \theta \geq 2$.

证明 设 $y_0 = 2 \cosh \theta, \theta \in (0, +\infty)$, 则利用 $\cosh 2\theta = 2 \cosh^2 \theta - 1$, 再结合条件归纳可得

$$y_1 = y_0^2 - 2 = 4 \cosh^2 \theta - 2 = 2(2 \cosh^2 \theta - 1) = 2 \cosh 2\theta,$$

$$y_2 = y_1^2 - 2 = 4 \cosh^2 2\theta - 2 = 2(2 \cosh^2 2\theta - 1) = 2 \cosh 4\theta,$$

.....

$$y_n = y_{n-1}^2 - 2 = 4 \cosh^2 2^{n-1} \theta - 2 = 2(2 \cosh^2 2^{n-1} \theta - 1) = 2 \cosh 2^n \theta,$$

.....

于是

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{y_0 y_1 \cdots y_n} &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\prod_{k=0}^n 2^{2k+1} \cosh 2^k \theta} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sinh \theta}{2^{n+1} \sinh \theta \prod_{k=0}^n \cosh 2^k \theta} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sinh \theta}{2^n \sinh 2\theta \prod_{k=1}^n \cosh 2^k \theta} = \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sinh \theta}{\sinh 2^{n+1} \theta} \\ &= 2 \sinh \theta \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{e^{2^{n+1} \theta} - e^{-2^{n+1} \theta}} = 2 \sinh \theta \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{2^{n+1} \theta}}{e^{2^{n+2} \theta} - 1} \\ &= 2 \sinh \theta \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{e^{2^{n+1} \theta} - 1} - \frac{1}{e^{2^{n+2} \theta} - 1} \right) = \frac{2 \sinh \theta}{e^{2\theta} - 1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{e^\theta - e^{-\theta}}{e^\theta (e^\theta - e^{-\theta})} = e^{-\theta} = \cosh \theta - \sinh \theta \\
&= \frac{y_0}{2} - \sqrt{\cosh^2 \theta - 1} = \frac{y_0}{2} - \sqrt{\frac{y_0^2}{4} - 1}.
\end{aligned}$$

□

例题 2.871. 设 $x_1 = \sqrt{5}$, $x_{n+1} = x_n^2 - 2$, 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_1 x_2 \cdots x_n}{x_{n+1}}.$$

2. 设 $a_1 = 3$, $a_n = 2a_{n-1}^2 - 1$, $n = 2, 3, \dots$, 则计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{2^n a_1 a_2 \cdots a_{n-1}}.$$

3. 设 $y_0 > 2$, $y_n = y_{n-1}^2 - 2$, $n \in \mathbb{N}$, 计算

$$\prod_{n=0}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{y_n}\right).$$

解

1.

2.

3.

□

2.6.7.2 直接求通项公式

直接利用高中知识, 求出几类递推数列的通项, 进而求出极限.

命题 2.21 (可直接求通项——类型一)已知数列 $\{a_n\}$ 满足 $a_{n+1} = pa_n + q$, 则 $\{a_n\}$ 的通项公式为

$$a_n = \begin{cases} a_1 + (n-1)q, & p = 1; \\ \left(a_1 - \frac{q}{1-p}\right) p^{n-1} + \frac{q}{1-p}, & p \neq 1. \end{cases}$$

于是, 当 $p = 1$ 时, $\{a_n\}$ 收敛等价于 $q = 0$; 当 $p \neq 1$ 时, $\{a_n\}$ 收敛等价于 $|p| < 1$ 或 $a_1 = \frac{q}{1-p}$.

◆

证明 当 $p = 1$ 时, 有 $a_{n+1} - a_n = q$, 所以 $\{a_n\}$ 是以 q 为公差的等差数列, 从而 $a_n = a_1 + (n-1)q$.当 $p \neq 1$ 时, 可设 $a_{n+1} - A = p(a_n - A)$, 即 $a_{n+1} = pa_n + (1-p)A$, 由对应系数相等可知 $(1-p)A = q$, 即 $A = \frac{q}{1-p}$, 此时 $\left\{a_n - \frac{q}{1-p}\right\}$ 是以 p 为公比的等比数列, 于是

$$a_n - \frac{q}{1-p} = \left(a_1 - \frac{q}{1-p}\right) p^{n-1}.$$

即 $a_n = \left(a_1 - \frac{q}{1-p}\right) p^{n-1} + \frac{q}{1-p}$.

□

命题 2.22 (可直接求通项——类型二)已知数列 $\{a_n\}$ 满足 $a_{n+2} + pa_{n+1} + qa_n = 0$ (p, q 不全为零), 则可以构造特征方程 $x^2 + px + q = 0$, 根据 $\Delta = p^2 - 4q$ 来分类:(1) 当 $\Delta = 0$ 时, 此时特征方程有二重根, 设为 x_0 , 则 $a_n = (nC_1 + C_2)x_0^n$;(2) 当 $\Delta \neq 0$ 时, 设特征方程的两个根为 x_1, x_2 , 则 $a_n = C_1 x_1^n + C_2 x_2^n$.

其中 C_1, C_2 是待定常数, 具体可将 a_1, a_2 的值代入解得.



证明 设 $\{a_n\}$ 满足 $a_{n+2} - Aa_{n+1} = B(a_{n+1} - Aa_n)$, 即 $a_{n+2} - (A+B)a_{n+1} + ABa_n = 0$, 结合已知可得 $A+B = -p$, $AB = q$, 即 A, B 就是特征方程 $x^2 + px + q = 0$ 的两个解.

(1) 当 $\Delta = 0$ 时, 此时设特征方程的二重根为 x_0 , 即 $A = B = x_0 \neq 0$, 于是

$$a_{n+2} - Aa_{n+1} = A(a_{n+1} - Aa_n).$$

从而

$$a_n - Aa_{n-1} = A(a_{n-1} - Aa_{n-2}) = \cdots = A^{n-2}(a_2 - Aa_1).$$

两边同除以 A^n 就有

$$\frac{a_n}{A^n} - \frac{a_{n-1}}{A^{n-1}} = \frac{a_2 - Aa_1}{A^2}.$$

于是

$$\frac{a_n}{A^n} = \frac{a_1}{A} + \sum_{k=2}^n \left(\frac{a_k}{A^k} - \frac{a_{k-1}}{A^{k-1}} \right) = \frac{a_1}{A} + (n-1) \cdot \frac{a_2 - Aa_1}{A^2} \stackrel{\text{def}}{=} nC_1 + C_2.$$

于是 $a_n = (nC_1 + C_2)A^n = (nC_1 + C_2)x_0^n$.

(2) 当 $\Delta \neq 0$ 时, 此时设特征方程的两个根为 x_1, x_2 , 则 $A = x_1, B = x_2$ 或 $A = x_2, B = x_1$, 于是

$$\begin{cases} a_{n+2} - x_1 a_{n+1} = x_2(a_{n+1} - x_1 a_n); \\ a_{n+2} - x_2 a_{n+1} = x_1(a_{n+1} - x_2 a_n). \end{cases}$$

从而

$$\begin{cases} a_n - x_1 a_{n-1} = x_2(a_{n-1} - x_1 a_{n-2}) = x_2^2(a_{n-2} - x_1 a_{n-3}) = \cdots = x_2^{n-2}(a_2 - x_1 a_1); \\ a_n - x_2 a_{n-1} = x_1(a_{n-1} - x_2 a_{n-2}) = x_1^2(a_{n-2} - x_2 a_{n-3}) = \cdots = x_1^{n-2}(a_2 - x_2 a_1). \end{cases}$$

上面第一个式子两端乘以 x_1 减去第二个式子两端乘以 x_2 得

$$(x_1 - x_2)a_n = x_1^{n-1}(a_2 - x_2 a_1) - x_2^{n-1}(a_2 - x_1 a_1).$$

即

$$a_n = \frac{x_1^{n-1}(a_2 - x_2 a_1) - x_2^{n-1}(a_2 - x_1 a_1)}{x_1 - x_2} \stackrel{\text{def}}{=} C_1 x_1^n + C_2 x_2^n.$$



命题 2.23 (可直接求通项——类型三)

已知数列 $\{a_n\}$ 满足 $a_{n+1} = \frac{Aa_n + B}{Ca_n + D}$, 此时对应的特征函数为 $f(x) = \frac{Ax + B}{Cx + D}$, 则

(1) 当方程 $f(x) = x$ 只有一个解 x_0 时, 则数列 $\left\{ \frac{1}{a_n - x_0} \right\}$ 是等差数列;

(2) 当方程 $f(x) = x$ 有两个解 x_1, x_2 时, 则数列 $\left\{ \frac{a_n - x_1}{a_n - x_2} \right\}$ 是等比数列.



证明



命题 2.24 (可直接求通项——类型四)

已知数列 $\{a_n\}$ 满足 $a_{n+1} = \frac{Aa_n^2 + B}{2Aa_n + D}$, 此时对应的特征函数为 $f(x) = \frac{Ax^2 + B}{2Ax + D}$, 则

(1) 当方程 $f(x) = x$ 有两个解 x_1, x_2 时, 则数列 $\left\{ \frac{a_n - x_1}{a_n - x_2} \right\}$ 满足 $\frac{a_n - x_1}{a_n - x_2} = \left(\frac{a_{n-1} - x_1}{a_{n-1} - x_2} \right)^2$;

(2) 当方程 $f(x) = x$ 只有一个解 x_0 时, 则数列 $\{a_n - x_0\}$ 是等比数列.



证明

□

例题 2.88 设 $a_2 > a_1 > 0, a_n = \sqrt{a_{n-1}a_{n-2}}(n = 3, 4, \dots)$, 证明数列 $\{a_n\}$ 收敛, 并求极限值.

证明 由条件可知

$$\ln a_n = \frac{\ln a_{n-1} + \ln a_{n-2}}{2}, n = 3, 4, \dots$$

从而

$$\begin{aligned} \ln a_n - \ln a_{n-1} &= \frac{\ln a_{n-2} - \ln a_{n-1}}{2} = -\frac{1}{2}(\ln a_{n-1} - \ln a_{n-2}) \\ &= \left(-\frac{1}{2}\right)^{n-2}(\ln a_2 - \ln a_1), n = 3, 4, \dots \end{aligned}$$

于是

$$\begin{aligned} \ln a_n &= \ln a_1 + \sum_{k=2}^n (\ln a_k - \ln a_{k-1}) = \ln a_1 + (\ln a_2 - \ln a_1) \sum_{k=2}^n \left(-\frac{1}{2}\right)^{k-2} \\ &= \ln a_1 + (\ln a_2 - \ln a_1) \frac{1 - \left(-\frac{1}{2}\right)^{n-1}}{1 + \frac{1}{2}} \rightarrow \ln a_1 + \frac{2(\ln a_2 - \ln a_1)}{3}, n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

$$\text{故 } \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a_1 \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^{\frac{2}{3}} = a_1^{\frac{1}{3}} a_2^{\frac{2}{3}}.$$

□

2.6.7.3 凑出可求通项的递推数列

利用比值换元等方法, 可以将原本不能直接求通项的递推数列转化成可三角换元或用高中方法求通项的递推数列. 求出通项后, 后续问题就很简单了.

例题 2.89 设 $a > b > 0$, 定义 $a_0 = a, b_0 = b, a_{n+1} = \frac{a_n + b_n}{2}, b_{n+1} = \frac{2a_n b_n}{a_n + b_n}$, 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n, \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$.

注 这是算数-调和平均数数列, 与算术-几何平均不同, 这个通项以及极限值都可以求出来.

笔记 $x_{n+1} = \frac{1}{2} \left(x_n + \frac{1}{x_n} \right)$ 是一个经典的可求通项的递推数列 (高中学过), 处理方法必须掌握. 即先求解其特征方程, 然后用 x_{n+1} 分别减去两个特征根再作商, 再将递推式代入这个分式, 反复递推得到一个等比数列, 进而得到 x_n 的通项. 具体步骤见下述证明.

证明 由条件可得

$$a_{n+1} = \frac{a_n + b_n}{2}, b_{n+1} = \frac{2a_n b_n}{a_n + b_n} = \frac{a_n b_n}{a_{n+1}} \Rightarrow a_{n+1} b_{n+1} = a_n b_n = \dots = a_0 b_0 = ab.$$

因此 $a_{n+1} = \frac{1}{2} \left(a_n + \frac{ab}{a_n} \right)$. 令 $a_n = \sqrt{ab} x_n, x_0 = \sqrt{\frac{a}{b}} > 1$, 则 $x_{n+1} = \frac{1}{2} \left(x_n + \frac{1}{x_n} \right), \forall n \in \mathbb{N}$. 从而

$$\frac{x_{n+1} - 1}{x_{n+1} + 1} = \frac{\frac{1}{2} \left(x_n + \frac{1}{x_n} \right) - 1}{\frac{1}{2} \left(x_n + \frac{1}{x_n} \right) + 1} = \frac{(x_n - 1)^2}{(x_n + 1)^2} = \dots = \left(\frac{x_0 - 1}{x_0 + 1} \right)^{2^{n+1}} \Rightarrow \frac{x_n - 1}{x_n + 1} = C^{2^n}, C = \frac{x_0 - 1}{x_0 + 1} \in (0, 1).$$

于是 $x_n = \frac{1 + C^{2^n}}{1 - C^{2^n}}$. 再由 $a_n = \sqrt{ab} x_n$ 可得

$$\begin{aligned} a_n &= \sqrt{ab} \frac{1 + C^{2^n}}{1 - C^{2^n}} \rightarrow \sqrt{ab}, n \rightarrow \infty. \\ b_n &= \frac{ab}{a_n} \rightarrow \sqrt{ab}, n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

□

例题 2.90 设 $a_{n+1} = \frac{2a_n b_n}{a_n + b_n}, b_{n+1} = \sqrt{a_{n+1} b_n}$, 证明: a_n, b_n 收敛到同一极限, 并且在 $a_1 = 2\sqrt{3}, b_1 = 3$ 时, 上述极限值为 π .

注 这是几何 - 调和平均数数列, 通项也能求出来, 自然求极限就没有任何问题.

笔记 (1) 因为 a_n, b_n 的递推式都是齐次式, 所以我们尝试比值换元, 将其转化为可求通项的递推数列. 实际上, 我们利用的比值换元是 $c_n = \frac{b_n}{a_n}$, 但是为了避免讨论数列 a_n 能否取 0 的情况, 我们就取 $b_n = a_n c_n$.

(2) 三角换元求通项的一些问题: 由递推条件易证 $a_n, b_n \geq 0$, 其实当 a_n, b_n 中出现为零的项时, 由递推条件易知 a_n, b_n 后面的所有项都为零, 此时结论平凡. 因此我们只需要考虑 $a_n, b_n > 0$ 的情况. 此时直接设 $\cos x_1 = c_1 = \frac{b_1}{a_1}$ 似乎不太严谨. 因为虽然 $c_1 > 0$, 但是 c_1 不一定在 $(0, 1)$ 内, 所以我们需要对其进行分类讨论.

当 $c_1 \in (0, 1)$ 时, 设 $\cos x_1 = c_1 = \frac{b_1}{a_1}$, 其中 $x_1 \in (0, \frac{\pi}{2})$;

当 $c_1 > 1$ 时, 设 $\cosh x_1 = c_1 = \frac{b_1}{a_1}$, 其中 $x_1 \in (0, +\infty)$.

实际上, 我们直接设 $\cos x_1 = c_1 = \frac{b_1}{a_1}$, 只要将 x_1 看作一个复数, 就可以避免分类讨论. 因为由复变函数论可知, $\cos x$ 在复数域上的性质与极限等结论与在实数域上相同, 而且由 $c_1 > 0$ 可知, 一定存在一个复数 x_1 , 使得 $\cos x_1 = c_1$. 所以这样做是严谨的.(考试的时候最好还是分类讨论书写)

证明 设 $b_n = a_n c_n$ 代入有

$$a_{n+1} = \frac{2a_n b_n}{a_n + b_n} = \frac{2a_n c_n}{c_n + 1}, a_{n+1} c_{n+1} = \sqrt{a_{n+1} a_n c_n} \Rightarrow \frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{c_n}{c_{n+1}^2} = \frac{2c_n}{c_n + 1} \Rightarrow c_{n+1} = \sqrt{\frac{c_n + 1}{2}} \quad (2.71)$$

设 $\cos x_1 = c_1 = \frac{b_1}{a_1}$, 其中 $x_1 \in \mathbb{C}$, 则由(2.71)式归纳可得 $c_n = \cos\left(\frac{x_1}{2^{n-1}}\right)$. 代入回去求 a_n, b_n 有

$$\begin{aligned} c_n &= \frac{b_n}{a_n} = \cos\left(\frac{x_1}{2^{n-1}}\right), b_{n+1} = \sqrt{a_{n+1} b_n} \Rightarrow b_{n+1}^2 = a_{n+1} b_n = \frac{b_{n+1} b_n}{c_{n+1}} \Rightarrow \frac{b_{n+1}}{b_n} = \frac{1}{\cos\left(\frac{x_1}{2^n}\right)} \\ &\Rightarrow \frac{b_{n+1}}{b_1} = \frac{1}{\cos\left(\frac{x_1}{2}\right) \cos\left(\frac{x_1}{2^2}\right) \cdots \cos\left(\frac{x_1}{2^n}\right)} = \frac{2^n \sin \frac{x_1}{2^n}}{\sin x_1} \Rightarrow b_n = b_1 \frac{2^{n-1} \sin \frac{x_1}{2^{n-1}}}{\sin x_1} \\ &\Rightarrow a_n = \frac{b_n}{c_n} = \frac{b_1 \frac{2^{n-1} \sin \frac{x_1}{2^{n-1}}}{\sin x_1}}{\cos \frac{x_1}{2^{n-1}}} = 2^{n-1} \frac{b_1}{\sin x_1} \tan \frac{x_1}{2^{n-1}}, \cos x_1 = c_1 = \frac{b_1}{a_1} \end{aligned}$$

由此可见

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \frac{b_1 x_1}{\sin x_1} = \frac{b_1 \arccos \frac{b_1}{a_1}}{\sqrt{1 - \frac{b_1^2}{a_1^2}}} = \frac{a_1 b_1 \arccos \frac{b_1}{a_1}}{\sqrt{a_1^2 - b_1^2}}$$

所以收敛到同一极限对于 $a_1 = 2\sqrt{3}, b_1 = 3$ 的情况有

$$\cos x_1 = \frac{3}{2\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{2}, x_1 = \frac{\pi}{6}, \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \frac{b_1 x_1}{\sin x_1} = \pi$$

结论得证. □

例题 2.91 设 $a_n = 2^{n-1} - 3a_{n-1}, n \geq 1$, 求 a_0 的所有可能值, 使得 a_n 严格单调递增.

证明 直接裂项, 求通项即可得到

$$\begin{aligned} \frac{a_{n+1}}{(-3)^{n+1}} &= \frac{a_n}{(-3)^n} + \frac{2^n}{(-3)^{n+1}} \Rightarrow \frac{a_{n+1}}{(-3)^{n+1}} - \frac{a_n}{(-3)^n} = \frac{2^n}{(-3)^{n+1}} \\ &\Rightarrow \frac{a_{n+1}}{(-3)^{n+1}} = \frac{a_0}{(-3)^0} - \frac{1}{3} \left(1 + \left(-\frac{2}{3}\right) + \cdots + \left(-\frac{2}{3}\right)^n\right) = a_0 - \frac{1}{3} \frac{1 - \left(-\frac{2}{3}\right)^{n+1}}{\frac{5}{3}} \\ &\Rightarrow \frac{a_n}{(-3)^n} = a_0 - \frac{1}{5} \left(1 - \left(-\frac{2}{3}\right)^n\right) \Rightarrow a_n = \left(a_0 - \frac{1}{5}\right) (-3)^n + \frac{1}{5} 2^n. \end{aligned}$$

由此可见 $a_0 = \frac{1}{5}$ 是唯一解. □

例题 2.92 设 $x_1 > 0, x_{n+1} = 1 + \frac{1}{x_n}$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.

证明 解方程 $x^2 - x - 1 = 0 \Rightarrow \lambda_1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}, \lambda_2 = \frac{1 - \sqrt{5}}{2}$, 于是

$$\begin{aligned} \frac{x_{n+1} - \lambda_1}{x_{n+1} - \lambda_2} &= \frac{1 + \frac{1}{x_n} - \lambda_1}{1 + \frac{1}{x_n} - \lambda_2} = \frac{(1 - \lambda_1)x_n + 1}{(1 - \lambda_2)x_n + 1} = \frac{\lambda_2 x_n + 1}{\lambda_1 x_n + 1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{x_n + \frac{1}{\lambda_2}}{x_n + \frac{1}{\lambda_1}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{x_n - \lambda_1}{x_n - \lambda_2} \\ &\Rightarrow \frac{x_{n+1} - \lambda_1}{x_{n+1} - \lambda_2} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^n \frac{x_1 - \lambda_1}{x_1 - \lambda_2} \rightarrow 0, n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lambda_1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$. □

例题 2.93 设 $a_{n+1} = \sqrt{a_n + 2}$, 求 a_n 的通项公式.

证明 设 $a_n = 2b_n$ 则问题转化为已知 $b_{n+1} = \sqrt{\frac{b_n + 1}{2}}$, 求 b_n 的通项公式. 由**例题 2.90**, 立即得到

$$a_n = 2 \cos \frac{\theta_1}{2^{n-1}}, \cos \theta_1 = \frac{1}{2} a_1.$$

□

2.6.7.4 直接凑出通项

例题 2.94 设 $a_1 = \frac{1}{2}, a_{n+1} = 2a_n^2 + 2a_n$, 求 a_n 的通项公式.

证明

$$\begin{aligned} a_{n+1} = 2a_n^2 + 2a_n &= 2 \left(a_n + \frac{1}{2}\right)^2 - \frac{1}{2} \Rightarrow 2a_{n+1} + 1 = (2a_n + 1)^2 = \cdots = (2a_1 + 1)^{2^n} \\ &\Rightarrow a_n = \frac{(2a_1 + 1)^{2^{n-1}} - 1}{2} = \frac{2^{2^{n-1}} - 1}{2}. \end{aligned}$$

□

2.6.7.5 凑裂项

凑裂项: 根据已知的递推式, 将需要求解的累乘或求和的通项凑成裂项的形式, 使得其相邻两项相乘或相加可以抵消中间项, 从而将累乘或求和号去掉.

例题 2.95 设 $a_1 = 1, a_n = n(a_{n-1} + 1), x_n = \prod_{k=1}^n \left(1 + \frac{1}{a_k}\right)$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.

证明 由条件可知 $a_n + 1 = \frac{a_{n+1}}{n+1}$, 从而

$$x_n = \prod_{k=1}^n \left(1 + \frac{1}{a_k}\right) = \prod_{k=1}^n \frac{a_k + 1}{a_k} = \prod_{k=1}^n \frac{a_{k+1}}{(k+1)a_k} = \frac{a_{n+1}}{a_1} \frac{1}{(n+1)!} = \frac{a_{n+1}}{(n+1)!}.$$

再根据 $a_n = n(a_{n-1} + 1)$ 可得

$$\frac{a_n}{n!} = \frac{a_{n-1}}{(n-1)!} + \frac{1}{(n-1)!}.$$

故

$$x_n = \frac{a_{n+1}}{(n+1)!} = \frac{a_n}{n!} + \frac{1}{n!} = \frac{a_{n-1}}{(n-1)!} + \frac{1}{(n-1)!} + \frac{1}{n!} = \cdots = \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \rightarrow e.$$

□

例题 2.96 设 $y_0 > 2, y_n = y_{n-1}^2 - 2, n \in \mathbb{N}$, 计算 $\prod_{n=0}^{\infty} (1 - \frac{1}{y_n})$.

笔记 关于累乘的问题, 要注意累乘的通项能否凑成相邻两项相除的形式, 从而就能直接累乘消去中间项, 进而将累乘号去掉.

本题是利用已知条件和平方差公式将累乘的通项能否凑成相邻两项相除的形式.

注 本题实际上可以三角换元求通项, 见**例题 2.86**.

证明 一方面

$$y_n + 1 = y_{n-1}^2 - 1 = (y_{n-1} - 1)(y_{n-1} + 1) \Rightarrow y_{n-1} - 1 = \frac{y_n + 1}{y_{n-1} + 1} \Rightarrow y_n - 1 = \frac{y_{n+1} + 1}{y_n + 1}.$$

另外一方面

$$y_n - 2 = y_{n-1}^2 - 4 = (y_{n-1} - 2)(y_{n-1} + 2) \Rightarrow y_n - 2 = (y_{n-1} - 2)y_{n-2}^2 \Rightarrow y_n = \sqrt{\frac{y_{n+2} - 2}{y_{n+1} - 2}}.$$

于是结合 $\lim_{m \rightarrow \infty} y_m = +\infty$ 我们有

$$\begin{aligned} \prod_{n=0}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{y_n}\right) &= \prod_{n=0}^{\infty} \frac{y_n - 1}{y_n} = \prod_{n=0}^{\infty} \left(\frac{y_{n+1} + 1}{y_{n+1} - 2} \cdot \sqrt{\frac{y_{n+1} - 2}{y_{n+2} - 2}}\right) = \lim_{m \rightarrow \infty} \prod_{n=0}^m \left(\frac{y_{n+1} + 1}{y_{n+1} - 2} \cdot \sqrt{\frac{y_{n+1} - 2}{y_{n+2} - 2}}\right) \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{y_{m+1} + 1}{y_0 + 1} \cdot \sqrt{\frac{y_1 - 2}{y_{m+2} - 2}} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{y_{m+1} + 1}{\sqrt{y_{m+1}^2 - 4}} \cdot \frac{\sqrt{y_0^2 - 4}}{y_0 + 1} = \frac{\sqrt{y_0^2 - 4}}{y_0 + 1}. \end{aligned}$$

□

2.6.7.6 母函数法求通项

例题 2.97 设 $a_{n+1} = a_n + \frac{2}{n+1}a_{n-1}$, $n \geq 1$, $a_0 > 0$, $a_1 > 0$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n^2}$.

注 本题采用单调有界只能证明极限存在, 而并不能算出来极限值:

$$\frac{a_{n+1}}{(n+1)^2} - \frac{a_n}{n^2} = \frac{a_n + \frac{2}{n+1}a_{n-1}}{(n+1)^2} - \frac{a_n}{n^2} = \frac{2n^2a_{n-1} - (2n+1)(n+1)a_n}{n^2(n+1)^3} < 0$$

笔记 这类线性递推数列问题采用母函数方法是无敌的, 因为能求出来通项公式. 但是注意一般只有递推中只含 n 的一次项时才能用, 否则得到的是二阶微分方程, 很难解出母函数 $f(x)$.

证明 设 $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 则根据条件有

$$\begin{aligned} f'(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^{n-1} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) a_{n+1} x^n = a_1 + \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) \left(a_n + \frac{2}{n+1} a_{n-1}\right) x^n \\ &= a_1 + \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^n + \sum_{n=1}^{\infty} a_n x^n + 2 \sum_{n=1}^{\infty} a_{n-1} x^n = a_1 + x f'(x) + f(x) - a_0 + 2x f(x) \\ \Rightarrow f'(x) + \frac{2x+1}{1-x} f(x) &= \frac{a_1 - a_0}{1-x}, f(0) = a_0, f'(0) = a_1 \end{aligned}$$

这是一阶线性微分方程, 容易求出

$$f(x) = \frac{2x^2 - 6x + 5}{(1-x)^3} \frac{a_1 - a_0}{4} + \frac{e^{-2x}}{(1-x)^3} \frac{9a_0 - 5a_1}{4} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$$

然后对左边这两个函数 (先不看系数) 做泰勒展开, 关注 x^n 前面的 n^2 项系数, 就对应极限.(利用 Cauchy 和计算级数乘积)

$$\begin{aligned} \frac{1}{1-x} &= \sum_{n=0}^{\infty} x^n \Rightarrow \frac{1}{(1-x)^2} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)x^n, \frac{1}{(1-x)^3} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+2)(n+1)}{2} x^n \\ \frac{2x^2 - 6x + 5}{(1-x)^3} &= (2x^2 - 6x + 5) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+2)(n+1)}{2} x^n = \sum_{n=0}^{\infty} (5b_n - 6b_{n-1} + 2b_{n-2}) x^n \\ b_n &= \frac{(n+2)(n+1)}{2} \Rightarrow 5b_n - 6b_{n-1} + 2b_{n-2} = \frac{1}{2}n^2 + O(n) \end{aligned}$$

由此可见第一部分对应着极限 $\frac{a_1 - a_0}{8}$, 然后算第二部分

$$\frac{e^{-2x}}{(1-x)^3} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-2)^m}{m!} x^m \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+2)(n+1)}{2} x^n = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m+n=k} \frac{(-2)^m}{m!} \frac{(n+2)(n+1)}{2} x^k$$

所以每一个 x^m 项相应的系数是

$$\sum_{k=0}^m \frac{(-2)^m}{m!} \frac{(k+2-m)(k+1-m)}{2} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^m \frac{(-2)^m}{m!} (m-(k-1))(m-(k-2))$$

由 Stolz 公式和 e^x 的无穷级数展开式可得, 对应的极限为

$$\frac{1}{2} \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=0}^m \frac{(-2)^m}{m!} (m^2 - (2k-3)m + (k-1)(k-2))}{m^2} = \frac{1}{2} \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^m \frac{(-2)^m}{m!} = \frac{1}{2e^2}$$

这是因为括号里面的 m 一次项和常数项部分, 对应的求和的极限是零, 由 stolz 公式是显然的. 所以第二部分提供了 $\frac{9a_0 - 5a_1}{8e^2}$, 最终所求极限为 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n^2} = \frac{a_1 - a_0}{8} + \frac{9a_0 - 5a_1}{8e^2}$. \square

2.6.7.7 强求通项和强行裂项

若数列 $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}, \{b_n\}_{n=0}^{\infty}, \{d_n\}_{n=0}^{\infty}$ 满足下列递推条件之一:

1. $a_n = d_n a_{n-1} + b_n, n = 1, 2, \dots;$
2. $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - d_n a_{n-1}) = A.$

则我们都可以考虑对 a_n 进行强行裂项和强求通项, 从而可以将 a_n 写成关于 b_n, d_n 或 A, d_n 的形式, 进而将题目条件和要求进行转化.

命题 2.25 (强求通项和强行裂项)

- (1) 若数列 $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}, \{b_n\}_{n=0}^{\infty}, \{d_n\}_{n=0}^{\infty}$ 满足递推条件:

$$a_n = d_n a_{n-1} + b_n, n = 1, 2, \dots, \quad (2.72)$$

则令 $c_n = \prod_{k=1}^n \frac{1}{d_k}, n = 0, 1, \dots$, 一定有

$$a_n = \frac{1}{c_n} \sum_{k=1}^n c_k b_k + a_0, n = 0, 1, \dots.$$

- (2) 若数列 $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}, \{d_n\}_{n=0}^{\infty}$ 满足递推条件:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - d_n a_{n-1}) = A, \quad (2.73)$$

则令 $c_n = \prod_{k=1}^n \frac{1}{d_k}, n = 0, 1, \dots$, 再令 $b_0 = 1, b_n = a_n - \frac{c_{n-1} a_{n-1}}{c_n}, n = 1, 2, \dots$, 一定有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = A,$$

$$a_n = \frac{1}{c_n} \sum_{k=1}^n c_k b_k + a_0, n = 0, 1, \dots.$$

注 此时只能都对 a_n 进行强行裂项和强求通项, b_n 和 d_n 都无法通过这种方法强行裂项和强求通项!

笔记 也可以通过观察原数列 a_n 的递推条件直接得到需要构造的数列, 从而将 a_n 强行裂项和强求通项. 具体可见例题 2.98 解法一. (1) 的具体应用可见例题 2.99 笔记; (2) 的具体应用可见例题 2.98 笔记.

证明 (强行裂项和强求通项的具体步骤)

- (1) 若数列 $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}, \{b_n\}_{n=0}^{\infty}, \{d_n\}_{n=0}^{\infty}$ 满足递推条件(2.72)式, 则令 $c_0 = 1$, 待定 $\{c_n\}_{n=0}^{\infty}$, 由递推条件(2.72)式可得

$$c_n a_n = c_n d_n a_{n-1} + c_n b_n, n = 1, 2, \dots. \quad (2.74)$$

我们希望 $c_n d_n = c_{n-1}, n = 2, 3, \dots$, 即 $\frac{c_n}{c_{n-1}} = \frac{1}{d_n}, n = 2, 3, \dots$ 从而 $c_n = c_0 \prod_{k=1}^n \frac{c_k}{c_{k-1}} = \prod_{k=1}^n \frac{1}{d_k}, n = 1, 2, \dots$, 且

该式对 $n=0$ 也成立. 因此, 令 $c_n = \prod_{k=1}^n \frac{1}{d_k}, n=0, 1, \dots$, 则由(2.74)式可知

$$c_n a_n = c_n d_n a_{n-1} + c_n b_n \Rightarrow c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1} = c_n b_n, n=1, 2, \dots$$

于是

$$a_n = \frac{1}{c_n} (c_n a_n - c_0 a_0 + c_0 a_0) = \frac{1}{c_n} \left[\sum_{k=1}^n (c_k a_k - c_{k-1} a_{k-1}) + c_0 a_0 \right] = \frac{1}{c_n} \sum_{k=1}^n c_k b_k + a_0, n=0, 1, \dots$$

这样就完成了对 a_n 的强行裂项和强求通项, 并将 a_n 写成了关于 b_n, d_n 的形式.

(2) 若数列 $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}, \{d_n\}_{n=0}^{\infty}$ 满足递推条件(2.73)式, 则令 $c_0 = 1$, 待定 $\{c_n\}_{n=0}^{\infty}$, 由递推条件(2.73)式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - d_n a_{n-1}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{c_n a_n - c_n d_n a_{n-1}}{c_n} = A. \quad (2.75)$$

我们希望 $c_n d_n = c_{n-1}, n=2, 3, \dots$, 即 $\frac{c_n}{c_{n-1}} = \frac{1}{d_n}, n=2, 3, \dots$ 从而 $c_n = c_0 \prod_{k=1}^n \frac{c_k}{c_{k-1}} = \prod_{k=1}^n \frac{1}{d_k}, n=1, 2, \dots$, 且

该式对 $n=0$ 也成立. 因此, 令 $c_n = \prod_{k=1}^n \frac{1}{d_k}, n=0, 1, \dots$, 则由(2.75)式可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - d_n a_{n-1}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{c_n a_n - c_n d_n a_{n-1}}{c_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}}{c_n} = A. \quad (2.76)$$

于是令 $b_0 = 1$, 待定 $\{b_n\}_{n=0}^{\infty}$, 希望 b_n 满足 $c_n b_n = c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}, n=1, 2, \dots$, 即 $b_n = \frac{c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}}{c_n} = a_n - \frac{c_{n-1} a_{n-1}}{c_n}, n=1, 2, \dots$ 因此, 令 $b_0 = 1, b_n = a_n - \frac{c_{n-1} a_{n-1}}{c_n}, n=1, 2, \dots$, 则 b_n 满足

$$c_n b_n = c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}, n=1, 2, \dots \quad (2.77)$$

并且由(2.76)式可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}}{c_n} = A.$$

从而由(2.77)式可得

$$a_n = \frac{1}{c_n} (c_n a_n - c_0 a_0 + c_0 a_0) = \frac{1}{c_n} \left[\sum_{k=1}^n (c_k a_k - c_{k-1} a_{k-1}) + c_0 a_0 \right] = \frac{1}{c_n} \sum_{k=1}^n c_k b_k + a_0, n=0, 1, \dots$$

这样就完成了对 a_n 的强行裂项和强求通项.

□

例题 2.98 设 $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ 满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - \lambda a_{n-1}) = a, |\lambda| < 1$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$.

笔记 **解法二** 构造数列 c_n, b_n 的思路: 待定数列 c_n 且 $c_0 = 1$, 由条件可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{c_n a_n - \lambda c_n a_{n-1}}{c_n} = a$. 希望 $c_{n-1} = \lambda c_n$,

即 $\frac{c_n}{c_{n-1}} = \frac{1}{\lambda}$, 等价于 $c_n = c_0 \prod_{k=1}^n \frac{c_k}{c_{k-1}} = \frac{1}{\lambda^n}$. 该式对 $n=0$ 也成立. 于是令 $c_n = \frac{1}{\lambda^n}$, 则由条件可知

$$a = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{c_n a_n - \lambda c_n a_{n-1}}{c_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}}{c_n}$$

从而待定 b_n , 希望 b_n 满足 $c_n b_n = c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}$, 即 $\frac{b_n}{\lambda^n} = \frac{a_n}{\lambda^n} - \frac{a_{n-1}}{\lambda^{n-1}} = \frac{a_n - \lambda a_{n-1}}{\lambda^n}$. 于是令 $b_n = a_n - \lambda a_{n-1}$, 则由条件可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - \lambda a_{n-1}) = a, c_n b_n = c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}$. 因此

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{c_n} (c_n a_n - c_0 a_0 + c_0 a_0) = \frac{1}{c_n} \left[\sum_{k=1}^n (c_k a_k - c_{k-1} a_{k-1}) + c_0 a_0 \right] \\ &= \frac{1}{c_n} \left(\sum_{k=1}^n c_k b_k + c_0 a_0 \right) = \lambda^n \sum_{k=1}^n \frac{b_k}{\lambda^k} + a_0 \lambda^n. \end{aligned}$$

这样就完成了对 a_n 的强行裂项和强求通项. 后续计算极限的方法与解法一相同.

解 **解法一** (通过观察直接构造出裂项数列 b_n): 当 $\lambda = 0$ 问题时显然的, 当 $\lambda \neq 0$, 记 $b_n = a_n - \lambda a_{n-1}, n=1, 2, \dots$,

我们有

$$\frac{b_n}{\lambda^n} = \frac{a_n - \lambda a_{n-1}}{\lambda^n} = \frac{a_n}{\lambda^n} - \frac{a_{n-1}}{\lambda^{n-1}}, n = 1, 2, \dots.$$

上式对 $n = 1, 2, \dots$ 求和得

$$a_n = \lambda^n \sum_{k=1}^n \frac{b_k}{\lambda^k} + a_0 \lambda^n, n = 1, 2, \dots \quad (2.78)$$

由于 $|\lambda| < 1$, 我们知道 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_0 \lambda^n = 0$. 于是由 Stolz 定理, 可知当 $\lambda > 0$ 时, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{b_k}{\lambda^k}}{\frac{1}{\lambda^n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{b_{n+1}}{\lambda^{n+1}}}{\frac{1}{\lambda^{n+1}} - \frac{1}{\lambda^n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_{n+1}}{1 - \lambda} = \frac{a}{1 - \lambda}.$$

当 $\lambda < 0$ 时 (此时分母 $\frac{1}{\lambda^n}$ 不再严格单调递增趋于 $+\infty$, 不满足 Stolz 定理条件. 但是不难发现其奇偶子列严格单调递增趋于 $+\infty$ 满足 Stolz 定理条件, 因此需要分奇偶子列讨论), 对于(2.78)式的偶子列, 由 Stolz 定理, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{2n} \frac{b_k}{\lambda^k}}{\frac{1}{\lambda^{2n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{2n+2} \frac{b_k}{\lambda^k} - \sum_{k=1}^{2n} \frac{b_k}{\lambda^k}}{\frac{1}{\lambda^{2n+2}} - \frac{1}{\lambda^{2n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{b_{2n+2}}{\lambda^{2n+2}} + \frac{b_{2n+1}}{\lambda^{2n+1}}}{\frac{1}{\lambda^{2n+2}} - \frac{1}{\lambda^{2n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_{2n+2} + \lambda b_{2n+1}}{1 - \lambda^2} = \frac{a + \lambda a}{1 - \lambda^2} = \frac{a}{1 - \lambda}.$$

对于(2.78)式的奇子列, 由 Stolz 定理, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{2n-1} \frac{b_k}{\lambda^k}}{(\frac{1}{\lambda})^{2n-1}} = \frac{1}{\lambda} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{2n-1} \frac{b_k}{\lambda^k}}{\frac{1}{\lambda^{2n}}} = \frac{1}{\lambda} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{2n} \frac{b_k}{\lambda^k}}{\frac{1}{\lambda^{2n}}} - \frac{1}{\lambda} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{b_{2n}}{\lambda^{2n}}}{\frac{1}{\lambda^{2n}}} \xrightarrow{\text{因为偶子列的极限}} \frac{a}{\lambda(1 - \lambda)} - \frac{a}{\lambda} = \frac{a}{1 - \lambda}.$$

因此无论如何我们都有 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \frac{a}{1 - \lambda}$.

解法二 (强求通项和强行裂项的标准解法): 令 $c_n = \frac{1}{\lambda^n}, n = 0, 1, \dots, b_n = a_n - \lambda a_{n-1}, n = 1, 2, \dots$, 则由条件可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - \lambda a_{n-1}) = a, c_n b_n = c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}$. 从而对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{c_n} (c_n a_n - c_0 a_0 + c_0 a_0) = \frac{1}{c_n} \left[\sum_{k=1}^n (c_k a_k - c_{k-1} a_{k-1}) + c_0 a_0 \right] \\ &= \frac{1}{c_n} \left(\sum_{k=1}^n c_k b_k + c_0 a_0 \right) = \lambda^n \sum_{k=1}^n \frac{b_k}{\lambda^k} + a_0 \lambda^n. \end{aligned} \quad (2.79)$$

由于 $|\lambda| < 1$, 我们知道 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_0 \lambda^n = 0$. 于是由 Stolz 定理, 可知当 $\lambda > 0$ 时, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{b_k}{\lambda^k}}{\frac{1}{\lambda^n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{b_{n+1}}{\lambda^{n+1}}}{\frac{1}{\lambda^{n+1}} - \frac{1}{\lambda^n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_{n+1}}{1 - \lambda} = \frac{a}{1 - \lambda}.$$

当 $\lambda < 0$ 时 (分母 $\frac{1}{\lambda^n}$ 不再严格单调递增趋于 $+\infty$, 不满足 Stolz 定理条件. 而我们发现其奇偶子列恰好严格单调递增趋于 $+\infty$ 满足 Stolz 定理条件, 因此需要分奇偶子列讨论), 对于(2.79)式的偶子列, 由 Stolz 定理, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{2n} \frac{b_k}{\lambda^k}}{\frac{1}{\lambda^{2n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{2n+2} \frac{b_k}{\lambda^k} - \sum_{k=1}^{2n} \frac{b_k}{\lambda^k}}{\frac{1}{\lambda^{2n+2}} - \frac{1}{\lambda^{2n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{b_{2n+2}}{\lambda^{2n+2}} + \frac{b_{2n+1}}{\lambda^{2n+1}}}{\frac{1}{\lambda^{2n+2}} - \frac{1}{\lambda^{2n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_{2n+2} + \lambda b_{2n+1}}{1 - \lambda^2} = \frac{a + \lambda a}{1 - \lambda^2} = \frac{a}{1 - \lambda}.$$

对于(2.79)式的奇子列, 由 Stolz 定理, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{2n-1} \frac{b_k}{\lambda^k}}{(\frac{1}{\lambda})^{2n-1}} = \frac{1}{\lambda} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{2n-1} \frac{b_k}{\lambda^k}}{\frac{1}{\lambda^{2n}}} = \frac{1}{\lambda} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{2n} \frac{b_k}{\lambda^k}}{\frac{1}{\lambda^{2n}}} - \frac{1}{\lambda} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{b_{2n}}{\lambda^{2n}}}{\frac{1}{\lambda^{2n}}} \xrightarrow{\text{因为偶子列的极限}} \frac{a}{\lambda(1 - \lambda)} - \frac{a}{\lambda} = \frac{a}{1 - \lambda}.$$

因此无论如何我们都有 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \frac{a}{1 - \lambda}$.

□

例题 2.99 设 $a_1 = 2, a_n = \frac{1 + \frac{1}{n}}{2} a_{n-1} + \frac{1}{n}, n \geq 2$, 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} n a_n$ 存在.

笔记 构造数列 c_n, b_n 的思路: 待定数列 c_n 且 $c_1 = 1$, 由条件可得 $c_n a_n = \frac{n+1}{2n} c_n a_{n-1} + \frac{c_n}{n}$, 希望 c_n 满足 $\frac{n+1}{2n} c_n = c_{n-1}$, $n = 2, 3, \dots$, 即 $\frac{c_n}{c_{n-1}} = \frac{n+1}{n}$, 等价于 $c_n = \prod_{k=2}^n \frac{2k}{k+1} = \frac{(2n)!!}{(n+1)!}$ 且该式对 $n = 1$ 也成立. 于是令 $c_n = \frac{(2n)!!}{(n+1)!}$, 则由条件可知

$$c_n a_n = \frac{n+1}{2n} c_{n-1} + \frac{c_n}{n} = c_{n-1} a_{n-1} + \frac{c_n}{n}, n = 2, 3, \dots$$

于是待定 b_n , 希望 b_n 满足 $c_n b_n = c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}$, 即 $c_n b_n = \frac{1}{n}$. 从而令 $b_n = \frac{1}{n}$, 则 $c_n b_n = c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}$. 因此对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 都有

$$\begin{aligned} a_m &= \frac{1}{c_m} (c_m a_m - c_1 a_1 + c_1 a_1) = \frac{1}{c_m} \left[\sum_{n=1}^m (c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}) + c_1 a_1 \right] \\ &= \frac{1}{c_m} \left(\sum_{n=1}^m c_n b_n + c_1 a_1 \right) = \frac{(m+1)!}{(2m)!!} \left(\sum_{n=1}^m \frac{(2n)!!}{n(n+1)!} + 2 \right). \end{aligned}$$

这样就完成了对 a_n 的强行裂项和强求通项. 后续再利用 Stolz 定理计算极限即可.

证明 令 $c_n = \frac{(2n)!!}{(n+1)!}$, $b_n = \frac{1}{n}$, $n = 1, 2, \dots$, 则由条件可知 $c_n b_n = c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}$. 从而对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 都有

$$c_m a_m - 2 = c_m a_m - c_1 a_1 = \sum_{n=2}^m (c_n a_n - c_{n-1} a_{n-1}) = \sum_{n=1}^m \frac{c_n}{n} = \sum_{n=1}^m \frac{(2n)!!}{n(n+1)!},$$

从而

$$a_m = \frac{1}{c_m} \left(2 + \sum_{n=1}^m \frac{(2n)!!}{n(n+1)!} \right) = \frac{(m+1)!}{(2m)!!} \left(2 + \sum_{n=1}^m \frac{(2n)!!}{n(n+1)!} \right).$$

再由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} m a_m &= \lim_{m \rightarrow \infty} m \frac{(m+1)!}{(2m)!!} \left(2 + \sum_{n=1}^m \frac{(2n)!!}{n(n+1)!} \right) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{2 + \sum_{n=1}^m \frac{(2n)!!}{n(n+1)!}}{\frac{(2m)!!}{m(m+1)!}} \\ &\stackrel{\text{Stolz 定理}}{=} \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\frac{(2m+2)!!}{(m+1)(m+2)!}}{\frac{(2m+2)!!}{(m+1)(m+2)!} - \frac{(2m)!!}{m(m+1)!}} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\frac{2m+2}{m+1}}{\frac{2m+2}{m+1} - \frac{m+2}{m}} = \frac{2}{2-1} = 2. \end{aligned}$$

□

例题 2.100 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$ 存在, 令

$$a_{n+1} = b_n - \frac{n a_n}{2n+1},$$

证明 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ 存在.

笔记 构造数列 c_n 的思路: 令 $c_1 = 1$, 待定 $\{c_n\}_{n=1}^{+\infty}$, 由条件可知 $c_{n+1} a_{n+1} = c_{n+1} b_n - \frac{n}{2n+1} c_{n+1} a_n$. 希望 $-\frac{n}{2n+1} c_{n+1} = c_n$, 则 $\frac{c_{n+1}}{c_n} = -\frac{2n+1}{n}$, 从而

$$c_n = \prod_{k=1}^{n-1} \frac{c_{k+1}}{c_k} = \prod_{k=1}^{n-1} \left(-\frac{2k+1}{k} \right) = (-1)^{n-1} \frac{(2n-1)!!}{(n-1)!}$$

该式对 $n = 1$ 也成立. 因此令 $c_n = (-1)^{n-1} \frac{(2n-1)!!}{(n-1)!}$, 则由条件可知

$$c_{n+1} a_{n+1} = c_{n+1} b_n + c_n a_n \Rightarrow c_{n+1} a_{n+1} - c_n a_n = c_{n+1} b_n$$

从而

$$a_n = \frac{1}{c_n} \left[\sum_{k=2}^n (c_k a_k - c_{k-1} a_{k-1}) + c_1 a_1 \right] = \frac{1}{c_n} \left[\sum_{k=2}^n c_k b_{k-1} + c_1 a_1 \right]$$

这样就完成了对 a_n 的强行裂项和强求通项.

注 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ 的思路分析: 如果此时我们将(2.80)中的 $\frac{(2n+1)!!}{n!}$ 看作分母, 将 $(-1)^n$ 放到分子上, 那么由 Wallis

公式可知分母严格单调递增趋于 $+\infty$, 此时 a_n 满足 Stolz 定理条件. 但是使用一次 Stolz 定理后我们并不能直接得到结果, 并且此时 $(-1)^n$ 仍未消去. 因此我们不采用这种处理方式.

如果此时我们将(2.80)中的 $\frac{(-1)^n (2n+1)!!}{n!}$ 看作分母, 则由于 $(-1)^n$ 的振荡性, 导致这个分母不再严格单调递增趋于 $+\infty$, 不满足 Stolz 定理条件. 但是不难发现其奇偶子列严格单调递增趋于 $+\infty$ 满足 Stolz 定理条件, 因此我们可以分奇偶子列进行讨论.

证明 令 $c_n = (-1)^{n-1} \frac{(2n-1)!!}{(n-1)!}$, $n = 1, 2, \dots$, 则由条件可知

$$c_{n+1}a_{n+1} = c_{n+1}b_n - \frac{n}{2n+1}c_{n+1}a_n = c_{n+1}b_n + c_n a_n, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

从而 $c_{n+1}a_{n+1} - c_n a_n = c_{n+1}b_n$, $\forall n \in \mathbb{N}$. 于是

$$\begin{aligned} a_{n+1} &= \frac{1}{c_{n+1}} \left[\sum_{k=1}^n (c_{k+1}a_{k+1} - c_k a_k) + c_1 a_1 \right] = \frac{1}{c_{n+1}} \left[\sum_{k=1}^n c_{k+1}b_k + c_1 a_1 \right] \\ &= \frac{1}{c_{n+1}} \left[\sum_{k=1}^n c_{k+1}b_k + a_1 \right] = \frac{(-1)^n n!}{(2n+1)!!} \left[\sum_{k=1}^n (-1)^k \frac{(2k+1)!!}{k!} b_k + a_1 \right], n \in \mathbb{N}_+. \end{aligned} \quad (2.80)$$

下面计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$.

由 Wallis 公式可知

$$\frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} \sim \sqrt{\pi n}, n \rightarrow \infty.$$

从而我们有

$$\frac{n!}{(2n+1)!!} = \frac{n!}{(2n+1)(2n-1)!!} = \frac{(2n)!!}{(2n+1)2^n(2n-1)!!} \sim \frac{\sqrt{\pi n}}{n2^{n+1}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2^{n+1}\sqrt{n}}, n \rightarrow \infty. \quad (2.81)$$

于是由(2.80)(2.81)式以及 Stolz 定理和 $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$ 可知, 一方面, 考虑 $\{a_n\}$ 的奇子列, 我们有

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} a_{2n+1} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(-1)^{2n} (2n)!}{(4n+1)!!} \left[\sum_{k=1}^{2n} (-1)^k \frac{(2k+1)!!}{k!} b_k + a_1 \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{\pi} \left[\sum_{k=1}^n \frac{(4k+1)!!}{(2k)!} b_{2k} - \sum_{k=1}^n \frac{(4k-1)!!}{(2k-1)!} b_{2k-1} + a_1 \right]}{2^{2n+1}\sqrt{2n}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{\pi} \left[\sum_{k=1}^n \frac{(4k+1)!!}{(2k)!} b_{2k} - \sum_{k=1}^n \frac{(4k-1)!!}{(2k-1)!} b_{2k-1} \right]}{2^{2n+1}\sqrt{2n}} \xrightarrow{\text{Stolz 定理}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{\pi} \left[\frac{(4n+1)!!}{(2n)!} b_{2n} - \frac{(4n-1)!!}{(2n-1)!} b_{2n-1} \right]}{2^{2n+1}\sqrt{2n} - 2^{2n-1}\sqrt{2n-2}} \\ &= \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{(4n-1)!!}{(2n-1)!} \left(\frac{4n+1}{2n} b_{2n} - b_{2n-1} \right)}{2^{2n+1}\sqrt{n} - 2^{2n-1}\sqrt{n-1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^{2n}\sqrt{2n-1} \left(\frac{4n+1}{2n} b_{2n} - b_{2n-1} \right)}{2^{2n+1}\sqrt{n} - 2^{2n-1}\sqrt{n-1}} \\ &= \frac{2}{\sqrt{2}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2n-1} \left(\frac{4n+1}{2n} b_{2n} - b_{2n-1} \right)}{4\sqrt{n} - \sqrt{n-1}} = \frac{2}{\sqrt{2}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2n-1}}{4\sqrt{n} - \sqrt{n-1}} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{4n+1}{2n} b_{2n} - b_{2n-1} \right) \\ &= \frac{2}{\sqrt{2}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2-\frac{1}{n}}}{4 - \sqrt{1-\frac{1}{n}}} \cdot (2b - b) = \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot b = \frac{2}{3}b. \end{aligned} \quad (2.82)$$

另一方面, 考虑 $\{a_n\}$ 的偶子列, 我们有

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} a_{2n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(-1)^{2n-1} (2n-1)!}{(4n-1)!!} \left[\sum_{k=1}^{2n-1} (-1)^k \frac{(2k+1)!!}{k!} b_k + a_1 \right] = -\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{\pi} \left[\sum_{k=1}^{n-1} \frac{(4k+1)!!}{(2k)!} b_{2k} - \sum_{k=1}^n \frac{(4k-1)!!}{(2k-1)!} b_{2k-1} + a_1 \right]}{2^{2n}\sqrt{2n-1}} \\ &= -\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{\pi} \left[\sum_{k=1}^{n-1} \frac{(4k+1)!!}{(2k)!} b_{2k} - \sum_{k=1}^n \frac{(4k-1)!!}{(2k-1)!} b_{2k-1} \right]}{2^{2n}\sqrt{2n-1}} \xrightarrow{\text{Stolz 定理}} -\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{\pi} \left[\frac{(4n-3)!!}{(2n-2)!} b_{2n-2} - \frac{(4n-1)!!}{(2n-1)!} b_{2n-1} \right]}{2^{2n}\sqrt{2n-1} - 2^{2n-2}\sqrt{2n-3}} \\ &= -\sqrt{\pi} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{(4n-3)!!}{(2n-2)!} \left(b_{2n-2} - \frac{4n-1}{2n-1} b_{2n-1} \right)}{2^{2n}\sqrt{2n-1} - 2^{2n-2}\sqrt{2n-3}} = -\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^{2n-1}\sqrt{2n-2} \left(b_{2n-2} - \frac{4n-1}{2n-1} b_{2n-1} \right)}{2^{2n}\sqrt{2n-1} - 2^{2n-2}\sqrt{2n-3}} \\ &= -2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2n-2} \left(b_{2n-2} - \frac{4n-1}{2n-1} b_{2n-1} \right)}{4\sqrt{2n-1} - \sqrt{2n-3}} = -2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2n-2}}{4\sqrt{2n-1} - \sqrt{2n-3}} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \left(b_{2n-2} - \frac{4n-1}{2n-1} b_{2n-1} \right) \end{aligned}$$

$$= -2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2 - \frac{2}{n}}}{4\sqrt{2 - \frac{1}{n}} - \sqrt{2 - \frac{3}{n}}} = -2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{3\sqrt{2}} \cdot (-b) = \frac{2}{3}b. \quad (2.83)$$

故由(2.82)(2.83)式, 再结合子列极限命题(b)可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a_{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} a_{2n+1} = \frac{2}{3}b.$$

□

例题 2.101 设 $a_n, b_n > 0, a_1 = b_1 = 1, b_n = a_n b_{n-1} - 2, n \geq 2$ 且 b_n 有界, 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{a_1 a_2 \cdots a_k}$.

笔记 构造数列 c_n 的思路: 观察已知的数列递推条件: $b_n = a_n b_{n-1} - 2$, 可知我们只能对 b_n 进行强行裂项和强求通项. 于是令 $c_1 = 1$, 待定 $\{c_n\}_{n=1}^{+\infty}$, 则由条件可知 $c_n b_n = a_n c_n b_{n-1} - 2c_n, n \geq 2$. 希望 $a_n c_n = c_{n-1}$, 则 $\frac{c_n}{c_{n-1}} = \frac{1}{a_n}$,

从而 $c_n = \prod_{k=2}^n \frac{1}{a_k} = \prod_{k=1}^n \frac{1}{a_k}$. 该式对 $n = 1$ 也成立. 因此, 令 $c_n = \prod_{k=1}^n \frac{1}{a_k}$, 则由条件可知

$$c_n b_n = a_n c_n b_{n-1} - 2c_n = c_{n-1} b_{n-1} - 2c_n, n \geq 2.$$

于是

$$c_n b_n - c_{n-1} b_{n-1} = -2c_n, n \geq 2.$$

故

$$b_{n+1} = \frac{1}{c_{n+1}} \left[\sum_{k=1}^n (c_{k+1} b_{k+1} - c_k b_k) + c_1 b_1 \right] = \frac{1}{c_n} \left(1 - 2 \sum_{k=1}^n c_k \right).$$

这样就完成了对 b_n 的强行裂项和强求通项, 而我们发现 $\sum_{k=1}^n c_k = \sum_{k=1}^n \frac{1}{a_1 a_2 \cdots a_k}$ 恰好就是题目要求的数列极限.

证明 令 $c_n = \prod_{k=1}^n \frac{1}{a_k}$, 则由条件可知 $c_n > 0$, 且

$$c_n b_n = a_n c_n b_{n-1} - 2c_n = c_{n-1} b_{n-1} - 2c_n, n \geq 2.$$

于是

$$c_n b_n - c_{n-1} b_{n-1} = -2c_n, n \geq 2.$$

故

$$b_{n+1} = \frac{1}{c_{n+1}} \left[\sum_{k=1}^n (c_{k+1} b_{k+1} - c_k b_k) + c_1 b_1 \right] = \frac{1}{c_n} \left(1 - 2 \sum_{k=1}^n c_{k+1} \right). \forall n \in \mathbb{N}.$$

由此可得

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{a_1 a_2 \cdots a_k} = \sum_{k=1}^n c_k = 1 + \sum_{k=1}^n c_{k+1} = 1 + \frac{1 - b_{n+1} c_n}{2} = \frac{3}{2} - \frac{c_n b_{n+1}}{2}, \forall n \in \mathbb{N}. \quad (2.84)$$

由于 $a_n, b_n, c_n > 0$, 再结合(2.84)式, 可知 $\sum_{k=1}^n \frac{1}{a_1 a_2 \cdots a_k}$ 单调递增且 $\sum_{k=1}^n \frac{1}{a_1 a_2 \cdots a_k} = \frac{3}{2} - \frac{c_n b_{n+1}}{2} \leq \frac{3}{2}$, 因此

$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{a_1 a_2 \cdots a_k}$ 一定存在. 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_1 a_2 \cdots a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} c_n = 0$. 从而再结合(2.84)式和 b_n 有界可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{a_1 a_2 \cdots a_k} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{3}{2} - \frac{c_n b_{n+1}}{2} \right) = \frac{3}{2}.$$

□

2.6.8 强行归纳法

强行归纳法本质就是“先猜后证”. 先待定一个数(上界等), 然后将这个待定的数利用已知条件和数学归纳法进行验证, 再取特定的值使其满足要求.

例题 2.102 设正数列 $\{a_n\}$ 满足 $a_{n+2} \leq \frac{a_{n+1} + a_n}{(n+2)^2}$ ($n \in \mathbb{N}$), 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$.

证明 取 $M > 0$, 使得 $a_0 \leq M/1!, a_1 < M/2!$, 则可得

$$a_2 \leq \frac{M}{3^2} \left(1 + \frac{1}{2}\right) = \frac{M}{3^2} \cdot \frac{3}{2} = \frac{M}{3!}.$$

现在假定 $a_k \leq M/k!$, $a_{k+1} \leq M/(k+1)!$, 那么对 $k+2$ 有

$$a_{k+2} \leq \frac{a_{k+1} + a_k}{(k+2)^2} \leq \frac{M}{(k+2)^2} \left(\frac{1}{(k+1)!} + \frac{1}{k!}\right) = \frac{M}{(k+2)!}.$$

故由数学归纳法可得

$$a_n \leq \frac{M}{n!}, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$.

□

2.6.9 递推数列综合问题

引理 2.1 (稠密聚点引理)

设 $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (x_{n+1} - x_n) \geq 0$ 或者 $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (x_{n+1} - x_n) \leq 0$, 则 x_n 的全体聚点要么是空集, 要么是单点集, 要么是区间.(这里允许为 $\pm\infty$)

♡

笔记 子列 $\{x_{n_{k_1}}\}, \{x_{n_{k_2}}\}$ 存在的原因: 记

$$A \triangleq \{n \in \mathbb{N} \mid x_n \leq c - \delta\}, \quad B \triangleq \{n \in \mathbb{N} \mid x_n \geq c + \delta\}.$$

由(2.85)式知 A, B 均为 \mathbb{N} 的非空无限子集, 并且存在子列 $\{k_1\} \subseteq A, \{k_2\} \subseteq B$. 因为 A, B 均为 \mathbb{N} 的非空无限子集, 所以对 $\forall k_1 \in \{k_1\}, k_2 \in \{k_2\}$, 都存在

$$l_{k_1} > k_1 \text{ 且 } l_{k_1} \in B, \quad l_{k_2} > k_2 \text{ 且 } l_{k_2} \in A.$$

于是可取

$$p_{k_1} \triangleq \min\{p \in B \mid p > k_1\}, \quad p_{k_2} \triangleq \min\{p \in A \mid p > k_2\}.$$

令 $n_{k_1} = p_{k_1} - 1, n_{k_2} = p_{k_2} - 1$, 则 $n_{k_1} \notin B$, 否则要么 $n_{k_1} = k_1 \notin B$, 要么 $n_{k_1} > k_1$ 且 $n_{k_1} \in B$, 这与 p_{k_1} 最小值定义矛盾! 同理 $n_{k_2} \notin A$. 从而

$$x_{n_{k_1}} < c + \delta, x_{n_{k_1}+1} = x_{p_{k_1}} \geq c + \delta, \quad x_{n_{k_2}} > c - \delta, x_{n_{k_2}+1} = x_{p_{k_2}} \leq c - \delta.$$

又 $x_n \notin (c - \delta, c + \delta), \forall n \in \mathbb{N}$, 故对 $\forall k_1 \in \{k_1\}, k_2 \in \{k_2\}$, 都有

$$x_{n_{k_1}} \leq c - \delta, x_{n_{k_1}+1} \geq c + \delta, \quad x_{n_{k_2}} \geq c + \delta, x_{n_{k_2}+1} \leq c - \delta.$$

证明 若 x_n 的全体聚点既不是空集, 也不是单点集, 记

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a, \quad \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = b, \quad (2.85)$$

这里 a, b 允许为 $\pm\infty$. 若 $c \in (a, b)$ 不是 x_n 的聚点, 那么存在 $\delta \in (0, \min \frac{c-a}{2}, \frac{b-c}{2})$, 使得存在 $N \in \mathbb{N}$, 对任何 $n > N$ 都有 $x_n \notin (c - \delta, c + \delta)$.

又由(2.85)知对任何 $M > N$, 存在 $\{n_{k_1}\}, \{n_{k_2}\} \subset (M, +\infty) \cap \mathbb{N}$ 使得

$$x_{n_{k_1}} \leq c - \delta, x_{n_{k_1}+1} \geq c + \delta, \quad x_{n_{k_2}} \geq c + \delta, x_{n_{k_2}+1} \leq c - \delta,$$

从而

$$x_{n_{k_1}+1} - x_{n_{k_1}} \geq 2\delta, \quad x_{n_{k_2}+1} - x_{n_{k_2}} \leq -2\delta,$$

即

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (x_{n+1} - x_n) \geq 2\delta, \quad \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (x_{n+1} - x_n) \leq -2\delta.$$

这就证明了 $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (x_{n+1} - x_n) < 0$ 且 $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (x_{n+1} - x_n) > 0$, 矛盾! 故 (a, b) 都是极限点. 这就完成了证明. \square

推论 2.1 (有界数列差分极限为 0 则其闭包一定是闭区间)

有界数列 x_n 如果满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x_{n+1} - x_n) = 0$, 则 x_n 的全体聚点构成一个闭区间 (且这个闭区间的端点就是数列的上下极限). ♡

例题 2.103 设 $f : [a, b] \rightarrow [a, b]$ 连续, $x_0 \in [a, b]$, $x_{n+1} = f(x_n)$ ($n \geq 0$).

1. 证明: 数列 $\{x_n\}$ 收敛的充要条件是 $\lim_{n \rightarrow +\infty} (x_{n+1} - x_n) = 0$.
2. 若 $\lim_{n \rightarrow +\infty} (x_{n+2025} - x_n) = 0$, 证明 $\{x_n | n \geq 1\}$ 的聚点不超过 2025 个.

证明

1. **必要性:** 如果 x_n 收敛, 则显然 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x_{n+1} - x_n) = 0$.

充分性: 设 $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = L$, $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = l$. 假设 $\{x_n\}$ 不收敛, 则 $a \leq l < L \leq b$. 由**推论 2.1**知, $\{x_n\}$ 的全体聚点构成一个闭区间 $[l, L]$. 任取 $c \in [l, L]$, 则存在收敛子列 $\{x_{n_k}\}$, 使得

$$\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = c \implies \lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k+1} = \lim_{k \rightarrow \infty} (x_{n_k+1} - x_{n_k}) + \lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = c.$$

于是由 $x_{n+1} = f(x_n)$ 可得

$$c = \lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k+1} = \lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) = f(c).$$

再结合 c 的任意性知

$$f(c) = c, \quad \forall c \in [l, L].$$

由于 $[l, L]$ 都是 $\{x_n\}$ 的聚点, 故存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得 $x_N \in [l, L]$. 由上式可得 $x_{N+1} = f(x_N) = x_N$, 归纳可得 $x_n = x_N, \forall n \in \mathbb{N}$. 此时 $\{x_n\}$ 显然收敛, 矛盾!

2. **简略证明:** 令 $g = \underbrace{f \circ \cdots \circ f}_{2025 \text{ 个}}$, 则对 $\forall q \in \{1, \dots, 2025\}$, 有 $x_{2025(p+1)+q} = g(x_{2025p+q})$. 又由条件可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (x_{2025(p+1)+q} - x_{2025p+q}) = 0,$$

故由第 1 问可知数列 $\{x_{2025p+q}\}_{p=1}^{\infty}$ 收敛. 又因为 $\bigcup_{q=1}^{2025} \{2025p+q : p \in \mathbb{N}\}$ 是 \mathbb{N} 的无交并, 所以数列 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ 至多有 2025 个聚点.

严格证明: 先证 $\lim_{p \rightarrow \infty} x_{2025p+q} = x_q, q = 1, 2, \dots, 2025$.

设 $\overline{\lim}_{p \rightarrow \infty} x_{2025p+q} = L_q$, $\underline{\lim}_{p \rightarrow \infty} x_{2025p+q} = l_q$. 假设 $\{x_{2025p+q}\}$ 不收敛, 则 $a \leq l_q < L_q \leq b$.

由**推论 2.1**知 $\{x_{2025p+q}\}$ 的全体聚点构成闭区间 $[l_q, L_q]$. 任取 $a \in [l_q, L_q]$, 则存在子列 $\{x_{2025p_s+q}\}$, 使得

$$\lim_{s \rightarrow \infty} x_{2025p_s+q} = a \implies \lim_{s \rightarrow \infty} x_{2025(p_s+1)+q} = \underbrace{f \circ \cdots \circ f}_{2025 \text{ 个}} \left(\lim_{s \rightarrow \infty} x_{2025p_s+q} \right) = \underbrace{f \circ \cdots \circ f}_{2025 \text{ 个}} (a).$$

于是由 a 的任意性知

$$\underbrace{f \circ \cdots \circ f}_{2025 \text{ 个}} (a) = a, \quad \forall a \in [l_q, L_q].$$

因为 $[l_q, L_q]$ 都是 $\{x_{2025p+q}\}$ 的聚点, 所以存在 $P \in \mathbb{N}$, 使得 $x_{2025P+q} \in [l_q, L_q]$. 从而由上式可得

$$x_{2025(P+1)+q} = \underbrace{f \circ \cdots \circ f}_{2025 \text{ 个}} (x_{2025P+q}) = x_{2025P+q},$$

归纳可得

$$x_{2025p+q} = x_{2025P+q}, \quad \forall p \geq P.$$

此时 $\{x_{2025p+q}\}$ 显然收敛, 矛盾! 故

$$\lim_{p \rightarrow \infty} x_{2025p+q} = x_q, \quad \forall q \in \{1, 2, \dots, 2025\}. \quad (2.86)$$

因此 x_1, \dots, x_{2025} 都是 $\{x_n\}$ 的聚点. 假设 $\{x_n\}$ 有 2026 个不同的聚点, 则必存在子列 $\{x_{n_k}\}$, 使得

$$\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x_0 \neq x_1, \dots, x_{2025}.$$

因此存在 $K > \frac{\max_{q=1, \dots, 2025} \{N_q\} + 1}{2025}$, 使得

$$|x_{n_k} - x_0| < \varepsilon, \quad \forall k > K. \quad (2.87)$$

取 $\varepsilon = \min_{q=1, \dots, 2025} \left\{ \frac{|x_0 - x_q|}{2} \right\}$, 由(2.86)式知对 $\forall q \in \{1, 2, \dots, 2025\}$, 都存在 $N_q \in \mathbb{N}$, 使得

$$|x_{2025p+q} - x_q| < \varepsilon, \quad \forall p > N_q. \quad (2.88)$$

注意到 $\{x_{2025p+q}\}, q = 1, 2, \dots, 2025$ 是 $\{x_n\}$ 的一个分划, 故任取 $k > K$, 存在 $p_k \in \mathbb{N}, q_k \in \{1, 2, \dots, 2025\}$, 使得

$$n_k = 2025p_k + q_k.$$

从而对 $\forall k > K$, 都有

$$p_k = \frac{n_k - q_k}{2025} > \frac{K - 2025}{2025} = \frac{K}{2025} - 1 > \max_{q=1, \dots, 2025} \{N_q\}.$$

于是由(2.88)式知, 对 $\forall k > K$, 都有

$$|x_{n_k} - x_{q_k}| = |x_{2025p_k+q_k} - x_{q_k}| < \varepsilon.$$

再结合(2.87)式可得, 对 $\forall k > K$, 都有

$$|x_0 - x_{q_k}| \leq |x_{n_k} - x_0| + |x_{n_k} - x_{q_k}| < 2\varepsilon \leq |x_0 - x_{q_k}|$$

显然矛盾! 故结论得证. □

引理 2.2 (Fekete 次可加性引理)

设非负数列 $\{a_n\}$ 满足对任意正整数 n, m 有

$$a_{m+n} \leq a_m + a_n,$$

则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n} = \inf \left\{ \frac{a_n}{n} \right\}.$$



证明 对 $\forall k \in \mathbb{N}_+$, 固定 k , 则由带余除法可知, 存在 $q, r \in \mathbb{N}_+$, 使得 $n = kq + r$. 从而由条件可得

$$\frac{a_n}{n} = \frac{a_{kq+r}}{n} \leq \frac{a_{kq} + a_r}{n} \leq \frac{a_{k(q-1)} + a_k}{kq+r} + \frac{a_r}{n} \leq \dots \leq \frac{qa_k}{kq+r} + \frac{a_r}{n} \leq \frac{a_k}{k} + \frac{a_r}{n}, \forall k \in \mathbb{N}_+.$$

令 $n \rightarrow \infty$ 并取上极限得到

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n} \leq \frac{a_k}{k} < \infty, \forall k \in \mathbb{N}_+. \quad (2.89)$$

再令 $k \rightarrow \infty$ 并取下极限可得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_k}{k} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n}.$$

故 $\left\{\frac{a_n}{n}\right\}$ 收敛. 注意到 $\{a_n\}$ 非负, 则 $\left\{\frac{a_n}{n}\right\}$ 一定有下界 0, 从而一定存在下确界 $\inf\left\{\frac{a_n}{n}\right\}$. 于是我们有

$$\inf\left\{\frac{a_n}{n}\right\} \leq \frac{a_n}{n}, \forall n \in \mathbb{N}_+.$$

令 $n \rightarrow \infty$ 并取上极限, 再结合 $\left\{\frac{a_n}{n}\right\}$ 收敛和(2.89)式可得

$$\inf\left\{\frac{a_n}{n}\right\} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n} \leq \frac{a_k}{k}, \forall k \in \mathbb{N}_+.$$

再对 k 取下确界即得

$$\inf\left\{\frac{a_n}{n}\right\} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n} \leq \inf\left\{\frac{a_k}{k}\right\} = \inf\left\{\frac{a_n}{n}\right\}.$$

故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n} = \inf\left\{\frac{a_n}{n}\right\}$.

□

推论 2.2

设 $f(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上连续非负, 且对任意的 $x, y \geq 0$, 有 $f(x+y) \leq f(x) + f(y)$.

证明: $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x}$ 存在且有限.

♡

注 $[x]$: 表示 x 的整数部分; $\{x\}$: 表示 x 的小数部分.

证明 由条件可知, 对 $\forall n, m \in \mathbb{N}$, 都有 $f(n+m) \leq f(n) + f(m)$. 从而由 Fekete 次可加性引理可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{n} = \inf\left\{\frac{f(n)}{n}\right\}.$$

对 $\forall x > 1$, 都存在 $n = [x]$, 使得 $x = n + \{x\}$. 由条件可知

$$f(x) = f(n + \{x\}) \leq f(n) + f(\{x\}),$$

$$f(n+1) = f([x]+1) = f(x+1-\{x\}) \leq f(x) + f(1-\{x\}) \Rightarrow f(x) \geq f(n+1) - f(1-\{x\}).$$

从而对 $\forall x > 1, n = [x]$, 我们都有

$$\begin{aligned} \frac{f(x)}{x} &\leq \frac{f(n) + f(\{x\})}{x} = \frac{f(n)}{n + \{x\}} + \frac{f(\{x\})}{x} = \frac{f(n)}{n} + \frac{f(\{x\})}{x}, \\ \frac{f(x)}{x} &\geq \frac{f(n+1) - f(1-\{x\})}{x} = \frac{f(n+1)}{n + \{x\}} + \frac{f(1-\{x\})}{x} \geq \frac{f(n+1)}{n+1} + \frac{f(1-\{x\})}{x}. \end{aligned}$$

即

$$\frac{f(n+1)}{n+1} + \frac{f(1-\{x\})}{x} \leq \frac{f(x)}{x} \leq \frac{f(n)}{n} + \frac{f(\{x\})}{x}, \forall x > 1, n = [x]. \quad (2.90)$$

又由 $f \in C[0, +\infty), \{x\} \in [0, 1]$, 因此 $f(\{x\}), f(1-\{x\})$ 都有界. 对(2.90)两边令 $x \rightarrow +\infty$, 则同时有 $n \rightarrow \infty$, 再分别取上、下极限得到

$$\inf\left\{\frac{f(n)}{n}\right\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n+1)}{n+1} \leq \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{n} = \inf\left\{\frac{f(n)}{n}\right\}.$$

故 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} = \inf\left\{\frac{f(n)}{n}\right\}$.

□

例题 2.104 设 $a_n, b_n \geq 0$ 且 $a_{n+1} < a_n + b_n$, 同时 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 收敛, 证明: a_n 也收敛.



笔记 再次回顾命题 2.2 的想法. 这个想法再解决递推数列问题中也很常用.

注 不妨设 $m_k > n_k$ 的原因: 由假设 a_n 不收敛可知, 存在 $\delta > 0$, 对 $\forall N > 0$, 都存在 $m \in \mathbb{N}$, 使得 $|a_m - A| \geq \delta$. 从而

取 $N = n_1 > 0$, 则存在 $m_1 \in \mathbb{N}$, 使得 $|a_{m_1} - A| \geq \delta$.

取 $N = n_2 > 0$, 则存在 $m_2 \in \mathbb{N}$, 使得 $|a_{m_2} - A| \geq \delta$.

.....

取 $N = n_k > 0$, 则存在 $m_k \in \mathbb{N}$, 使得 $|a_{m_k} - A| \geq \delta$.

.....

这样就得到了一个子列 $\{a_{m_k}\}$ 满足对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有 $m_k > n_k$ 且 $|a_{m_k} - A| \geq \delta$.

证明 由 $a_{n+1} < a_n + b_n$ 可得

$$a_n = a_1 + \sum_{i=1}^{n-1} (a_{i+1} - a_i) < a_1 + \sum_{i=1}^{n-1} b_i, \forall n \geq 2. \quad (2.91)$$

又 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 收敛, 故对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 有 $\sum_{i=1}^n b_i$ 有界. 再结合 (2.91) 式可知, a_n 也有界. 由聚点定理可知, 存在一个收敛子列 $\{a_{n_k}\}$, 设 $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = A < \infty$.

(反证) 假设 a_n 不收敛, 则存在 $\delta > 0$ 和一个子列 $\{a_{m_k}\}$, 使得

$$|a_{m_k} - A| \geq \delta, \forall n \in \mathbb{N}.$$

不妨设 $m_k > n_k, \forall n \in \mathbb{N}$. 此时分两种情况讨论.

(i) 如果有无穷多个 k , 使得 $a_{m_k} \geq A + \delta$ 成立. 再结合条件可得, 对这些 k , 都有

$$a_{m_k} - a_{n_k} = \sum_{i=n_k}^{m_k-1} (a_{i+1} - a_i) < \sum_{i=n_k}^{m_k-1} b_i, \quad (2.92)$$

$$a_{m_k} - a_{n_k} = (a_{m_k} - A) + (A - a_{n_k}) \geq \delta + (A - a_{n_k}). \quad (2.93)$$

又因为 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 收敛和 $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = A$, 所以

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=n_k}^{m_k-1} b_i = \lim_{k \rightarrow \infty} (A - a_{n_k}) = 0.$$

于是对 (2.92)(2.93) 式两边同时令 $k \rightarrow \infty$, 得到

$$0 < \delta \leq \lim_{k \rightarrow \infty} (a_{m_k} - a_{n_k}) \leq \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=n_k}^{m_k-1} b_i = 0.$$

上述不等式矛盾.

(ii) 如果有无穷多个 k , 使得 $a_{m_k} \leq A - \delta$ 成立. 取 $\{a_{n_k}\}$ 的一个子列 $\{a_{t_k}\}$, 使得 $t_k > m_k, \forall n \in \mathbb{N}$, 则 $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{t_k} = \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = A$. 再结合条件可得, 对这些 k , 都有

$$a_{t_k} - a_{m_k} = \sum_{i=m_k}^{t_k-1} (a_{i+1} - a_i) < \sum_{i=m_k}^{t_k-1} b_i, \quad (2.94)$$

$$a_{t_k} - a_{m_k} = (a_{t_k} - A) + (A - a_{m_k}) \geq (a_{t_k} - A) + \delta. \quad (2.95)$$

又因为 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 收敛和 $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{t_k} = A$, 所以

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=m_k}^{t_k-1} b_i = \lim_{k \rightarrow \infty} (a_{t_k} - A) = 0.$$

于是对 (2.94)(2.95) 式两边同时令 $k \rightarrow \infty$, 得到

$$0 < \delta \leq \lim_{k \rightarrow \infty} (a_{t_k} - a_{m_k}) \leq \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=m_k}^{t_k-1} b_i = 0.$$

上述不等式矛盾. 结论得证. □

例题 2.105 设 $a_{n+1} = \ln \left(\frac{e^{a_n} - 1}{a_n} \right)$, $a_1 = 1$, 证明: 极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} 2^n a_n$ 存在.

笔记 本题证明的思路分析:

注意到递推函数 $f(x) = \ln\left(\frac{e^x - 1}{x}\right)$ 在 $(0, +\infty)$ 上单调递增, 且 $a_1 = 1 > 0$. 因此直接利用单调分析法归纳证明 $\{a_n\}$ 单调有界且 $a_n \in (0, 1]$. 进而得到 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$. 再利用命题 2.2 将 $2^n a_n$ 转化为级数的形式. 因为递推函数与 \ln 有关, 所以我们考虑作差转换, 即

$$2^{n+1} a_{n+1} = \sum_{k=1}^n (2^{k+1} a_{k+1} - 2^k a_k) = \sum_{k=1}^n 2^{k+1} \left(\ln\left(\frac{e^{a_k} - 1}{a_k}\right) - \frac{1}{2} a_k \right).$$

因此我们只需证明级数 $\sum_{k=1}^n 2^{k+1} \left(\ln\left(\frac{e^{a_k} - 1}{a_k}\right) - \frac{1}{2} a_k \right)$ 收敛即可. 考虑其通项 $2^{n+1} \left(\ln\left(\frac{e^{a_n} - 1}{a_n}\right) - \frac{1}{2} a_n \right)$. 由于 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, 因此利用 Taylor 公式可得

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{e^{a_n} - 1}{a_n}\right) - \frac{1}{2} a_n &= \ln \frac{a_n + \frac{a_n^2}{2} + \frac{a_n^3}{6} + o(a_n^3)}{a_n} - \frac{1}{2} a_n = \ln \left(1 + \frac{a_n}{2} + \frac{a_n^2}{6} + o(a_n^2)\right) - \frac{1}{2} a_n \\ &= \frac{a_n}{2} + \frac{a_n^2}{6} + o(a_n^2) - \left(\frac{a_n}{2} + \frac{a_n^2}{6} + o(a_n^2)\right)^2 + o(a_n^2) - \frac{1}{2} a_n = \frac{a_n^2}{24}, n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

故当 n 充分大时, 我们有

$$2^{n+1} \left(\ln\left(\frac{e^{a_n} - 1}{a_n}\right) - \frac{1}{2} a_n \right) = \frac{1}{24} 2^{n+1} a_n^2.$$

于是我们只须证级数 $\sum_{k=1}^n \frac{1}{24} 2^{n+1} a_n^2$ 收敛即可. 因此我们需要找到一个收敛级数 $\sum_{k=1}^n c_n$, 使得 $2^{n+1} a_n^2$ 被这个收敛级数的通项 c_n 控制, 即当 n 充分大时, 有

$$2^{n+1} a_n^2 \leq c_n.$$

又题目要证 $\lim_{n \rightarrow \infty} 2^n a_n$ 存在, 说明 $\lim_{n \rightarrow \infty} 2^n a_n$ 一定存在, 从而一定有

$$a_n \sim \frac{c}{2^n}, n \rightarrow \infty, \quad (2.96)$$

其中 c 为常数. 虽然无法直接证明 (2.96) 式, 但是 (2.96) 式给我们提供了一种找 c_n 的想法. (2.96) 式表明 a_n 与几何级数的通项近似, 于是一定存在 $\lambda \in (0, 1)$, 使得 $a_n \approx \frac{c}{2^n} \leq c_0 \lambda^n, n \rightarrow \infty$. 其中 c_0 为常数. 从而

$$2^{n+1} a_n^2 \leq c_0^2 2^{n+1} \lambda^{2n} = c_1 (2\lambda^2)^n, n \rightarrow \infty.$$

故我们只需要保证 $\sum_{n=1}^{\infty} (2\lambda^2)^n$ 收敛, 就能由级数的比较判别法推出 $\sum_{k=1}^n \frac{1}{24} 2^{n+1} a_n^2$ 收敛. 因此我们待定 $\lambda \in (0, 1)$, 使得 $\sum_{n=1}^{\infty} (2\lambda^2)^n$ 恰好就是一个几何级数. 于是 $2\lambda^2 < 1 \Rightarrow \lambda < \frac{\sqrt{2}}{2}$. 故我们只要找到一个恰当的 $\lambda \in \left(0, \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$, 使得

$$a_n \leq c_0 \lambda^n, n \rightarrow \infty. \quad (2.97)$$

其中 c_0 为常数, 即可. 我们需要与已知的递推条件联系起来, 因此考虑

$$a_{n+1} \leq c_0 \lambda^{n+1}, n \rightarrow \infty. \quad (2.98)$$

又 $a_n \in (0, 1]$, 显然将(2.97)与(2.98)式作商得到

$$a_n \leq c_0 \lambda^n, n \rightarrow \infty \Leftrightarrow \frac{a_{n+1}}{a_n} \leq \lambda, n \rightarrow \infty \Leftrightarrow \frac{f(a_n)}{a_n} \leq \lambda, n \rightarrow \infty$$

又 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, 故上式等价于

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f(x)}{x} \leq \lambda \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln\left(\frac{e^x - 1}{x}\right)}{x} \leq \lambda$$

注意到 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln\left(\frac{e^x - 1}{x}\right)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\frac{x}{2} + o(x)}{x} = \frac{1}{2}$, 所以任取 $\lambda \in \left(\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$ 即可. 最后根据上述思路严谨地书写证明即可.

(注: 也可以利用 $f(x)$ 的凸性去找 $\lambda \in \left(\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$, 见下述证明过程.)

证明 令 $f(x) = \ln\left(\frac{e^x - 1}{x}\right)$, 注意到对 $\forall x > 0$, 有

$$\begin{aligned} f(x) < x &\Leftrightarrow \ln\left(\frac{e^x - 1}{x}\right) < x \Leftrightarrow \frac{e^x - 1}{x} < e^x \Leftrightarrow \ln x > 1 - \frac{1}{x} \\ &\Leftrightarrow \ln \frac{1}{t} > 1 - t, \text{ 其中 } t = \frac{1}{x} > 0 \Leftrightarrow \ln t < t - 1, \text{ 其中 } t = \frac{1}{x} > 0. \end{aligned}$$

上式最后一个不等式显然成立. 因此

$$f(x) = \ln\left(\frac{e^x - 1}{x}\right) < x, \forall x > 0. \quad (2.99)$$

由 $e^x - 1 > x, \forall x \in \mathbb{R}$ 可知

$$f(x) = \ln\left(\frac{e^x - 1}{x}\right) > \ln 1 = 0, \forall x > 0. \quad (2.100)$$

从而由 (2.99)(2.100) 式及 $a_1 = 1$, 归纳可得 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$a_{n+1} = f(a_n) < a_n, \quad a_{n+1} = f(a_n) > 0.$$

故数列 $\{a_n\}$ 单调递减且有下界 0. 于是 $a_n \in (0, 1]$, 并且由单调有界原理可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = A \in [0, 1]$. 对 $a_{n+1} = \ln\left(\frac{e^{a_n} - 1}{a_n}\right)$ 两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 得到

$$A = \ln\left(\frac{e^A - 1}{A}\right) \Leftrightarrow Ae^A = e^A - 1 \Leftrightarrow (1 - A)e^A = 1.$$

显然上述方程只有唯一解: $A = 0$. 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$. 下面证明 $\lim_{n \rightarrow \infty} 2^n a_n$ 存在. 由 $a_{n+1} = \ln\left(\frac{e^{a_n} - 1}{a_n}\right)$ 可得, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$2^{n+1}a_{n+1} - 2^n a_n = 2^{n+1} \left[\ln\left(\frac{e^{a_n} - 1}{a_n}\right) - \frac{1}{2}a_n \right].$$

从而

$$2^{n+1}a_{n+1} = 2a_1 + \sum_{k=1}^n 2^{k+1} \left(\ln\left(\frac{e^{a_k} - 1}{a_k}\right) - \frac{1}{2}a_k \right) = 2 + \sum_{k=1}^n 2^{k+1} \left(\ln\left(\frac{e^{a_k} - 1}{a_k}\right) - \frac{1}{2}a_k \right), \forall n \in \mathbb{N}.$$

故要证 $\lim_{n \rightarrow \infty} 2^n a_n$ 存在, 即证 $\sum_{k=1}^n 2^{k+1} \left(\ln\left(\frac{e^{a_k} - 1}{a_k}\right) - \frac{1}{2}a_k \right)$ 收敛. 注意到

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln \frac{e^x - 1}{x} - \frac{1}{2}x}{x^2} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln \frac{x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + o(x^3)}{x} - \frac{1}{2}x}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln \left(1 + \frac{x}{2} + \frac{x^2}{6} + o(x^2)\right) - \frac{1}{2}x}{x^2} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{x}{2} + \frac{x^2}{6} + o(x^2) - \left(\frac{x}{2} + \frac{x^2}{6} + o(x^2)\right)^2 + o(x^2) - \frac{1}{2}x}{x^2} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{x^2}{24} + o(x^2)}{x^2} = \frac{1}{24} < 1, \end{aligned}$$

再结合 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ 可得, $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln\left(\frac{e^{a_n} - 1}{a_n}\right) - \frac{1}{2}a_n}{a_n^2} = \frac{1}{24} < 1$. 故存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得

$$\ln\left(\frac{e^{a_n} - 1}{a_n}\right) - \frac{1}{2}a_n < a_n^2, \forall n > N. \quad (2.101)$$

由 $f(x) = \ln\left(\frac{e^x - 1}{x}\right)$ 可知, $f'(x) = \frac{e^x}{e^x - 1} - \frac{1}{x}$, $f''(x) = \frac{1}{x^2} - \frac{e^x}{(e^x - 1)^2}$. 注意到对 $\forall x \in (0, 1]$, 都有

$$\begin{aligned} f''(x) > 0 &\Leftrightarrow \frac{1}{x^2} > \frac{e^x}{(e^x - 1)^2} \\ &\Leftrightarrow \frac{1}{\ln^2 t} > \frac{t}{(t-1)^2}, \text{ 其中 } t = e^x > 1 \\ &\Leftrightarrow \ln t < \frac{t-1}{\sqrt{t}} = \sqrt{t} - \frac{1}{\sqrt{t}}, \text{ 其中 } t = e^x > 1 \end{aligned}$$

而上式最后一个不等式显然成立(见关于 \ln 的常用不等式??). 故 $f''(x) > 0, \forall x \in (0, 1]$. 故 f 在 $(0, 1]$ 上是下凸函数. 从而由下凸函数的性质(切割线放缩)可得, $\forall x \in (0, 1]$, 固定 x , 对 $\forall y \in (0, x)$, 都有

$$f'(y)x \leq f(x) \leq [f(1) - f(y)]x = [\ln(e-1) - f(y)]x. \quad (2.102)$$

注意到

$$\begin{aligned} \lim_{y \rightarrow 0^+} f(y) &= \lim_{y \rightarrow 0^+} \ln\left(\frac{e^y - 1}{y}\right) = \ln\left(\lim_{y \rightarrow 0^+} \frac{e^y - 1}{y}\right) = \ln 1 = 0, \\ \lim_{y \rightarrow 0^+} f'(y) &= \lim_{y \rightarrow 0^+} \left(\frac{e^y}{e^y - 1} - \frac{1}{y}\right) = \lim_{y \rightarrow 0^+} \frac{e^y(y-1)+1}{y(e^y-1)} \\ &= \lim_{y \rightarrow 0^+} \frac{(1+y+\frac{1}{2}y^2+o(y^2))(y-1)+1}{y^2} = \lim_{y \rightarrow 0^+} \frac{\frac{1}{2}y^2+o(y^2)}{y^2} = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

于是令(2.102)式 $y \rightarrow 0^+$, 得到

$$\frac{1}{2}x = \lim_{y \rightarrow 0^+} f'(y)x \leq f(x) \leq [\ln(e-1) - \lim_{y \rightarrow 0^+} f(y)]x = x \ln(e-1), \forall x \in (0, 1].$$

又 $a_n \in (0, 1]$, 故

$$\frac{1}{2}a_n \leq a_{n+1} = f(a_n) \leq \ln(e-1)a_n, \forall n \in \mathbb{N}.$$

从而

$$\frac{1}{2} \leq \frac{a_{n+1}}{a_n} \leq \ln(e-1) < \frac{\sqrt{2}}{2}, \forall n \in \mathbb{N}. \quad (2.103)$$

因此

$$a_n = a_1 \prod_{k=1}^{n-1} \frac{a_{k+1}}{a_k} \leq [\ln(e-1)]^{n-1}, \forall n \in \mathbb{N}. \quad (2.104)$$

于是结合(2.101)(2.104)式可得对 $\forall n > N$, 我们有

$$2^{n+1} \left(\ln\left(\frac{e^{a_n} - 1}{a_n}\right) - \frac{1}{2}a_n \right) < 2^{n+1} a_n^2 \leq 2^{n+1} [\ln(e-1)]^{2n-2} = \frac{2}{\ln^2(e-1)} [2 \ln^2(e-1)]^n.$$

又由(2.103)式可知, $2 \ln^2(e-1) < 2 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 = 1$. 故 $\sum_{k=1}^n \frac{2}{\ln^2(e-1)} [2 \ln^2(e-1)]^k$ 收敛. 从而由比较判别法知

$$\sum_{k=1}^n 2^{k+1} \left(\ln\left(\frac{e^{a_k} - 1}{a_k}\right) - \frac{1}{2}a_k \right)$$

也收敛. 结论得证. \square

例题 2.106 Herschfeld 判别法 设 $p > 1$, 令 $a_n = \sqrt[p]{b_1 + \sqrt[p]{b_2 + \cdots + \sqrt[p]{b_n}}}, b_n > 0$, 证明: 数列 a_n 收敛等价于数列 $\frac{\ln b_n}{p^n}$ 有界.

注 这个很抽象的结果叫做 Herschfeld 判别法, 但是证明起来只需要单调有界.

证明 由条件可知 $a_2 > a_1$, 假设 $a_n > a_{n-1}$, 则由 $b_n > 0$ 可得

$$a_{n+1} = \sqrt[p]{b_1 + \sqrt[p]{b_2 + \cdots + \sqrt[p]{b_n + \sqrt[p]{b_{n+1}}}}} > \sqrt[p]{b_1 + \sqrt[p]{b_2 + \cdots + \sqrt[p]{b_n}}} = a_n.$$

由数学归纳法可知 $\{a_n\}$ 单调递增.

若 a_n 收敛, 则由单调有界定理可知, a_n 有上界. 即存在 $M > 0$, 使得 $a_n < M, \forall n \in \mathbb{N}$. 从而

$$M > a_n = \sqrt[p]{b_1 + \sqrt[p]{b_2 + \cdots + \sqrt[p]{b_n}}} > \sqrt[p]{0 + \sqrt[p]{0 + \cdots + \sqrt[p]{b_n}}} = b_n^{\frac{1}{p^n}}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

故

$$\frac{\ln b_n}{p^n} = \ln b_n^{\frac{1}{p^n}} < \ln M, \forall n \in \mathbb{N}.$$

即 $\frac{\ln b_n}{p^n}$ 有界.

若 $\frac{\ln b_n}{p^n}$ 有界, 则存在 $M_1 > 0$, 使得

$$\frac{\ln b_n}{p^n} < M_1, \forall n \in \mathbb{N}. \quad (2.105)$$

记 $C = e^{M_1}$, 则由 (2.105) 式可得

$$b_n < e^{M_1 p^n} = C^{p^n}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

从而

$$a_n = \sqrt[p]{b_1 + \sqrt[p]{b_2 + \cdots + \sqrt[p]{b_n}}} < \sqrt[p]{C^p + \sqrt[p]{C^{p^2} + \cdots + \sqrt[p]{C^{p^n}}}} = C \sqrt[p]{1 + \sqrt[p]{1 + \cdots + \sqrt[p]{1}}}. \quad (2.106)$$

考虑数列 $x_1 = 1, x_{n+1} = \sqrt[p]{1+x_n}, \forall n \in \mathbb{N}$. 显然 $x_n > 0$, 记 $f(x) = \sqrt[p]{1+x}$, 则

$$f'(x) = \frac{1}{p}(1+x)^{\frac{1}{p}-1} < \frac{1}{p} < 1, \forall x > 0.$$

而显然 $f(x) = x$ 有唯一解 $a > 1$, 从而由 Lagrange 中值定理可得 $\forall n \in \mathbb{N}$, 存在 $\xi_n \in (\min\{x_n, a\}, \max\{x_n, a\})$, 使得

$$|x_{n+1} - a| = |f(x_n) - f(a)| = f'(\xi_n)|x_n - a| < \frac{1}{p}|x_n - a|.$$

于是

$$|x_{n+1} - a| < \frac{1}{p}|x_n - a| < \frac{1}{p^2}|x_{n-1} - a| < \cdots < \frac{1}{p^n}|x_1 - a| \rightarrow 0, n \rightarrow \infty.$$

故 x_n 收敛到 a , 因此 x_n 有界, 即存在 K , 使得 $x_n < K, \forall n \in \mathbb{N}$. 于是结合 (2.106) 可得

$$a_n = C \sqrt[p]{1 + \sqrt[p]{1 + \cdots + \sqrt[p]{1}}} = C x_n < C K, \forall n \in \mathbb{N}.$$

即 a_n 有界, 又因为 $\{a_n\}$ 单调递增, 所以由单调有界定理可知, a_n 收敛. □

例题 2.107 设 d 为正整数, 给定 $1 < a \leq \frac{d+2}{d+1}, x_0, x_1, \dots, x_d \in (0, a-1)$, 令 $x_{n+1} = x_n(a-x_{n-d}), n \geq d$, 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 存在并求极限.

证明 证明见 1sz(2024-2025) 数学类讲义的不动点与蛛网图方法部分. □

例题 2.108 设 x_n 满足当 $|i-j| \leq 2$ 时总有 $|x_i - x_j| \geq |x_{i+1} - x_{j+1}|$, 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{n}$ 存在.

注 仅凭 $|x_{n+1} - x_n|$ 单调递减无法保证极限存在, 只能说明数列 $\frac{x_n}{n}$ 有界, 但是完全有可能其聚点集合是一个闭区间, 所以 $|x_{n+2} - x_n|$ 的递减性是必要的. 本题其实画图来看走势很直观.

证明 条件等价于 $|x_{n+1} - x_n|, |x_{n+2} - x_n|$ 这两个数列都是单调递减的, 显然非负, 所以它们的极限都存在.

(i) 如果 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_{n+1} - x_n| = 0$, 则由 stolz 公式显然 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1} - x_n = 0$.

(ii) 如果 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_{n+2} - x_n| = 0$, 则奇偶两个子列分别都有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{2n}}{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n+2} - x_{2n} = 0, \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{2n+1}}{2n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n+1} - x_{2n-1} = 0$$

所以 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{n} = 0$, 因此下面只需讨论 $|x_{n+1} - x_n|, |x_{n+2} - x_n|$ 的极限都非零的情况.

不妨设 $|x_{n+1} - x_n|$ 单调递减趋于 1(如果极限不是 1 而是别的正数, 考虑 kx_n 这样的数列就可以了), 由于非负递减数列 $|x_{n+2} - x_n|$ 的极限非零, 故存在 $\delta \in (0, 1)$ 使得 $|x_{n+2} - x_n| \geq \delta$ 恒成立.

(i) 如果 x_n 是最终单调的, 也就是说存在 N 使得 $n > N$ 时 $x_{n+1} - x_n$ 恒正或者恒负, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1} - x_n = 1$ 或者 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1} - x_n = -1$, 再用 stolz 公式可知极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{n}$ 存在.

(ii) 如果 x_n 不是最终单调的, 因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_{n+1} - x_n| = 1$, 所以存在 N 使得 $n > N$ 时恒有 $|x_{n+1} - x_n| \in \left[1, 1 + \frac{\delta}{2}\right]$,

并且 $n > N$ 时 x_n 不是单调的, 故存在 $n > N$ 使得以下两种情况之一成立

(a): $1 \leq x_{n+1} - x_n \leq 1 + \frac{\delta}{2}, 1 \leq x_{n+1} - x_{n+2} \leq 1 + \frac{\delta}{2} \Rightarrow |x_{n+2} - x_n| \leq \frac{\delta}{2}$.

(b): $1 \leq x_n - x_{n+1} \leq 1 + \frac{\delta}{2}, 1 \leq x_{n+2} - x_{n+1} \leq 1 + \frac{\delta}{2} \Rightarrow |x_{n+2} - x_n| \leq \frac{\delta}{2}$.

可见不论哪种情况成立, 都会与 $|x_{n+2} - x_n| \geq \delta$ 恒成立矛盾, 结论得证.

□

例题 2.109 设四个正数列 $\{a_n\}, \{b_n\}, \{c_n\}, \{t_n\}$ 满足

$$t_n \in (0, 1), \sum_{n=1}^{\infty} t_n = +\infty, \sum_{n=1}^{\infty} b_n < +\infty, \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{t_n} = 0, x_{n+1} \leq (1 - t_n)x_n + a_n + b_n$$

证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$.



笔记 这类问题直接强求通项即可.

证明 根据条件有

$$\begin{aligned} \frac{x_{n+1}}{(1 - t_n) \cdots (1 - t_1)} &\leq \frac{x_n}{(1 - t_{n-1}) \cdots (1 - t_1)} + \frac{a_n + b_n}{(1 - t_n) \cdots (1 - t_1)} \\ \frac{x_{n+1}}{(1 - t_n) \cdots (1 - t_1)} &\leq x_1 + \sum_{k=1}^n \frac{a_k + b_k}{(1 - t_k) \cdots (1 - t_1)} \\ x_{n+1} &\leq x_1(1 - t_n) \cdots (1 - t_1) + \sum_{k=1}^n (a_k + b_k)(1 - t_{k+1}) \cdots (1 - t_n) \end{aligned}$$

换元令 $u_n = 1 - t_n \in (0, 1)$, 则

$$\ln \prod_{n=1}^{\infty} u_n = \sum_{n=1}^{\infty} \ln u_n \leq \sum_{n=1}^{\infty} (u_n - 1) = - \sum_{n=1}^{\infty} t_n = -\infty \Rightarrow \prod_{n=1}^{\infty} u_n = 0$$

代入有

$$x_{n+1} \leq x_1 u_1 u_2 \cdots u_n + \sum_{k=1}^n a_k u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n + \sum_{k=1}^n b_k u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n$$

显然 $x_1 u_1 u_2 \cdots u_n \rightarrow 0$, 于是只需要看后面两项. 对于最后一项, 我们待定正整数 $N \leq n$, 则有

$$\sum_{k=1}^n b_k u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n = \sum_{k=1}^N b_k u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n + \sum_{k=N+1}^n b_k u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n$$

其中 $\sum_{k=N+1}^n b_k u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n \leq \sum_{k=N+1}^n b_k < \sum_{k=N}^{\infty} b_k$, 于是对任意 $\varepsilon > 0$, 可以取充分大的 N 使得 $\sum_{k=N+1}^n b_k u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n < \varepsilon$, 现在 N 已经取定, 再对前面有限项取极限有

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n b_k u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n \leq \sum_{k=1}^N b_k \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} (u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n) + \varepsilon = \varepsilon$$

由此可见最后一项的极限是零, 最后来看中间一项, 记 $s_n = \frac{a_n}{t_n} = \frac{a_n}{1 - u_n} \rightarrow 0$, 则对任意 N 有

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n a_k u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n &= \sum_{k=1}^n s_k (1 - u_k) u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n \\ &= \sum_{k=1}^N s_k (1 - u_k) u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n + \sum_{k=N+1}^n s_k (1 - u_k) u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n \\ \sum_{k=N+1}^n s_k (1 - u_k) u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n &\leq \sup_{k \geq N} s_k \sum_{k=N+1}^n (1 - u_k) u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n \leq \sup_{k \geq N} s_k \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n a_k u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N s_k (1 - u_k) u_{k+1} u_{k+2} \cdots u_n + \sup_{k \geq N} s_k = \sup_{k \geq N} s_k \end{aligned}$$

再令 $N \rightarrow \infty$, 由此可见这一部分的极限也是零, 结论得证.

□

2.7 分部积分

分析学里流传着一句话：“遇事不决分部积分”.

分部积分在渐近分析中的用法：

- (1) 有时候分部积分不能计算出某一积分的具体值, 但是我们可以利用分部积分去估计原积分 (或原含参积分) 的范围. 并且我们可以通过不断分部积分来提高估计的精确程度.
- (2) 分部积分也可以转移被积函数的导数.
- (3) 分部积分可以改善阶. 通过分部积分提高分母的次方从而增加收敛速度方便估计. 并且可以通过反复分部积分得到更加精细的估计.

定理 2.11 (Newton-Leibniz 公式)

1. 若 $f \in \mathbb{R}[a, b]$, 且有原函数 F , 则有

$$\int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a).$$

2. 若函数 f 在 $[a, +\infty)$ 上的无穷积分收敛, 且有原函数 F , 则有

$$\int_a^{+\infty} f(x) dx = F(+\infty) - F(a).$$

若函数 f 在 $(-\infty, a]$ 上无穷积分收敛, 且有原函数 F , 则有

$$\int_{-\infty}^a f(x) dx = F(a) - F(-\infty).$$

若函数 f 在 $(-\infty, +\infty)$ 上的无穷积分收敛, 且有原函数 F , 则有

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = F(+\infty) - F(-\infty).$$



定理 2.12 (分部积分公式)

1. 设函数 u, v 在 $[a, b]$ 上连续可微, 则

$$\int_a^b u(x)v'(x) dx = u(x)v(x) \Big|_a^{+\infty} - \int_a^b u'(x)v(x) dx.$$

2. 设函数 u, v 在 $[a, +\infty)$ 上连续可微且极限 $\lim_{x \rightarrow +\infty} u(x)v(x)$ 存在. 若 $u'v$ 和 uv' 中有一个在 $[a, +\infty)$ 上的无穷积分收敛, 则另一个在 $[a, +\infty)$ 上的无穷积分也收敛, 且

$$\int_a^{+\infty} u(x)v'(x) dx = u(x)v(x) \Big|_a^{+\infty} - \int_a^{+\infty} u'(x)v(x) dx.$$



注 广义积分的分部积分公式形式上与常义积分的分部积分公式一样, 既可用来计算 (已知收敛的) 广义积分, 也能用来证明广义积分收敛.

例题 2.110

$$f(x) = \int_x^{x+1} \sin t^2 dt.$$

证明 $|f(x)| \leq \frac{1}{x}, x > 0$.



笔记 证明的想法是利用分部积分在渐近分析中的用法 (1).

证明 由分部积分可得, 对 $\forall x > 0$, 都有

$$\begin{aligned} |f(x)| &= \left| \int_x^{x+1} \sin t^2 dt \right| = \left| \int_{x^2}^{(x+1)^2} \frac{\sin u}{2\sqrt{u}} du \right| = \left| -\frac{1}{4} \int_{x^2}^{(x+1)^2} u^{-\frac{3}{2}} \cos u du - \frac{\cos u}{2\sqrt{u}} \Big|_{x^2}^{(x+1)^2} \right| \\ &\leq \left| \frac{1}{4} \int_{x^2}^{(x+1)^2} u^{-\frac{3}{2}} du \right| + \left| \frac{\cos x}{2x} - \frac{\cos(x+1)}{2(x+1)} \right| = \frac{1}{2} \left| \frac{1}{x} - \frac{1}{x+1} \right| + \frac{1}{2} \left| \frac{\cos x}{x} - \frac{\cos(x+1)}{(x+1)} \right| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2x(x+1)} + \frac{x[\cos x - \cos(x+1)] + \cos x}{2x(x+1)} = \frac{1}{2x(x+1)} + \frac{2\sin\frac{1}{2}x \sin\frac{2x+1}{2} + \cos x}{2x(x+1)} \\
&\leq \frac{1}{2x(x+1)} + \frac{x+1}{2x(x+1)} = \frac{1}{2x(x+1)} + \frac{1}{2x} \leq \frac{1}{x}.
\end{aligned}$$

□

例题 2.111 设 $f(x), g(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 且满足

$$\int_a^x f(t)dt \geq \int_a^x g(t)dt, \quad x \in [a, b], \quad \int_a^b f(t)dt = \int_a^b g(t)dt,$$

证明:

$$\int_a^b xf(x)dx \leq \int_a^b xg(x)dx.$$

证明 由分部积分可得

$$\begin{aligned}
\int_a^b xf(x)dx &= b \int_a^b f(t)dt - \int_a^b \left(\int_a^x f(t)dt \right) dx \\
&\leq b \int_a^b g(t)dt - \int_a^b \left(\int_a^x g(t)dt \right) dx \\
&= \int_a^b xg(x)dx.
\end{aligned}$$

□

例题 2.112 设 $f(x) = \int_0^x \sin \frac{1}{y} dy$, 求 $f'(0)$.

笔记 证明的想法是利用分部积分在渐近分析中的用法(3).

解 注意到

$$f'_+(0) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^x \sin \frac{1}{y} dy}{x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_{\frac{1}{x}}^{+\infty} \frac{\sin y}{y^2} dy}{x} \xrightarrow{\text{令 } t=\frac{1}{x}} \lim_{t \rightarrow +\infty} t \int_t^{+\infty} \frac{\sin y}{y^2} dy, \quad (2.107)$$

$$f'_-(0) = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{\int_0^x \sin \frac{1}{y} dy}{x} = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{\int_{\frac{1}{x}}^{+\infty} \frac{\sin y}{y^2} dy}{x} \xrightarrow{\text{令 } t=\frac{1}{x}} \lim_{t \rightarrow -\infty} t \int_t^{-\infty} \frac{\sin y}{y^2} dy. \quad (2.108)$$

由分部积分可得

$$\int_t^{+\infty} \frac{\sin y}{y^2} dy = - \int_t^{+\infty} \frac{1}{y^2} d\cos y = \frac{\cos y}{y^2} \Big|_{+\infty}^t + \int_t^{+\infty} \cos y d\frac{1}{y^2} = \frac{\cos t}{t^2} - 2 \int_t^{+\infty} \frac{\cos y}{y^3} dy.$$

故对 $\forall t > 0$, 我们有

$$\left| \int_t^{+\infty} \frac{\sin y}{y^2} dy \right| = \left| \frac{\cos t}{t^2} - 2 \int_t^{+\infty} \frac{\cos y}{y^3} dy \right| \leq \frac{1}{t^2} + 2 \int_t^{+\infty} \frac{1}{y^3} dy = \frac{2}{t^2}.$$

即 $\int_t^{+\infty} \frac{\sin y}{y^2} dy = O\left(\frac{1}{t^2}\right)$, $\forall t > 0$. 再结合(2.107)式可知

$$f'_+(0) = \lim_{t \rightarrow +\infty} t \int_t^{+\infty} \frac{\sin y}{y^2} dy = 0.$$

同理可得 $f'_-(0) = \lim_{t \rightarrow -\infty} t \int_t^{-\infty} \frac{\sin y}{y^2} dy = 0$. 故 $f'(0) = f'_+(0) = f'_-(0) = 0$.

□

例题 2.113 证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{+\infty} \frac{n^2 x}{1+x^2} e^{-n^2 x^2} dx = \frac{1}{2}.$$

证明 由分部积分可得

$$\begin{aligned}
\int_0^{+\infty} \frac{n^2 x}{1+x^2} e^{-n^2 x^2} dx &= \int_0^{+\infty} \frac{x}{1+\left(\frac{x}{n}\right)^2} e^{-x^2} dx = -\frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{1}{1+\left(\frac{x}{n}\right)^2} de^{-x^2} \\
&= -\frac{1}{2} \left. \frac{e^{-x^2}}{1+\left(\frac{x}{n}\right)^2} \right|_0^{+\infty} - \frac{1}{n^2} \int_0^{+\infty} \frac{xe^{-x^2}}{\left[1+\left(\frac{x}{n}\right)^2\right]^2} dx
\end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2} - \frac{1}{n^2} \int_0^{+\infty} \frac{xe^{-x^2}}{\left[1 + \left(\frac{x}{n}\right)^2\right]^2} dx.$$

注意到

$$\int_0^{+\infty} \frac{xe^{-x^2}}{\left[1 + \left(\frac{x}{n}\right)^2\right]^2} dx \leq \int_0^{+\infty} xe^{-x^2} dx = \left. \frac{e^{-x^2}}{2} \right|_0^{+\infty} = \frac{1}{2},$$

故

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| \int_0^{+\infty} \frac{n^2 x}{1 + x^2} e^{-n^2 x^2} dx - \frac{1}{2} \right| \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^2} \int_0^{+\infty} \frac{xe^{-x^2}}{\left[1 + \left(\frac{x}{n}\right)^2\right]^2} dx = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2n^2} = 0.$$

□

例题 2.114 设 f 是区间 $[0, 1]$ 上的连续函数并满足 $0 \leq f(x) \leq x$. 求证:

$$\int_0^1 f(x) dx - \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2 \geq \int_0^1 x^2 f(x) dx \geq \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2.$$

并且上式成为等式当且仅当 $f(x) = x$.

证明 证法一 (分部积分): 设 f 是连续函数满足所给的条件, $F(x) = \int_0^x f(t) dt$, 则 $F' = f$. 由 $0 < f(x) \leq x$ 得 $F(x) \leq \int_0^x t dt = \frac{1}{2}x^2$. 因而

$$\int_0^1 x^2 f(x) dx \geq \int_0^1 2F(x)F'(x) dx = F^2(x) \Big|_0^1 = \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2.$$

利用分部积分, 得

$$\begin{aligned} \int_0^1 x^2 f(x) dx &= x^2 F(x) \Big|_0^1 - \int_0^1 2xF(x) dx = \int_0^1 f(x) dx - \int_0^1 2xF(x) dx \\ &\leq \int_0^1 f(x) dx - \int_0^1 2f(x)F(x) dx = \int_0^1 f(x) dx - F^2(x) \Big|_0^1 \\ &= \int_0^1 f(x) dx - \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2. \end{aligned}$$

由证明过程可知只有当 $f(x) = x$ 时, 所证不等式成为等式.

证法二 (直接求导法): 令

$$F(x) = \int_0^x t^2 f(t) dt - \left(\int_0^x f(t) dt \right)^2,$$

则

$$F'(x) = x^2 f(x) - 2f(x) \int_0^x f(t) dt \geq x^2 f(x) - 2f(x) \int_0^x t dt = 0.$$

故

$$\int_0^1 t^2 f(t) dt - \left(\int_0^1 f(t) dt \right)^2 = F(1) \geq F(0) = 0.$$

令 $h(x) = \int_0^x f(t) dt$, 则 $f(x) = h'(x)$, 从而

$$\int_0^1 x^2 f(x) dx = \int_0^1 x^2 h'(x) dx \stackrel{\text{分部积分}}{=} \int_0^1 f(x) dx - 2 \int_0^1 x h(x) dx.$$

因此

$$\int_0^1 x^2 f(x) dx \leq \int_0^1 f(x) dx - \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2 \iff 2 \int_0^1 x h(x) dx \geq \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2. \quad (2.109)$$

再令

$$G(x) = 2 \int_0^x t h(t) dt - \left(\int_0^x f(t) dt \right)^2,$$

则

$$G'(x) = 2x \int_0^x f(t) dt - 2f(x) \int_0^x f(t) dt \geq 0.$$

故

$$2 \int_0^1 x h(x) dx - \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2 = G(1) \geq G(0) = 0.$$

因此(2.109)式成立. 由证明过程可知只有当 $f(x) = x$ 时, 所证不等式成为等式.

□

2.8 Laplace 方法

Laplace 方法适用于估计形如 $\int_a^b [f(x)]^n g(x) dx, n \rightarrow \infty$ 的渐近展开式, 其中 $f, g \in C[a, b]$ 且 g 在 $[a, b]$ 上有界; 或者 $\int_a^b e^{f(x,y)} g(y) dy, x \rightarrow +\infty$ 的渐近展开式, 其中 $f, g \in C[a, b]$ 且 g 在 $[a, b]$ 上有界. 实际上, 若要估计的是前者, 我们可以将其转化为后者的形式如下:

$$\int_a^b [f(x)]^n g(x) dx = \int_a^b e^{n \ln f(x)} g(x) dx.$$

若参变量 n, x 在积分区间上, 或者估计的不是 $n, x \rightarrow +\infty$ 处的渐近展开式, 而是其他点处 ($x \rightarrow x_0$) 处的渐近展开式. 我们都可以通过积分换元将其转化为标准形式 $\int_a^b e^{f(x,y)} g(y) dy, x \rightarrow +\infty$, 其中 $f, g \in C[a, b]$.

思路分析: 首先, 由含参量积分的计算规律 (若被积函数含有 $e^{f(x)}$, 则积分得到的结果中一定仍含有 $e^{f(x)}$), 我们可以大致估计积分 $\int_a^b e^{f(x,y)} g(y) dy, x \rightarrow +\infty$ 的结果是 $C_1 h_1(x) e^{f(x,b)} - C_2 h_2(x) e^{f(x,b)} e^{f(x,a)}$, 其中 C 为常数. 因为指数函数的阶远大于一般初等函数的阶, 这个结果的阶的主体部分就是 $e^{f(x,b)}$ 和 $e^{f(x,a)}$. 而我们注意到改变指数函数 e^{px+q} 的幂指数部分的常数 p 会对这个指数函数的阶 ($x \rightarrow +\infty$) 产生较大影响, 而改变 q 不会影响这个指数函数的阶. 比如, e^{2x} 比 e^x 高阶 ($x \rightarrow +\infty$). 由此我们可以发现 $e^{f(x,b)}$ 和 $e^{f(x,a)}$ 中的幂指数部分中 $f(x,a), f(x,b)$ 中除常数项外的含 x 项的系数 (暂时叫作指数系数) 对这个函数的阶影响较大. 然而这些系数都是由被积函数中的 $f(x, y)$ 和积分区间决定的, 但是在实际问题中 $f(x, y)$ 的形式已经确定, 因此这些系数仅仅由积分区间决定. 于是当我们只计算某些不同点附近 (充分小的邻域内) 的含参量积分时, 得到的这些系数一般不同, 从而导致这些积分的阶不同. 故我们可以断言这类问题的含参量积分在每一小段上的阶都是不同的. 因此我们只要找到这些不同的阶中最大的阶 (此时最大阶就是主体部分) 就相当于估计出了积分在整个区间 $[a, b]$ 上的阶. 由定积分的几何意义, 我们不难发现当参变量 x 固定时, 并且当积分区间为某一点 y_0 附近时, 只要被积函数的 $e^{f(x,y)}$ 在 y_0 处 (关于 y) 的取值越大, 积分后得到的 (值/充分小邻域内函数与 x 轴围成的面积) 指数系数就会越大, 从而在 y_0 附近的积分的阶也就越大. 综上所述, 当参变量 x 固定时, $f(x, y)$ (关于 y) 的最大值点附近的积分就是原积分的主体部分, 在其他区间上的积分全都是余项部分.

然后, 我们将原积分按照上述的积分区间分段, 划分为主体部分和余项部分. 我们知道余项部分一定可以通过放缩、取上下极限等操作变成 0 (余项部分的放缩一般需要结合具体问题, 并使用一些放缩技巧来实现. 但是我们其实只要心里清楚余项部分一定能够通过放缩、取上下极限变成 0 即可), 关键是估计主体部分的阶. 我们注意到主体部分的积分区间都包含在某一点的邻域内, 而一般估计在某个点附近的函数的阶, 我们都会想到利用 Taylor 定理将其在这个点附近展开. 因此我们利用 Taylor 定理将主体部分的被积函数的指数部分 $f(x, y)$ 在最大值点附近 (关于 y) 展开 (注意: 此时最多展开到 x^2 项, 如果展开项的次数超过二次, 那么后续要么就无法计算积分, 要么计算就无法得到有效结果, 比如最后积分、取极限得到 $\infty + \infty$ 或 $0 \cdot \infty$ 等这一类无效的结果). Taylor 展开之后, 我们只需要利用欧拉积分和定积分, 直接计算得到结果即可.

事实上, 若原积分中的有界连续函数 $g(x)$ 在 f 的极值点处不为 0, 则 $g(x)$ 只会影响渐进展开式中的系数, 对整体的阶并不造成影响. 在实际估计中处理 $g(x)$ 的方法:(i) 在余项部分, 直接将 $g(x)$ 放缩成其在相应区间上的上界或下界即可.(ii) 在主体部分, 因为主体部分都包含在 $f(x, y)$ (关于 y) 的某些最大值点 y_i 的邻域内, 所以结合 $g(x)$ 的连续性, 直接将 $g(x)$ 用 $g(y_i)$ 代替即可(将 $g(x)$ 放缩成 $g(y_i) \pm \varepsilon$ 即可). 即相应的主体部分(y_i 点附近)乘以 $g(x)$ 相应的函数值 $g(y_i)$. 具体例题见例题 2.123. 也可以采取拟合法处理 $g(x)$, 具体例题见例题 2.124.

若原积分中的有界连续函数 $g(x)$ 在 f 的极值点处为 0, 则在估计积分的阶的时候就要将 $g(x)$ 考虑进去. 需要结合 $g(x)$ 的具体结构、性质进行分析.

严谨的证明过程最好用上下极限和 $\varepsilon - \delta$ 语言书写. 具体严谨的证明书写见例题: 例题 2.118, 例题 2.119, 例题 2.120, 例题 2.123.

 **笔记** Laplace 方法的思路蕴含了一些常用的想法: 分段估计、Taylor 定理估阶. 而严谨的证明书写也使用一些常用方法: 上下极限、 $\varepsilon - \delta$ 语言、拟合法.

注 上述 Laplace 方法得到的渐近估计其实比较粗糙, 想要得到更加精细的渐近估计需要用到更加深刻的想法和技巧(比如 Puiseux 级数展开(见清疏讲义)等).

例题 2.115 设 $a_1, a_2, \dots, a_m > 0, m \in \mathbb{N}$, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_1^n + a_2^n + \dots + a_m^n} = \max_{1 \leq j \leq m} a_j.$$

注 熟知, 极限蕴含在 a_1, a_2, \dots, a_m 的最大值中.

证明 显然

$$\max_{1 \leq j \leq m} a_j = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\max_{1 \leq j \leq m} a_j^n} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_1^n + a_2^n + \dots + a_m^n} \leq \max_{1 \leq j \leq m} a_j \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{m} = \max_{1 \leq j \leq m} a_j, \quad (2.110)$$

从而我们证明了(2.110). □

例题 2.116 设非负函数 $f \in C[a, b]$, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\int_a^b f^n(x) dx} = \max_{x \in [a, b]} f(x).$$

注 熟知, 极限蕴含在 f 的最大值中.

 **笔记** 这两个基本例子也暗示了离散和连续之间有时候存在某种类似的联系.

证明 事实上记 $f(x_0) = \max_{x \in [a, b]} f(x), x_0 \in [a, b]$, 不失一般性我们假设 $x_0 \in (a, b)$. 那么对充分大的 $n \in \mathbb{N}$, 我们由积分中值定理知道存在 $\theta_n \in (x_0 - \frac{1}{2n}, x_0 + \frac{1}{2n})$, 使得

$$f(\theta_n) \sqrt[n]{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{\int_{x_0 - \frac{1}{2n}}^{x_0 + \frac{1}{2n}} f^n(x) dx} \leq \sqrt[n]{\int_a^b f^n(x) dx} \leq \sqrt[n]{\int_a^b f^n(x_0) dx} = f(x_0) \sqrt[n]{b - a}. \quad (2.111)$$

两边取极限即得(2.111). □

例题 2.117 设非负严格递增函数 $f \in C[a, b]$, 由积分中值定理我们知道存在 $x_n \in [a, b]$, 使得

$$f^n(x_n) = \frac{1}{b - a} \int_a^b f^n(x) dx.$$

计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.

证明 由(上一题)例题 2.116, 我们知道

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\frac{1}{b - a}} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\int_a^b f^n(x) dx} = f(b).$$

注意到 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset [a, b]$, 我们知道对任何 $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = c \in [a, b]$, 都有 $\lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) = f(c) = f(b)$. 又由于 f 为严格递增函数, 因此只能有 $c = b$, 利用命题 1.1 的(a)(Heine 归结原理), 我们知道 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = b$. 证毕! □

定理 2.13 (Wallis 公式)

$$\frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} = \sqrt{\pi n} + \frac{\sqrt{\pi}}{8} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} + o\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right). \quad (2.112)$$



注 我们只需要记住 $\frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} \sim \sqrt{\pi n}, n \rightarrow +\infty$ 及其证明即可, 更精细的渐近表达式一般用不到.

笔记 (2.112) 式等价于

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \left[\frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} - \sqrt{\pi n} \right] = \frac{\sqrt{\pi}}{8}. \quad (2.113)$$

证明的想法是把(2.113)式用积分表示并运用 Laplace 方法进行估计.

证明 我们只证明 $\frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} \sim \sqrt{\pi n}, n \rightarrow +\infty$, 更精细的渐近表达式一般不会被考察, 故在此不给出证明.(更精细的渐近表达式的证明可见清疏讲义)

注意到经典积分公式

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{2n} x dx = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!}. \quad (2.114)$$

利用 Taylor 公式的 Peano 余项, 我们知道

$$\ln \sin^2 x = -\left(x - \frac{\pi}{2}\right)^2 + o\left[\left(x - \frac{\pi}{2}\right)^2\right], \quad (2.115)$$

即 $\lim_{x \rightarrow \frac{\pi}{2}} \frac{\ln \sin^2 x}{-(x - \frac{\pi}{2})^2} = -1$. 于是利用(2.115), 对任何 $\varepsilon \in (0, 1)$, 我们知道存在 $\delta \in (0, 1)$, 使得对任何 $x \in [\frac{\pi}{2} - \delta, \frac{\pi}{2}]$, 都有

$$-(1 + \varepsilon) \left(x - \frac{\pi}{2}\right)^2 \leq \ln \sin^2 x \leq -(1 - \varepsilon) \left(x - \frac{\pi}{2}\right)^2. \quad (2.116)$$

利用(2.116)式, 现在一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{2n} x dx &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{n \ln \sin^2 x} dx \leq \int_0^{\frac{\pi}{2} - \delta} e^{n \ln \sin^2(\frac{\pi}{2} - \delta)} dx + \int_{\frac{\pi}{2} - \delta}^{\frac{\pi}{2}} e^{-n(1 - \varepsilon)(x - \frac{\pi}{2})^2} dx \\ &= (\frac{\pi}{2} - \delta) \sin^{2n}(\frac{\pi}{2} - \delta) + \int_0^{\delta} e^{-n(1 - \varepsilon)y^2} dy \\ &= (\frac{\pi}{2} - \delta) \sin^{2n}(\frac{\pi}{2} - \delta) + \frac{1}{\sqrt{(1 - \varepsilon)n}} \int_0^{\delta \sqrt{(1 - \varepsilon)n}} e^{-z^2} dz \\ &\leq (\frac{\pi}{2} - \delta) \sin^{2n}(\frac{\pi}{2} - \delta) + \frac{1}{\sqrt{(1 - \varepsilon)n}} \int_0^{\infty} e^{-z^2} dz. \end{aligned}$$

另外一方面, 我们有

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{2n} x dx \geq \int_{\frac{\pi}{2} - \delta}^{\frac{\pi}{2}} e^{-n(1 + \varepsilon)(x - \frac{\pi}{2})^2} dx = \int_0^{\delta} e^{-n(1 + \varepsilon)y^2} dy = \frac{1}{\sqrt{n(1 + \varepsilon)}} \int_0^{\delta \sqrt{n(1 + \varepsilon)}} e^{-z^2} dz.$$

因此我们有

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon}} \int_0^{\infty} e^{-z^2} dz \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{2n} x dx \leq \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon}} \int_0^{\infty} e^{-z^2} dz,$$

由 ε 任意性即可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{2n} x dx = \int_0^{\infty} e^{-z^2} dz = \frac{\sqrt{\pi}}{2}.$$

再结合(2.114)式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi \sqrt{n}}{2} \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} = \frac{\sqrt{\pi}}{2}.$$

即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\pi n} \cdot \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} = 1.$$

故 $\frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} \sim \sqrt{\pi n}, n \rightarrow +\infty$.

□

例题 2.118 求 $\int_0^\infty \frac{1}{(2+x^2)^n} dx, n \rightarrow \infty$ 的等价无穷小.

解 由 Taylor 定理可知, 对 $\forall \varepsilon \in (0, 1)$, 存在 $\delta > 0$, 使得当 $x \in [0, \delta]$ 时, 有

$$\frac{x^2}{2} - \varepsilon x^2 \leq \ln \left(1 + \frac{x^2}{2} \right) \leq \frac{x^2}{2} + \varepsilon x^2.$$

现在, 一方面我们有

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \frac{1}{(2+x^2)^n} dx &= \frac{1}{2^n} \int_0^\infty \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{2}\right)^n} dx = \frac{1}{2^n} \left(\int_0^\delta \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{2}\right)^n} dx + \int_\delta^\infty \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{2}\right)^n} dx \right) \\ &= \frac{1}{2^n} \left(\int_0^\delta e^{-n \ln \left(1 + \frac{x^2}{2}\right)} dx + \int_\delta^\infty \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{2}\right)^n} dx \right) \\ &\leq \frac{1}{2^n} \left(\int_0^\delta e^{-n \left(\frac{x^2}{2} - \varepsilon x^2\right)} dx + \int_\delta^\infty \frac{1}{1 + \frac{x^2}{2}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\delta^2}{2}\right)^{n-1}} dx \right) \\ &\stackrel{\text{令 } y=x\sqrt{n(\frac{1}{2}-\varepsilon)}}{=} \frac{1}{2^n} \left(\frac{1}{\sqrt{n(\frac{1}{2}-\varepsilon)}} \int_0^{\delta\sqrt{n(\frac{1}{2}-\varepsilon)}} e^{-y^2} dy + \frac{\sqrt{2}}{\left(1 + \frac{\delta^2}{2}\right)^{n-1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\delta}{\sqrt{2}} \right) \right) \\ &\leq \frac{1}{2^n} \left(\frac{1}{\sqrt{n(\frac{1}{2}-\varepsilon)}} \int_0^\infty e^{-y^2} dy + \frac{\pi\sqrt{2}}{2\left(1 + \frac{\delta^2}{2}\right)^{n-1}} \right) = \frac{1}{2^n} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{n(\frac{1}{2}-\varepsilon)}} + \frac{\pi\sqrt{2}}{2\left(1 + \frac{\delta^2}{2}\right)^{n-1}} \right). \end{aligned}$$

于是

$$\int_0^\infty \frac{2^n \sqrt{n}}{(2+x^2)^n} dx \leq \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\left(\frac{1}{2}-\varepsilon\right)}} + \frac{\pi\sqrt{2n}}{2\left(1 + \frac{\delta^2}{2}\right)^{n-1}}.$$

上式两边同时令 $n \rightarrow \infty$ 并取上极限得到

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty \frac{2^n \sqrt{n}}{(2+x^2)^n} dx \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\left(\frac{1}{2}-\varepsilon\right)}} + \frac{\pi\sqrt{2n}}{2\left(1 + \frac{\delta^2}{2}\right)^{n-1}} \right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\left(\frac{1}{2}-\varepsilon\right)}}.$$

再由 ε 的任意性可得 $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty \frac{2^n \sqrt{n}}{(2+x^2)^n} dx \leq \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\frac{1}{2}}} = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$.

另外一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \frac{1}{(2+x^2)^n} dx &= \frac{1}{2^n} \int_0^\infty \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{2}\right)^n} dx \geq \frac{1}{2^n} \int_0^\delta \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{2}\right)^n} dx \\ &= \frac{1}{2^n} \int_0^\delta e^{-n \ln \left(1 + \frac{x^2}{2}\right)} dx \geq \frac{1}{2^n} \int_0^\delta e^{-n \left(\frac{x^2}{2} + \varepsilon x^2\right)} dx \\ &\stackrel{\text{令 } y=x\sqrt{n(\frac{1}{2}+\varepsilon)}}{=} \frac{1}{2^n \sqrt{n(\frac{1}{2}+\varepsilon)}} \int_0^{\delta\sqrt{n(\frac{1}{2}+\varepsilon)}} e^{-y^2} dy. \end{aligned}$$

于是

$$\int_0^\infty \frac{2^n \sqrt{n}}{(2+x^2)^n} dx \geq \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{2}+\varepsilon\right)}} \int_0^{\delta\sqrt{n(\frac{1}{2}+\varepsilon)}} e^{-y^2} dy.$$

上式两边同时令 $n \rightarrow \infty$ 并取下极限得到

$$\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty \frac{2^n \sqrt{n}}{(2+x^2)^n} dx \geq \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{2}+\varepsilon\right)}} \int_0^{\delta\sqrt{n(\frac{1}{2}+\varepsilon)}} e^{-y^2} dy = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{2}+\varepsilon\right)}} \int_0^\infty e^{-y^2} dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\left(\frac{1}{2}+\varepsilon\right)}}.$$

再由 ε 的任意性可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty \frac{2^n \sqrt{n}}{(2+x^2)^n} dx \geq \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\frac{1}{2}}} = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$.

因此, 再结合 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty \frac{2^n \sqrt{n}}{(2+x^2)^n} dx \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty \frac{2^n \sqrt{n}}{(2+x^2)^n} dx$, 我们就有

$$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty \frac{2^n \sqrt{n}}{(2+x^2)^n} dx \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty \frac{2^n \sqrt{n}}{(2+x^2)^n} dx \leq \sqrt{\frac{\pi}{2}}.$$

故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty \frac{2^n \sqrt{n}}{(2+x^2)^n} dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$. 即 $\int_0^\infty \frac{1}{(2+x^2)^n} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2^n \sqrt{2n}} + o\left(\frac{1}{2^n \sqrt{n}}\right), n \rightarrow \infty$.

□

例题 2.119 求 $\int_0^x e^{-y^2} dy, x \rightarrow +\infty$ 的渐近估计 (仅两项).

笔记 因为 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_0^x e^{-y^2} dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$, 所以实际上只需要估计

$$\frac{\sqrt{\pi}}{2} - \int_0^x e^{-y^2} dy = \int_0^\infty e^{-y^2} dy - \int_0^x e^{-y^2} dy = \int_x^\infty e^{-y^2} dy, x \rightarrow +\infty.$$

解 由 Taylor 定理可知, 对 $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $\delta > 0$, 使得当 $x \in [0, \delta]$ 时, 有

$$2x - \varepsilon x \leq x^2 + 2x \leq 2x + \varepsilon x.$$

现在, 一方面我们有

$$\begin{aligned} \int_x^\infty e^{-y^2} dy &\stackrel{y=xu}{=} x \int_1^\infty e^{-(xu)^2} du \stackrel{t=u-1}{=} x \int_0^\infty e^{-(xt+x)^2} dt \\ &= x \int_0^\infty e^{-(xt)^2 - 2x^2 t - x^2} dt = x e^{-x^2} \int_0^\infty e^{-x^2(t^2+2t)} dt \\ &= x e^{-x^2} \left(\int_0^\delta e^{-x^2(t^2+2t)} dt + \int_\delta^\infty e^{-x^2(t^2+2t)} dt \right) \\ &\leq x e^{-x^2} \left(\int_0^\delta e^{-x^2(2t+\varepsilon t)} dt + \int_\delta^\infty e^{-x^2(t+2)} e^{-x^2 \delta} dt \right) \\ &= x e^{-x^2} \left(\frac{1 - e^{-(2+\varepsilon)x^2 \delta}}{(2+\varepsilon)x^2} + \frac{e^{-2x^2(\delta+1)}}{x^2} \right) \\ &= \frac{e^{-x^2}}{x} \left(\frac{1 - e^{-(2+\varepsilon)x^2 \delta}}{2+\varepsilon} + e^{-2x^2(\delta+1)} \right). \end{aligned}$$

于是就有

$$x e^{-x^2} \int_x^\infty e^{-y^2} dy \leq \frac{1 - e^{-(2+\varepsilon)x^2 \delta}}{2+\varepsilon} + e^{-2x^2(\delta+1)}.$$

上式两边同时令 $x \rightarrow +\infty$ 并取上极限得到

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} x e^{-x^2} \int_x^\infty e^{-y^2} dy \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \left(\frac{1 - e^{-(2+\varepsilon)x^2 \delta}}{2+\varepsilon} + e^{-2x^2(\delta+1)} \right) = \frac{1}{2+\varepsilon}.$$

再由 ε 的任意性可得 $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} x e^{-x^2} \int_x^\infty e^{-y^2} dy \leq \frac{1}{2}$.

另外一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \int_x^\infty e^{-y^2} dy &\stackrel{y=xu}{=} x \int_1^\infty e^{-(xu)^2} du \stackrel{t=u-1}{=} x \int_0^\infty e^{-(xt+x)^2} dt \\ &= x \int_0^\infty e^{-(xt)^2 - 2x^2 t - x^2} dt = x e^{-x^2} \int_0^\infty e^{-x^2(t^2+2t)} dt \\ &\geq x e^{-x^2} \int_0^\delta e^{-x^2(t^2+2t)} dt \geq x e^{-x^2} \int_0^\delta e^{-x^2(2t-\varepsilon t)} dt \\ &= x e^{-x^2} \cdot \frac{1 - e^{-(2-\varepsilon)x^2 \delta}}{(2-\varepsilon)x^2}. \end{aligned}$$

于是就有

$$xe^{x^2} \int_x^\infty e^{-y^2} dy \geq \frac{1 - e^{-(2-\varepsilon)x^2}}{(2-\varepsilon)x^2}.$$

上式两边同时令 $x \rightarrow +\infty$ 并取下极限得到

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} xe^{x^2} \int_x^\infty e^{-y^2} dy \geq \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1 - e^{-(2-\varepsilon)x^2}}{(2-\varepsilon)x^2} = \frac{1}{2-\varepsilon}.$$

再由 ε 的任意性可得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} xe^{x^2} \int_x^\infty e^{-y^2} dy \geq \frac{1}{2}$.

因此, 再结合 $\lim_{x \rightarrow +\infty} xe^{x^2} \int_x^\infty e^{-y^2} dy \leq \lim_{x \rightarrow +\infty} xe^{x^2} \int_x^\infty e^{-y^2} dy$, 我们就有

$$\frac{1}{2} \leq \lim_{x \rightarrow +\infty} xe^{x^2} \int_x^\infty e^{-y^2} dy \leq \lim_{x \rightarrow +\infty} xe^{x^2} \int_x^\infty e^{-y^2} dy \leq \frac{1}{2}.$$

故 $\lim_{x \rightarrow +\infty} xe^{x^2} \int_x^\infty e^{-y^2} dy = \frac{1}{2}$, 即 $\int_x^\infty e^{-y^2} dy = \frac{e^{-x^2}}{2x} + o\left(\frac{e^{-x^2}}{x}\right), x \rightarrow +\infty$.

因此 $\int_0^x e^{-y^2} dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2} - \int_x^\infty e^{-y^2} dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2} - \frac{e^{-x^2}}{2x} + o\left(\frac{e^{-x^2}}{x}\right), x \rightarrow +\infty$.

□

例题 2.120 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{10n} \left(1 - \left|\sin\left(\frac{x}{n}\right)\right|\right)^n dx$.

解 由 Taylor 定理可知, 对 $\forall \varepsilon \in (0, 1)$, 存在 $\delta \in (0, \frac{\pi}{4})$, 使得当 $x \in [0, \delta]$ 时, 有

$$-t - \varepsilon t \leq \ln(1 - \sin t) \leq -t + \varepsilon t.$$

此时, 我们有

$$\begin{aligned} \int_0^{10n} \left(1 - \left|\sin\left(\frac{x}{n}\right)\right|\right)^n dx &\stackrel{\text{令 } x=nt}{=} n \int_0^{10} \left(1 - |\sin t|\right)^n dt = n \int_0^{10} e^{n \ln(1-|\sin t|)} dt \\ &= n \int_0^\delta e^{n \ln(1-|\sin t|)} dt + n \int_\delta^{\pi-\delta} e^{n \ln(1-|\sin t|)} dt + n \int_{\pi-\delta}^{\pi+\delta} e^{n \ln(1-|\sin t|)} dt + n \int_{\pi+\delta}^{2\pi-\delta} e^{n \ln(1-|\sin t|)} dt \\ &\quad + n \int_{2\pi-\delta}^{2\pi+\delta} e^{n \ln(1-|\sin t|)} dt + n \int_{2\pi+\delta}^{3\pi-\delta} e^{n \ln(1-|\sin t|)} dt + n \int_{3\pi-\delta}^{3\pi+\delta} e^{n \ln(1-|\sin t|)} dt + n \int_{3\pi+\delta}^{10} e^{n \ln(1-|\sin t|)} dt \\ &= n \int_0^\delta e^{n \ln(1-\sin t)} dt + n \int_\delta^{\pi-\delta} e^{n \ln(1-\sin t)} dt + n \int_{\pi-\delta}^{\pi+\delta} e^{n \ln(1-\sin t)} dt + n \int_{\pi+\delta}^{2\pi-\delta} e^{n \ln(1+\sin t)} dt \\ &\quad + n \int_{2\pi-\delta}^{2\pi+\delta} e^{n \ln(1-\sin t)} dt + n \int_{2\pi+\delta}^{3\pi-\delta} e^{n \ln(1-\sin t)} dt + n \int_{3\pi-\delta}^{3\pi+\delta} e^{n \ln(1-\sin t)} dt + n \int_{3\pi+\delta}^{10} e^{n \ln(1-\sin t)} dt. \end{aligned} \quad (2.117)$$

由积分换元可得

$$\begin{aligned} n \int_{\pi-\delta}^\pi e^{n \ln(1-\sin t)} dt &\stackrel{\text{令 } u=\pi-t}{=} -n \int_\delta^0 e^{n \ln(1-\sin(\pi-u))} du = n \int_0^\delta e^{n \ln(1-\sin u)} du, \\ n \int_\pi^{\pi+\delta} e^{n \ln(1+\sin t)} dt &\stackrel{\text{令 } u=t-\pi}{=} n \int_0^\delta e^{n \ln(1+\sin(\pi+u))} du = n \int_0^\delta e^{n \ln(1-\sin u)} du, \\ n \int_{\pi+\delta}^{2\pi-\delta} e^{n \ln(1+\sin t)} dt &\stackrel{\text{令 } u=t-\pi}{=} \int_\delta^{\pi-\delta} e^{n \ln(1+\sin(\pi+u))} du = \int_\delta^{\pi-\delta} e^{n \ln(1-\sin u)} du, \\ n \int_{2\pi+\delta}^{3\pi-\delta} e^{n \ln(1-\sin t)} dt &\stackrel{\text{令 } u=t-2\pi}{=} \int_\delta^{\pi-\delta} e^{n \ln(1-\sin(2\pi+u))} du = \int_\delta^{\pi-\delta} e^{n \ln(1+\sin u)} du. \end{aligned}$$

从而

$$n \int_{\pi-\delta}^{\pi+\delta} e^{n \ln(1-|\sin t|)} dt = n \int_{\pi-\delta}^\pi e^{n \ln(1-\sin t)} dt + n \int_\pi^{\pi+\delta} e^{n \ln(1-\sin t)} dt = 2n \int_0^\delta e^{n \ln(1+\sin t)} dt.$$

同理

$$n \int_{2\pi-\delta}^{2\pi+\delta} e^{n \ln(1-|\sin t|)} dt = n \int_{3\pi-\delta}^{3\pi+\delta} e^{n \ln(1-|\sin t|)} dt = 2n \int_0^\delta e^{n \ln(1-\sin t)} dt.$$

于是原积分(2.117)式可化为

$$\int_0^{10n} (1 - |\sin(\frac{x}{n})|)^n dx = 7n \int_0^\delta e^{n \ln(1 - \sin t)} dt + 3 \int_\delta^{\pi - \delta} e^{n \ln(1 - \sin t)} dt + n \int_{3\pi + \delta}^{10} e^{n \ln(1 + \sin t)} dt.$$

进而, 一方面我们有

$$\begin{aligned} \int_0^{10n} (1 - |\sin(\frac{x}{n})|)^n dx &= 7n \int_0^\delta e^{n \ln(1 - \sin t)} dt + 3n \int_\delta^{\pi - \delta} e^{n \ln(1 - \sin t)} dt + n \int_{3\pi + \delta}^{10} e^{n \ln(1 + \sin t)} dt \\ &= 7n \int_0^\delta e^{n(-t + \varepsilon t)} dt + 3n \int_\delta^{\pi - \delta} e^{n \ln(1 - \sin \delta)} dt + n \int_\delta^{10 - 3\pi} e^{n \ln(1 - \sin t)} dt \\ &\leq 7n \int_0^\delta e^{n(-t + \varepsilon t)} dt + 4n \int_\delta^{\pi - \delta} e^{n \ln(1 - \sin \delta)} dt \\ &= 7 \cdot \frac{e^{(\varepsilon-1)n\delta} - 1}{\varepsilon - 1} + 4n e^{n \ln(1 + \sin \delta)} (\pi - 2\delta). \end{aligned}$$

上式两边同时令 $n \rightarrow \infty$ 并取上极限得到

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_0^{10n} (1 - |\sin(\frac{x}{n})|)^n dx \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left[7 \cdot \frac{e^{(\varepsilon-1)n\delta} - 1}{\varepsilon - 1} + 4n e^{n \ln(1 + \sin \delta)} (\pi - 2\delta) \right] = \frac{7}{1 - \varepsilon}.$$

再由 ε 的任意性可得 $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_0^{10n} (1 - |\sin(\frac{x}{n})|)^n dx \leq 7$.

另外一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \int_0^{10n} (1 - |\sin(\frac{x}{n})|)^n dx &= 7n \int_0^\delta e^{n \ln(1 - \sin t)} dt + 3 \int_\delta^{\pi - \delta} e^{n \ln(1 - \sin t)} dt \\ &\geq 7n \int_0^\delta e^{n \ln(1 - \sin t)} dt \geq 7n \int_0^\delta e^{n(-t - \varepsilon t)} dt \\ &= 7 \cdot \frac{1 - e^{-(\varepsilon+1)n\delta}}{\varepsilon + 1} \end{aligned}$$

上式两边同时令 $n \rightarrow \infty$ 并取下极限得到

$$\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_0^{10n} (1 - |\sin(\frac{x}{n})|)^n dx \geq \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} 7 \cdot \frac{1 - e^{-(\varepsilon+1)n\delta}}{\varepsilon + 1} = \frac{7}{\varepsilon + 1}.$$

再由 ε 的任意性可得 $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_0^{10n} (1 - |\sin(\frac{x}{n})|)^n dx \geq \frac{7}{\varepsilon + 1}$.

因此, 再结合 $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_0^{10n} (1 - |\sin(\frac{x}{n})|)^n dx \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_0^{10n} (1 - |\sin(\frac{x}{n})|)^n dx$, 我们就有

$$7 \leq \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_0^{10n} (1 - |\sin(\frac{x}{n})|)^n dx \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_0^{10n} (1 - |\sin(\frac{x}{n})|)^n dx \leq 7.$$

故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{10n} (1 - |\sin(\frac{x}{n})|)^n dx = 7$.

□

例题 2.121 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^1 \left(1 - \frac{x}{2}\right)^n \left(1 - \frac{x}{4}\right)^n dx}{\int_0^1 \left(1 - \frac{x}{2}\right)^n dx}$.

证明 首先注意到

$$\int_0^1 \left(1 - \frac{x}{2}\right)^n dx = \frac{2}{n+1} \left(1 - \frac{x}{2}\right)^{n+1} \Big|_0^1 = \frac{2}{n+1} \left(1 - \frac{1}{2^{n+1}}\right). \quad (2.118)$$

接着, 由 Taylor 定理可知

$$\ln \left(1 - \frac{3}{4}x + \frac{x^2}{8}\right) = -\frac{3}{4}x + o(x).$$

从而对 $\forall \varepsilon \in \left(0, \frac{1}{4}\right)$, 都存在 $\delta \in (0, 1)$, 使得

$$-\frac{3}{4}x - \varepsilon x \leq \ln \left(1 - \frac{3}{4}x + \frac{x^2}{8}\right) \leq -\frac{3}{4}x + \varepsilon x, \forall x \in [-\delta, \delta].$$

于是一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \int_0^1 \left(1 - \frac{x}{2}\right)^n \left(1 - \frac{x}{4}\right)^n dx &= \int_0^1 e^{n \ln\left(1 - \frac{3}{4}x + \frac{x^2}{8}\right)} dx = \int_0^\delta e^{n \ln\left(1 - \frac{3}{4}x + \frac{x^2}{8}\right)} dx + \int_\delta^1 e^{n \ln\left(1 - \frac{3}{4}x + \frac{x^2}{8}\right)} dx \\ &\leq \int_0^\delta e^{n(-\frac{3}{4}x + \varepsilon x)} dx + \int_\delta^1 e^{n(-\frac{3}{4}x + \varepsilon x)} dx \leq \frac{1}{n} \int_0^{n\delta} e^{(-\frac{3}{4} + \varepsilon)x} dx + \int_\delta^1 e^{n(-\frac{3}{4} + \varepsilon)\delta} dx \\ &\leq \frac{1}{n} \int_0^\infty e^{(-\frac{3}{4} + \varepsilon)x} dx + e^{n(-\frac{3}{4} + \varepsilon)\delta} (1 - \delta) = -\frac{1}{(-\frac{3}{4} + \varepsilon)n} + e^{n(-\frac{3}{4} + \varepsilon)\delta} (1 - \delta). \end{aligned}$$

另一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \int_0^1 \left(1 - \frac{x}{2}\right)^n \left(1 - \frac{x}{4}\right)^n dx &= \int_0^\delta e^{n \ln\left(1 - \frac{3}{4}x + \frac{x^2}{8}\right)} dx + \int_\delta^1 e^{n \ln\left(1 - \frac{3}{4}x + \frac{x^2}{8}\right)} dx \\ &\geq \int_0^\delta e^{n(-\frac{3}{4}x - \varepsilon x)} dx + \int_\delta^1 e^{n(-\frac{3}{4}x - \varepsilon x)} dx \geq \frac{1}{n} \int_0^{n\delta} e^{(-\frac{3}{4} - \varepsilon)x} dx + \int_\delta^1 e^{n(-\frac{3}{4} - \varepsilon)x} dx \\ &= \frac{e^{(-\frac{3}{4} - \varepsilon)n\delta} - 1}{(-\frac{3}{4} - \varepsilon)n} + e^{n(-\frac{3}{4} - \varepsilon)} (1 - \delta). \end{aligned}$$

因此

$$\frac{e^{(-\frac{3}{4} - \varepsilon)n\delta} - 1}{(-\frac{3}{4} - \varepsilon)} + ne^{n(-\frac{3}{4} - \varepsilon)} (1 - \delta) \leq n \int_0^1 \left(1 - \frac{x}{2}\right)^n \left(1 - \frac{x}{4}\right)^n dx \leq -\frac{1}{-\frac{3}{4} + \varepsilon} + ne^{n(-\frac{3}{4} + \varepsilon)\delta} (1 - \delta).$$

上式两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 得

$$-\frac{1}{-\frac{3}{4} - \varepsilon} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 \left(1 - \frac{x}{2}\right)^n \left(1 - \frac{x}{4}\right)^n dx \leq \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 \left(1 - \frac{x}{2}\right)^n \left(1 - \frac{x}{4}\right)^n dx \leq -\frac{1}{-\frac{3}{4} + \varepsilon}.$$

再令 $\varepsilon \rightarrow 0^+$, 得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 \left(1 - \frac{x}{2}\right)^n \left(1 - \frac{x}{4}\right)^n dx = \frac{4}{3}.$$

故 $\int_0^1 \left(1 - \frac{x}{2}\right)^n \left(1 - \frac{x}{4}\right)^n dx = \frac{4}{3n} + o\left(\frac{1}{n}\right)$. 于是再结合(2.118)式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^1 \left(1 - \frac{x}{2}\right)^n \left(1 - \frac{x}{4}\right)^n dx}{\int_0^1 \left(1 - \frac{x}{2}\right)^n dx} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{4}{3n} + o\left(\frac{1}{n}\right)}{\frac{2}{n+1} \left(1 - \frac{1}{2^{n+1}}\right)} = \frac{2}{3}.$$

□

例题 2.122 证明极限 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^1 \ln^n(1+x)x^{-n} dx}{\int_0^1 \frac{\sin^n x}{x^{n-1}} dx}$ 存在并求其值.

笔记 原式可写成 $\frac{\int_0^1 \left[\frac{\ln(1+x)}{x}\right]^n dx}{\int_0^1 x \left(\frac{\sin x}{x}\right)^n dx}$, 求导可知 $\frac{\sin x}{x}$ 和 $\frac{\ln(1+x)}{x}$ 在 $(0, 1]$ 上单调递增, 故原式分子和分母的阶都集中在 $x = 0$ 处. 因为分母积分的被积函数除指数部分外, x 在 0 处取值也为 0 , 所以我们在估阶的时候需要将 x 也考虑进去. 利用 Laplace 方法估计分子、分母的阶, 但是此时 $\frac{\sin x}{x}$ 和 $\frac{\ln(1+x)}{x}$ 在极值点 $x = 0$ 处间断, 故我们需要先对 $\frac{\sin x}{x}$ 和 $\frac{\ln(1+x)}{x}$ 补充定义, 使相关函数光滑, 才能进行 Taylor 展开.

证明 由 Taylor 公式可知

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{\sin x}{x}\right) &= \ln \frac{x - \frac{1}{6}x^3 + o(x^3)}{x} = \ln\left(1 - \frac{x^2}{6} + o(x^2)\right) = -\frac{x^2}{6} + o(x^2), \\ \ln\left(\frac{\ln(1+x)}{x}\right) &= \ln \frac{x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + o(x^3)}{x} = \ln\left(1 - \frac{x}{2} + \frac{x^2}{3} + o(x^2)\right) = -\frac{x}{2} + \frac{x^2}{3} + o(x^2). \end{aligned}$$

从而对 $\forall \varepsilon \in \left(0, \frac{1}{6}\right)$, 都存在 $\delta \in (0, 1)$, 使得

$$-\frac{x^2}{6} - \varepsilon x^2 \leq \ln\left(\frac{\sin x}{x}\right) \leq -\frac{x^2}{6} + \varepsilon x^2, \forall x \in [-\delta, \delta],$$

$$-\frac{x}{2} - \varepsilon x \leq \ln\left(\frac{\ln(1+x)}{x}\right) \leq -\frac{x}{2} + \varepsilon x, \forall x \in [-\delta, \delta].$$

于是一方面, 我们有

$$\begin{aligned}
\int_0^1 x \left(\frac{\sin x}{x} \right)^n dx &= \int_0^1 x e^{n \ln \left(\frac{\sin x}{x} \right)} dx = \int_0^\delta x e^{n \ln \left(\frac{\sin x}{x} \right)} dx + \int_\delta^1 x \left(\frac{\sin x}{x} \right)^n dx \\
&\leq \int_0^\delta x e^{n \left(-\frac{x^2}{6} + \varepsilon x^2 \right)} dx + \sin^n 1 \int_\delta^1 \frac{1}{x^{n-1}} dx \leq \frac{1}{n} \int_0^{\sqrt{n}\delta} x e^{(-\frac{1}{6} + \varepsilon)x^2} dx + \sin^n 1 \left(\frac{n}{\delta^n} - 1 \right) \\
&\leq \frac{1}{n} \int_0^\infty x e^{(-\frac{1}{6} + \varepsilon)x^2} dx + \sin^n 1 \left(\frac{n}{\delta^n} - 1 \right) = -\frac{1}{2(-\frac{1}{6} + \varepsilon)n} + \sin^n 1 \left(\frac{n}{\delta^n} - 1 \right). \\
\int_0^1 \left[\frac{\ln(1+x)}{x} \right]^n dx &= \int_0^1 e^{n \ln \left(\frac{\ln(1+x)}{x} \right)} dx = \int_0^\delta e^{n \ln \left(\frac{\ln(1+x)}{x} \right)} dx + \int_\delta^1 \left[\frac{\ln(1+x)}{x} \right]^n dx \\
&\leq \int_0^\delta e^{n \left(-\frac{x}{2} + \varepsilon x \right)} dx + (\ln 2)^n \int_\delta^1 \frac{1}{x^n} dx \leq \frac{1}{n} \int_0^{n\delta} e^{(-\frac{1}{2} + \varepsilon)x} dx + (\ln 2)^n \left(\frac{n+1}{\delta^{n+1}} - 1 \right) \\
&\leq \frac{1}{n} \int_0^\infty e^{(-\frac{1}{2} + \varepsilon)x} dx + (\ln 2)^n \left(\frac{n+1}{\delta^{n+1}} - 1 \right) = -\frac{1}{(-\frac{1}{2} + \varepsilon)n} + (\ln 2)^n \left(\frac{n+1}{\delta^{n+1}} - 1 \right).
\end{aligned}$$

另一方面, 我们有

$$\begin{aligned}
\int_0^1 x \left(\frac{\sin x}{x} \right)^n dx &= \int_0^1 x e^{n \ln \left(\frac{\sin x}{x} \right)} dx \geq \int_0^\delta x e^{n \ln \left(\frac{\sin x}{x} \right)} dx \\
&\geq \int_0^\delta x e^{n \left(-\frac{x^2}{6} - \varepsilon x^2 \right)} dx \geq \frac{1}{n} \int_0^{\sqrt{n}\delta} x e^{(-\frac{1}{6} - \varepsilon)x^2} dx \\
&\geq \frac{1}{n} \int_0^\infty x e^{(-\frac{1}{6} - \varepsilon)x^2} dx = -\frac{1}{2(-\frac{1}{6} - \varepsilon)n}. \\
\int_0^1 \left[\frac{\ln(1+x)}{x} \right]^n dx &= \int_0^1 e^{n \ln \left(\frac{\ln(1+x)}{x} \right)} dx \geq \int_0^\delta e^{n \ln \left(\frac{\ln(1+x)}{x} \right)} dx \\
&\geq \int_0^\delta e^{n \left(-\frac{x}{2} - \varepsilon x \right)} dx \geq \frac{1}{n} \int_0^{n\delta} e^{(-\frac{1}{2} - \varepsilon)x} dx \\
&\geq \frac{1}{n} \int_0^\infty e^{(-\frac{1}{2} - \varepsilon)x} dx = -\frac{1}{(-\frac{1}{2} - \varepsilon)n}.
\end{aligned}$$

因此, 我们就有

$$\begin{aligned}
-\frac{1}{2(-\frac{1}{6} - \varepsilon)} &\leq n \int_0^1 x \left(\frac{\sin x}{x} \right)^n dx \leq -\frac{1}{2(-\frac{1}{6} + \varepsilon)} + \sin^n 1 \left(\frac{n}{\delta^n} - 1 \right), \\
\frac{1}{\frac{1}{2} + \varepsilon} &\leq n \int_0^1 \left[\frac{\ln(1+x)}{x} \right]^n dx \leq -\frac{1}{-\frac{1}{2} + \varepsilon} + (\ln 2)^n \left(\frac{n+1}{\delta^{n+1}} - 1 \right).
\end{aligned}$$

令 $n \rightarrow \infty$, 得

$$\begin{aligned}
-\frac{1}{2(-\frac{1}{6} - \varepsilon)} &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 x \left(\frac{\sin x}{x} \right)^n dx \leq \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 x \left(\frac{\sin x}{x} \right)^n dx \leq -\frac{1}{2(-\frac{1}{6} + \varepsilon)} \\
\frac{1}{\frac{1}{2} + \varepsilon} &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 \left[\frac{\ln(1+x)}{x} \right]^n dx \leq \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 \left[\frac{\ln(1+x)}{x} \right]^n dx \leq -\frac{1}{-\frac{1}{2} + \varepsilon}
\end{aligned}$$

再令 $\varepsilon \rightarrow 0^+$, 得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 x \left(\frac{\sin x}{x} \right)^n dx = \frac{1}{3}, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 \left[\frac{\ln(1+x)}{x} \right]^n dx = 2.$$

故

$$\int_0^1 x \left(\frac{\sin x}{x} \right)^n dx = \frac{1}{3n} + o \left(\frac{1}{n} \right), \quad \int_0^1 \left[\frac{\ln(1+x)}{x} \right]^n dx = \frac{2}{n} + o \left(\frac{1}{n} \right).$$

进而

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^1 \ln^n (1+x) x^{-n} dx}{\int_0^1 \frac{\sin^n x}{x^{n-1}} dx} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^1 \left[\frac{\ln(1+x)}{x} \right]^n dx}{\int_0^1 x \left(\frac{\sin x}{x} \right)^n dx} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{2}{n} + o \left(\frac{1}{n} \right)}{\frac{1}{3n} + o \left(\frac{1}{n} \right)} = \frac{2}{3}.$$

□

例题 2.123 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^1 (1-x^2+x^3)^n \ln(x+2) dx}{\int_0^1 (1-x^2+x^3)^n dx}$.

笔记 我们首先可以求解出被积函数带 n 次幂部分的最大值点即 $1-x^2+x^3$ 的最大值点为 $x=0, 1$. 于是被积函数的阶一定集中在这两个最大值点附近.

注 注意由 $\ln(1-x^2+x^3) = x-1+o(x-1), x \rightarrow 1$. 得到的是 $\ln(1-x^2+x^3) = x-1+o(x-1), x \rightarrow 1$. 而不是.

证明 由 Taylor 定理可知,

$$\ln(1-x^2+x^3) = -x^2+o(x^2), x \rightarrow 0;$$

$$\ln(1-x^2+x^3) = x-1+o(x-1), x \rightarrow 1.$$

从而对 $\forall \varepsilon \in (0, \frac{1}{2})$, 存在 $\delta_1 \in (0, \frac{1}{10})$, 使得

$$-x^2-\varepsilon x^2 \leq \ln(1-x^2+x^3) \leq -x^2+\varepsilon x^2, \forall x \in (0, \delta_1);$$

$$x-1-\varepsilon(x-1) \leq \ln(1-x^2+x^3) \leq x-1+\varepsilon(x-1), \forall x \in (1-\delta_1, 1).$$

设 $f \in C[0, 1]$ 且 $f(0), f(1) > 0$, 则由连续函数最大值、最小值定理可知, f 在闭区间 $[0, \frac{1}{2}]$ 和 $[\frac{1}{2}, 1]$ 上都存在最大值和最小值. 设 $M_1 = \sup_{x \in [0, \frac{1}{2}]} f(x), M_2 = \sup_{x \in [\frac{1}{2}, 1]} f(x)$. 又由连续性可知, 对上述 ε , 存在 $\delta_2 > 0$, 使得

$$f(0)-\varepsilon < f(x) < f(0)+\varepsilon, \forall x \in [0, \delta_2];$$

$$f(1)-\varepsilon < f(x) < f(1)+\varepsilon, \forall x \in [1-\delta_2, 1].$$

取 $\delta = \min\{\delta_1, \delta_2\}$, 则一方面我们有

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx &= \int_0^{\delta} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx + \int_{\delta}^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx \\ &= \int_0^{\delta} e^{n \ln(1-x^2+x^3)} f(x) dx + \int_{\delta}^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx \\ &\leq (f(0)+\varepsilon) \int_0^{\delta} e^{n(-x^2+\varepsilon x^2)} dx + \int_{\delta}^{\frac{1}{2}} M_1 \left(\frac{7}{8}-\delta^2\right)^n dx \\ &= \frac{f(0)+\varepsilon}{\sqrt{n(1-\varepsilon)}} \int_0^{\delta \sqrt{n(1-\varepsilon)}} e^{-y^2} dy + M_1 \left(\frac{7}{8}-\delta^2\right)^n \left(\frac{1}{2}-\delta\right), \end{aligned}$$

又易知 $1-x^2+x^3$ 在 $[0, \frac{2}{3}]$ 上单调递减, 在 $(\frac{2}{3}, 1]$ 上单调递增. 再结合 $\delta < \frac{1}{10}$ 可知, $1-(\frac{1}{2})^2+(\frac{1}{2})^3 < 1-(\frac{1}{10})^2+(\frac{1}{10})^3 < 1-(1-\delta)^2+(1-\delta)^3$. 从而当 $x \in (\frac{1}{2}, 1-\delta)$ 时, 我们就有 $1-x^2+x^3 < 1-(1-\delta)^2+(1-\delta)^3 < 1$. 进而可得

$$\begin{aligned} \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx &= \int_{\frac{1}{2}}^{1-\delta} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx + \int_{1-\delta}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx \\ &= \int_{\frac{1}{2}}^{1-\delta} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx + \int_{1-\delta}^1 e^{n \ln(1-x^2+x^3)} f(x) dx \\ &\leq \int_{\frac{1}{2}}^{1-\delta} M_2 \left(1-(1-\delta)^2+(1-\delta)^3\right)^n dx + (f(1)+\varepsilon) \int_{1-\delta}^1 e^{n[x-1+\varepsilon(x-1)]} dx \\ &= M_2 \left(1-(1-\delta)^2+(1-\delta)^3\right)^n \left(\frac{1}{2}-\delta\right) + \frac{f(1)+\varepsilon}{n(1+\varepsilon)} \left(1-e^{-n\delta(1+\varepsilon)}\right). \end{aligned}$$

于是就有

$$\sqrt{n} \int_0^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx \leq \frac{f(0)+\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon}} \int_0^{\delta \sqrt{n(1-\varepsilon)}} e^{-y^2} dy + \sqrt{n} M_1 \left(\frac{7}{8}-\delta^2\right)^n \left(\frac{1}{2}-\delta\right),$$

$$n \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx \leq n M_2 \left(\frac{3}{4}+(1-\delta)^3\right)^n \left(\frac{1}{2}-\delta\right) + \frac{f(1)+\varepsilon}{1+\varepsilon} \left(1-e^{-n\delta(1+\varepsilon)}\right).$$

上式两边同时令 $n \rightarrow \infty$ 并取上极限得到

$$\begin{aligned}\varlimsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \int_0^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx &\leq \frac{f(0)+\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon}} \int_0^{\infty} e^{-y^2} dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{1-\varepsilon}} (f(0)+\varepsilon), \\ \varlimsup_{n \rightarrow \infty} n \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx &\leq \frac{f(1)+\varepsilon}{1+\varepsilon}.\end{aligned}$$

再由 ε 的任意性可得 $\varlimsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \int_0^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx \leq \frac{\sqrt{\pi}}{2} f(0)$, $\varlimsup_{n \rightarrow \infty} n \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx \leq f(1)$.

另外一方面, 我们有

$$\begin{aligned}\int_0^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx &\geq \int_0^{\delta} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx = \int_0^{\delta} e^{n \ln(1-x^2+x^3)} f(x) dx \\ &\geq (f(0)-\varepsilon) \int_0^{\delta} e^{n(-x^2-\varepsilon x^2)} dx = \frac{f(0)-\varepsilon}{\sqrt{n(1+\varepsilon)}} \int_0^{\delta \sqrt{n(1+\varepsilon)}} e^{-y^2} dy, \\ \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx &\geq \int_{1-\delta}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx = \int_{1-\delta}^1 e^{n \ln(1-x^2+x^3)} f(x) dx \\ &\geq (f(1)-\varepsilon) \int_{1-\delta}^1 e^{n[x-1-\varepsilon(x-1)]} dx = \frac{f(1)-\varepsilon}{n(1+\varepsilon)} (1-e^{-n\delta(1-\varepsilon)}).\end{aligned}$$

于是就有

$$\begin{aligned}\sqrt{n} \int_0^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx &\geq \frac{f(0)-\varepsilon}{\sqrt{1+\varepsilon}} \int_0^{\delta \sqrt{n(1+\varepsilon)}} e^{-y^2} dy, \\ n \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx &\geq \frac{f(1)-\varepsilon}{1+\varepsilon} (1-e^{-n\delta(1-\varepsilon)}).\end{aligned}$$

上式两边同时令 $n \rightarrow \infty$ 并取下极限得到

$$\begin{aligned}\varliminf_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \int_0^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx &\geq \frac{f(0)-\varepsilon}{\sqrt{1+\varepsilon}} \int_0^{\infty} e^{-y^2} dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{1+\varepsilon}} (f(0)-\varepsilon), \\ \varliminf_{n \rightarrow \infty} n \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx &\geq \frac{f(1)-\varepsilon}{1+\varepsilon}.\end{aligned}$$

再由 ε 的任意性可得 $\varliminf_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \int_0^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx \geq \frac{\sqrt{\pi}}{2} f(0)$, $\varliminf_{n \rightarrow \infty} n \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx \geq f(1)$.

因此, 我们就有

$$\begin{aligned}\frac{\sqrt{\pi}}{2} f(0) &\leq \varliminf_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \int_0^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx \leq \varlimsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \int_0^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx \leq \frac{\sqrt{\pi}}{2} f(0), \\ f(1) &\leq \varliminf_{n \rightarrow \infty} n \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx \leq \varlimsup_{n \rightarrow \infty} n \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx \leq f(1).\end{aligned}$$

故 $\varliminf_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \int_0^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} f(0)$, $\varliminf_{n \rightarrow \infty} n \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx = f(1)$. 从而

$$\begin{aligned}\int_0^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx &= \frac{f(0)\sqrt{\pi}}{2\sqrt{n}} + o\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right), n \rightarrow \infty; \\ \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx &= \frac{f(1)}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right), n \rightarrow \infty.\end{aligned}$$

故 $\int_0^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx = \int_0^{\frac{1}{2}} (1-x^2+x^3)^n f(x) dx + \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2+x^3)^n f(x) dx = \frac{f(0)\sqrt{\pi}}{2\sqrt{n}} + \frac{f(1)}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right), n \rightarrow \infty$.

从而当 $f \equiv 1$ 时, 上式等价于 $\int_0^1 (1-x^2+x^3)^n dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{n}} + \frac{1}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right), n \rightarrow \infty$; 当 $f(x) = \ln(x+2)$ 时, 上式等价于

$$\int_0^1 (1-x^2+x^3)^n \ln(x+2) dx = \frac{\sqrt{\pi} \ln 2}{2\sqrt{n}} + \frac{\ln 3}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right), n \rightarrow \infty. \text{ 于是}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^1 (1-x^2+x^3)^n \ln(x+2) dx}{\int_0^1 (1-x^2+x^3)^n dx} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{\sqrt{\pi} \ln 2}{2\sqrt{n}} + \frac{\ln 3}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right)}{\frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{n}} + \frac{1}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right)} = \ln 2.$$

□

例题 2.124 设 $f \in R[0, 1]$ 且 f 在 $x=1$ 连续, 证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 f(x) x^n dx = f(1).$$

笔记 这种运用 Laplace 方法估阶的题目, 也可以用拟合法进行证明.

证明 由于 $f \in R[0, 1]$, 因此存在 $M > 0$, 使得 $|f(x)| \leq M, \forall x \in [0, 1]$. 于是对 $\forall n \in \mathbb{N}, \forall \delta \in (0, 1)$, 有

$$\begin{aligned} & \left| n \int_0^1 f(x) x^n dx - n \int_0^1 f(1) x^n dx \right| = \left| n \int_0^1 [f(x) - f(1)] x^n dx \right| \\ & \leq n \int_0^1 |[f(x) - f(1)] x^n| dx = n \int_0^\delta |f(x) - f(1)| x^n dx + n \int_\delta^1 |f(x) - f(1)| x^n dx \\ & \leq n \int_0^\delta |M + f(1)| \delta^n dx + n \sup_{x \in [\delta, 1]} |f(x) - f(1)| \int_\delta^1 x^n dx \\ & \leq n |M + f(1)| \delta^{n+1} + n \sup_{x \in [\delta, 1]} |f(x) - f(1)| \int_0^1 x^n dx \\ & = n |M + f(1)| \delta^{n+1} + \frac{n}{n+1} \sup_{x \in [\delta, 1]} |f(x) - f(1)|. \end{aligned}$$

上式两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 并取上极限可得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| n \int_0^1 f(x) x^n dx - n \int_0^1 f(1) x^n dx \right| \leq \sup_{x \in [\delta, 1]} |f(x) - f(1)|, \quad \forall \delta \in (0, 1).$$

再根据 δ 的任意性, 令 $\delta \rightarrow 1^-$ 可得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| n \int_0^1 f(x) x^n dx - n \int_0^1 f(1) x^n dx \right| \leq \lim_{\delta \rightarrow 1^-} \sup_{x \in [\delta, 1]} |f(x) - f(1)| = \overline{\lim}_{\delta \rightarrow 1^-} |f(x) - f(1)|.$$

又因为 f 在 $x=1$ 处连续, 所以 $\overline{\lim}_{\delta \rightarrow 1^-} |f(x) - f(1)| = 0$. 故

$$0 \leq \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| n \int_0^1 f(x) x^n dx - n \int_0^1 f(1) x^n dx \right| \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| n \int_0^1 f(x) x^n dx - n \int_0^1 f(1) x^n dx \right| \leq 0.$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 f(x) x^n dx = \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 f(1) x^n dx = f(1) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+1} = f(1)$.

□

例题 2.125 f 是 $[0, 1]$ 上 Riemann 可积的函数, 且在 $x=1$ 处存在导数, $f(1)=0, f'(1)=-1$, 证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \int_0^1 x^n f(x) dx = 1.$$

笔记 本题也可以类似例题 2.124 用拟合法进行证明.

证明 由 Taylor 定理可知, 存在 $\delta \in (0, 1)$, 对 $\forall x \in [\delta, 1]$, 存在 $\theta \in (x, 1)$, 使得

$$f(x) = f'(1)(x-1) + \frac{f''(\theta)}{2}(x-1)^2 = 1-x + \frac{f''(\theta)}{2}(x-1)^2.$$

记 $M \triangleq \sup_{[0, 1]} f, m \triangleq \inf_{[0, 1]} f$, 则一方面, 我们有

$$\begin{aligned} n^2 \int_0^1 x^n f(x) dx &= n^2 \int_0^\delta x^n f(x) dx + n^2 \int_\delta^1 x^n f(x) dx \leq M n^2 \delta^n + n^2 \int_\delta^1 x^n \left[1-x + \frac{f''(\theta)}{2}(x-1)^2 \right] dx \\ &\leq M n^2 \delta^n + n^2 \int_0^1 \left[x^n - x^{n+1} + \frac{f''(\theta)}{2}(x^{n+2} - 2x^{n+1} + x^n) \right] dx \end{aligned}$$

$$= Mn^2\delta^n + \frac{n^2}{(n+1)(n+2)} + \frac{n^2 f''(\theta)}{(n+1)(n+2)(n+3)}.$$

令 $n \rightarrow \infty$ 得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} n^2 \int_0^1 x^n f(x) dx \leq 1.$$

另一方面, 我们有

$$\begin{aligned} n^2 \int_0^1 x^n f(x) dx &= n^2 \int_0^\delta x^n f(x) dx + n^2 \int_\delta^1 x^n f(x) dx \geq mn^2 \int_0^\delta x^n dx + n^2 \int_\delta^1 x^n \left[1 - x + \frac{f''(\theta)}{2}(x-1)^2 \right] dx \\ &= \frac{mn^2}{n+1} \delta^{n+1} + \frac{n^2}{(n+1)(n+2)} - n^2 \left(\frac{\delta^{n+1}}{n+1} - \frac{\delta^{n+2}}{n+2} \right) + \frac{n^2 f''(\theta)}{(n+1)(n+2)(n+3)} - n^2 \left(\frac{\delta^{n+3}}{n+3} - \frac{2\delta^{n+2}}{n+2} + \frac{\delta^{n+1}}{n+1} \right). \end{aligned}$$

令 $n \rightarrow \infty$ 得

$$\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} n^2 \int_0^1 x^n f(x) dx \geq 1.$$

故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \int_0^1 x^n f(x) dx = 1.$$

□

例题 2.126 Possion 核 设 $f \in R[0, 1]$ 且 f 在 $x = 0$ 连续, 证明

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} f(x) dx = \frac{\pi}{2} f(0).$$

证明 因为 $f \in R[0, 1]$, 所以存在 $M > 0$, 使得 $|f(x)| \leq M, \forall x \in [0, 1]$. 于是对 $\forall \delta \in (0, 1)$, 固定 δ , 再对 $\forall t > 0$, 我们有

$$\begin{aligned} &\left| \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} f(x) dx - \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} f(0) dx \right| \leq \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} |f(x) - f(0)| dx \\ &= \int_0^\delta \frac{t}{x^2 + t^2} |f(x) - f(0)| dx + \int_\delta^1 \frac{t}{x^2 + t^2} |f(x) - f(0)| dx \\ &\leq \sup_{x \in [0, \delta]} |f(x) - f(0)| \int_0^\delta \frac{t}{x^2 + t^2} dx + \int_0^1 \frac{t}{\delta^2 + t^2} |M + f(0)| dx \\ &= \sup_{x \in [0, \delta]} |f(x) - f(0)| \arctan \frac{x}{t} \Big|_0^\delta + \frac{t}{\delta^2 + t^2} |M + f(0)| \\ &= \sup_{x \in [0, \delta]} |f(x) - f(0)| \cdot \arctan \frac{\delta}{t} + \frac{t}{\delta^2 + t^2} |M + f(0)|. \end{aligned}$$

上式两边同时令 $t \rightarrow 0^+$ 并取上极限, 可得

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow 0^+} \left| \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} f(x) dx - \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} f(0) dx \right| \leq \frac{\pi}{2} \sup_{x \in [0, \delta]} |f(x) - f(0)|, \forall \delta \in (0, 1).$$

再根据 δ 的任意性, 令 $\delta \rightarrow 0^+$ 可得

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow 0^+} \left| \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} f(x) dx - \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} f(0) dx \right| \leq \frac{\pi}{2} \lim_{\delta \rightarrow 0^+} \sup_{x \in [0, \delta]} |f(x) - f(0)| = \frac{\pi}{2} \overline{\lim}_{x \rightarrow 0^+} |f(x) - f(0)|.$$

又由于 f 在 $x = 0$ 处连续, 从而 $\overline{\lim}_{x \rightarrow 0^+} |f(x) - f(0)| = 0$. 故

$$0 \leq \underline{\lim}_{t \rightarrow 0^+} \left| \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} f(x) dx - \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} f(0) dx \right| \leq \overline{\lim}_{t \rightarrow 0^+} \left| \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} f(x) dx - \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} f(0) dx \right| \leq 0.$$

因此 $\lim_{t \rightarrow 0^+} \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} f(x) dx = \lim_{t \rightarrow 0^+} \int_0^1 \frac{t}{x^2 + t^2} f(0) dx = f(0) \lim_{t \rightarrow 0^+} \arctan \frac{1}{t} = \frac{\pi}{2} f(0)$.

□

例题 2.127 Fejer 核 设 f 在 $x = 0$ 连续且在 $[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$ 可积, 则

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} f(x) dx = f(0).$$

证明 因为 $f \in R\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$, 所以存在 $M > 0$, 使得 $|f(x)| \leq M, \forall x \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$. 又因为 $\sin x \sim x, x \rightarrow 0$, 所以对 $\forall \varepsilon \in (0, 1)$, 存在 $\delta_0 > 0$, 使得当 $|x| \leq \delta_0$ 时, 有 $\sin x \geq (1 - \varepsilon)x$. 于是对 $\forall \delta \in (0, \min\left\{\frac{1}{2}, \delta_0\right\})$, 我们有

$$\begin{aligned} & \left| \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} [f(x) - f(0)] dx \right| \leq \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} |f(x) - f(0)| dx \\ &= \int_{|x| \leq \delta} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} |f(x) - f(0)| dx + \int_{\delta \leq |x| \leq \frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} |f(x) - f(0)| dx \\ &\leq \sup_{|x| \leq \delta} |f(x) - f(0)| \int_{|x| \leq \delta} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} dx + \int_{\delta \leq |x| \leq \frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{1}{\sin^2(\pi \delta)} |M + f(0)| dx \\ &\leq \frac{\sup_{|x| \leq \delta} |f(x) - f(0)|}{1 - \varepsilon} \int_{|x| \leq \delta} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{(\pi x)^2} dx + \frac{1}{N} \int_{\delta \leq |x| \leq \frac{1}{2}} \frac{|M + f(0)|}{\sin^2(\pi \delta)} dx \\ &\stackrel{\text{令 } y = Nx}{=} \frac{\sup_{|x| \leq \delta} |f(x) - f(0)|}{1 - \varepsilon} \int_{|y| \leq N\delta} \frac{\sin^2(\pi y)}{(\pi y)^2} dy + \frac{1}{N} \int_{\delta \leq |x| \leq \frac{1}{2}} \frac{|M + f(0)|}{\sin^2(\pi \delta)} dx \\ &\leq \frac{\sup_{|x| \leq \delta} |f(x) - f(0)|}{1 - \varepsilon} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2(\pi y)}{(\pi y)^2} dy + \frac{1}{N} \int_{\delta \leq |x| \leq \frac{1}{2}} \frac{|M + f(0)|}{\sin^2(\pi \delta)} dx. \end{aligned}$$

上式两边同时令 $N \rightarrow +\infty$ 并取上极限, 得到

$$\overline{\lim}_{N \rightarrow +\infty} \left| \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} [f(x) - f(0)] dx \right| \leq \frac{\sup_{|x| \leq \delta} |f(x) - f(0)|}{1 - \varepsilon} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2(\pi y)}{(\pi y)^2} dy.$$

由

$$\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2(\pi y)}{(\pi y)^2} dy \right| \leq \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(\pi y)^2} dy < +\infty.$$

可知 $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2(\pi y)}{(\pi y)^2} dy$ 收敛. 从而根据 δ 的任意性, 上式两边同时令 $\delta \rightarrow 0^+$, 再结合 f 在 $x = 0$ 处连续, 可得

$$\begin{aligned} & \overline{\lim}_{N \rightarrow +\infty} \left| \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} [f(x) - f(0)] dx \right| \\ &\leq \lim_{\delta \rightarrow 0^+} \frac{\sup_{|x| \leq \delta} |f(x) - f(0)|}{1 - \varepsilon} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2(\pi y)}{(\pi y)^2} dy \\ &= \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2(\pi y)}{(\pi y)^2} dy}{1 - \varepsilon} \lim_{x \rightarrow 0^+} |f(x) - f(0)| = 0. \end{aligned}$$

从而

$$0 \leq \lim_{N \rightarrow +\infty} \left| \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} [f(x) - f(0)] dx \right| \leq \overline{\lim}_{N \rightarrow +\infty} \left| \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} [f(x) - f(0)] dx \right| \leq 0.$$

故 $\lim_{N \rightarrow +\infty} \left| \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} [f(x) - f(0)] dx \right| = 0$. 而一方面, 我们有

$$\begin{aligned} & \lim_{N \rightarrow +\infty} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} f(0) dx \geq \lim_{N \rightarrow +\infty} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{(\pi x)^2} f(0) dx \\ &\stackrel{\text{令 } y = Nx}{=} \lim_{N \rightarrow +\infty} \int_{-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \frac{\sin^2(\pi y)}{(\pi y)^2} f(0) dy = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2(\pi y)}{(\pi y)^2} f(0) dy \end{aligned}$$

$$= \frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\sin^2 x}{x^2} f(0) dx \xrightarrow{\text{命题 8.3}} f(0).$$

另一方面, 对 $\forall \varepsilon \in (0, 1)$ 我们有

$$\begin{aligned} \lim_{N \rightarrow +\infty} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} f(0) dx &= \lim_{N \rightarrow +\infty} \int_{|x| \leq \delta} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} f(0) dx + \lim_{N \rightarrow +\infty} \int_{\delta \leq |x| \leq \frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} f(0) dx \\ &\leq f(0) \lim_{N \rightarrow +\infty} \int_{|x| \leq \delta} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} dx + \lim_{N \rightarrow +\infty} \int_{\delta \leq |x| \leq \frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{1}{\sin^2(\pi x)} f(0) dx \leq \frac{f(0)}{1 - \varepsilon} \lim_{N \rightarrow +\infty} \int_{|x| \leq \delta} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{(\pi x)^2} dx \\ &\xrightarrow{\text{令 } y = Nx} \frac{f(0)}{1 - \varepsilon} \lim_{N \rightarrow +\infty} \int_{|y| \leq N\delta} \frac{\sin^2(\pi y)}{(\pi y)^2} dy = \frac{f(0)}{1 - \varepsilon} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2(\pi y)}{(\pi y)^2} dy = \frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\sin^2 x}{x^2} dx \frac{f(0)}{1 - \varepsilon} \xrightarrow{\text{命题 8.3}} \frac{f(0)}{1 - \varepsilon}. \end{aligned}$$

再根据 ε 的任意性, 可知

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} f(0) dx \leq f(0).$$

因此, 由夹逼准则, 可知 $\lim_{N \rightarrow +\infty} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N} \frac{\sin^2(\pi Nx)}{\sin^2(\pi x)} f(0) dx = f(0)$.

□

例题 2.128 设 $\varphi_n(x) = \frac{n}{\sqrt{\pi}} e^{-n^2 x^2}$, $n = 1, 2, \dots$, f 是 \mathbb{R} 上的有界实值连续函数, 证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \varphi_n(x-y) dy = f(x).$$

证明 由条件可知, 存在 $M > 0$, 使得 $|f(x)| \leq M, \forall x \in \mathbb{R}$. 于是对 $\forall x \in \mathbb{R}$, 固定 x , 再对 $\forall \delta > 0$, 我们有

$$\begin{aligned} \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| \int_{-\infty}^{\infty} |f(y) - f(x)| \frac{n}{\sqrt{\pi}} e^{-n^2(x-y)^2} dy \right| &\leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} |f(y) - f(x)| \frac{n}{\sqrt{\pi}} e^{-n^2(x-y)^2} dy \\ &\leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_{|x-y| \leq \delta} |f(y) - f(x)| \frac{n}{\sqrt{\pi}} e^{-n^2(x-y)^2} dy + \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_{|x-y| \geq \delta} |f(y) - f(x)| \frac{n}{\sqrt{\pi}} e^{-n^2(x-y)^2} dy \\ &\leq \sup_{|x-y| \leq \delta} |f(y) - f(x)| \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_{|x-y| \leq \delta} \frac{n}{\sqrt{\pi}} e^{-n^2(x-y)^2} dy + \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_{|x-y| \geq \delta} 2M \frac{n}{\sqrt{\pi}} e^{-n^2 \delta^2} dy \\ &\xrightarrow{\text{令 } z = n(x-y)} \sup_{|x-y| \leq \delta} |f(y) - f(x)| \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \int_{|z| \leq n\delta} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} dz \\ &= \sup_{|x-y| \leq \delta} |f(y) - f(x)| \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} dz = \sup_{|x-y| \leq \delta} |f(y) - f(x)|. \end{aligned}$$

令 $\delta \rightarrow 0^+$, 再结合 f 在 $\forall x \in \mathbb{R}$ 上连续, 可得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \left| \int_{-\infty}^{\infty} |f(y) - f(x)| \frac{n}{\sqrt{\pi}} e^{-n^2(x-y)^2} dy \right| \leq \lim_{\delta \rightarrow 0^+} \sup_{|x-y| \leq \delta} |f(y) - f(x)| = \lim_{y \rightarrow x} |f(y) - f(x)| = 0.$$

故

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \frac{n}{\sqrt{\pi}} e^{-n^2(x-y)^2} dy &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \frac{n}{\sqrt{\pi}} e^{-n^2(x-y)^2} dy \\ &= f(x) \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{n}{\sqrt{\pi}} e^{-n^2(x-y)^2} dy \xrightarrow{\text{令 } z = n(x-y)} f(x) \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{|z| \leq n\delta} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} dz \\ &= f(x) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} dz = f(x). \end{aligned}$$

□

例题 2.129 设 $f(x) \in C[0, 1]$, $f'(0)$ 存在, 证明: 对任意正整数 m , 在 $n \rightarrow \infty$ 时有

$$\int_0^1 f(x^n) dx = f(0) + \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{n^{k+1}} \int_0^1 \frac{f(x) - f(0)}{x} \frac{\ln^k x}{k!} dx + O\left(\frac{1}{n^{m+1}}\right).$$

注 这里积分换元之后, 再 Taylor 展开, 但是后续的积分与求和的换序以及余项的估计并不好处理.

笔记 估计抽象函数的渐近展开一般考虑拟合和分段. 如果考虑积分与求和换序的话并不好处理, 一般只有估计具体函数的渐近才会考虑换序.

这里分段的想法也是将原积分分成主体部分和余项部分. 容易观察 (直观地分析一下即可) 到这里积分的阶的主体部分集中在 0 附近.

证明 记 $g(x) = \frac{f(x) - f(0)}{x}$, 则由条件可知, $g \in C[0, 1]$, 从而

$$|g(x)| \leq C, \forall x \in [0, 1]. \quad (2.119)$$

于是

$$\begin{aligned} \int_0^1 f(x^n) dx - f(0) &= \int_0^1 [f(x^n) - f(0)] dx \xrightarrow{\text{令 } y = x^n} \int_0^1 \frac{x^{\frac{1}{n}-1}}{n} [f(x) - f(0)] dx \\ &= \frac{1}{n} \int_0^1 e^{\frac{\ln x}{n}} \frac{f(x) - f(0)}{x} dx = \frac{1}{n} \int_0^1 e^{\frac{\ln x}{n}} g(x) dx. \end{aligned}$$

因此原问题等价于证明对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 都有

$$\frac{1}{n} \int_0^1 e^{\frac{\ln x}{n}} g(x) dx = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{n^{k+1}} \int_0^1 \frac{\ln^k x}{k!} g(x) dx + O\left(\frac{1}{n^{m+1}}\right).$$

由 Taylor 公式可知, $\forall x \in [\delta, 1]$, 对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 都有

$$e^{\frac{\ln x}{n}} = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\ln^k x}{k! n^k} + O\left(\frac{1}{n^m}\right), n \rightarrow \infty.$$

即存在 $M > 0$, 使得 $\forall x \in [\delta, 1]$, 对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 存在 $N > 0$, 使得 $\forall n > N$, 都有

$$\left| e^{\frac{\ln x}{n}} - \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\ln^k x}{k! n^k} \right| \leq \frac{M}{n^m}. \quad (2.120)$$

取 $\delta = \frac{1}{n^{2m}} \in (0, 1)$, 则对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 当 $n > N$ 时, 结合 (2.119)(2.120) 式, 我们有

$$\begin{aligned} &\left| \frac{1}{n} \int_0^1 e^{\frac{\ln x}{n}} g(x) dx - \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{n^{k+1}} \int_0^1 \frac{\ln^k x}{k!} g(x) dx \right| = \left| \frac{1}{n} \int_0^1 e^{\frac{\ln x}{n}} g(x) dx - \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{m-1} \int_0^1 \frac{\ln^k x}{k! n^k} g(x) dx \right| \\ &= \left| \frac{1}{n} \int_0^1 e^{\frac{\ln x}{n}} g(x) dx - \frac{1}{n} \int_0^1 \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\ln^k x}{k! n^k} g(x) dx \right| = \left| \frac{1}{n} \int_0^1 \left(e^{\frac{\ln x}{n}} - \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\ln^k x}{k! n^k} \right) g(x) dx \right| \\ &\leq \frac{1}{n} \int_0^\delta \left| e^{\frac{\ln x}{n}} - \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\ln^k x}{k! n^k} \right| g(x) dx + \frac{1}{n} \int_\delta^1 \left| e^{\frac{\ln x}{n}} - \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\ln^k x}{k! n^k} \right| g(x) dx \\ &\leq \frac{C}{n} \int_0^\delta \left(x^{\frac{1}{n}} + \sum_{k=0}^{m-1} \frac{|\ln x|^k}{k! n^k} \right) dx + \frac{C}{n} \int_\delta^1 \left| e^{\frac{\ln x}{n}} - \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\ln^k x}{k! n^k} \right| dx \leq \frac{C}{n} \int_0^\delta \left(1 + \sum_{k=0}^{m-1} |\ln x|^k \right) dx + \frac{C}{n} \int_0^1 \frac{M}{n^m} dx \\ &\leq \frac{C}{n} \int_0^\delta (1 + m |\ln x|^{m-1}) dx + \frac{MC}{n^{m+1}} = \frac{C}{n} \int_0^{\frac{1}{n^{2m}}} (1 - m \ln^{m-1} x) dx + \frac{MC}{n^{m+1}} \\ &= \frac{C}{n^{2m+1}} - \frac{mC}{n} \int_0^{\frac{1}{n^{2m}}} \ln^{m-1} x dx + \frac{MC}{n^{m+1}} \leq \frac{MC + C}{n^{m+1}} + \frac{mC}{n} \left| \int_0^{\frac{1}{n^{2m}}} \ln^{m-1} x dx \right|. \end{aligned} \quad (2.122)$$

注意到

$$\int \ln^n x dx = x(a_0 + a_1 \ln x + \cdots + a_n \ln^n x) + c = x \left(a_0 + \sum_{k=1}^n a_k \ln k \right) + c,$$

其中 a_0, a_1, \dots, a_n, c 都是常数. 又因为对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都成立 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln^n x}{x} = 0$, 所以一定存在 $N' > 0$, 使得当 $n > N'$ 时, 我们有

$$\begin{aligned} \left| \int_0^{\frac{1}{n^{2m}}} \ln^{m-1} x dx \right| &= \left| x (b_0 + b_1 \ln x + \cdots + b_{m-1} \ln^{m-1} x) \Big|_0^{\frac{1}{n^{2m}}} \right| = \left| \frac{1}{n^{2m}} \left(b_0 + b_1 \ln \frac{1}{n^{2m}} + \cdots + b_{m-1} \ln^{m-1} \frac{1}{n^{2m}} \right) \right| \\ &\leq \frac{mB}{n^{2m}} \left| \ln^{m-1} \frac{1}{n^{2m}} \right| = \frac{2m^2 B \ln^{m-1} n}{n^{2m}} \leq \frac{2m^2 B}{n^{2m-1}} \leq \frac{2m^2 B}{n^m}, \end{aligned} \quad (2.123)$$

其中 b_0, b_1, \dots, b_{m-1} 都是常数, $B = \max\{b_0, b_1, \dots, b_{m-1}\}$. 因此由 (2.122)(2.123) 式可得, 对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 当 $n >$

$\max\{N, N'\}$ 时, 我们有

$$\begin{aligned} & \left| \frac{1}{n} \int_0^1 e^{\frac{\ln x}{n}} g(x) dx - \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{n^{k+1}} \int_0^1 \frac{\ln^k x}{k!} g(x) dx \right| \leq \frac{MC + C}{n^{m+1}} + \frac{mC}{n} \left| \int_0^{\frac{1}{n^{2m}}} \ln^{m-1} x dx \right| \\ & \leq \frac{MC + C}{n^{m+1}} + \frac{mC}{n} \cdot \frac{2m^2 B}{n^m} = \frac{MC + C - 2m^3 BC}{n^{m+1}}. \end{aligned}$$

即 $\frac{1}{n} \int_0^1 e^{\frac{\ln x}{n}} g(x) dx - \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{n^{k+1}} \int_0^1 \frac{\ln^k x}{k!} g(x) dx = O\left(\frac{1}{n^{m+1}}\right)$, $n \rightarrow \infty$. 结论得证. \square

2.9 Riemann 引理

定理 2.14 (Riemann 引理)

设 $E \subset \mathbb{R}$ 是区间且 f 在 E 上绝对可积. g 是定义在 \mathbb{R} 的周期 $T > 0$ 函数, 且在任何有界闭区间上 Riemann 可积, 则我们有

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_E f(y)g(xy) dy = \frac{1}{T} \int_E f(y) dy \int_0^T g(y) dy. \quad (2.124)$$

注 f 在 E 上绝对可积包含 f 为反常积分的情况 (即反常积分绝对收敛).

考试中, Riemann 引理不能直接使用, 需要我们根据具体问题给出证明. 具体可见例题 2.130.

笔记

(1) 不妨设 $E = \mathbb{R}$ 的原因: 若 (1.1) 式在 $E = \mathbb{R}$ 时已得证明, 则当 $E \subseteq \mathbb{R}$ 时, 令 $\tilde{f}(y) = f(y) \cdot \chi_E, y \in \mathbb{R}$, 则由 $f(y)$ 在 E 上绝对可积, 可得 $\tilde{f}(y)$ 在 \mathbb{R} 上也绝对可积. 从而由假设可知

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_{\mathbb{R}} \tilde{f}(y)g(xy) dy = \frac{1}{T} \int_{\mathbb{R}} \tilde{f}(y) dy \int_0^T g(y) dy.$$

于是

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_E f(y)g(xy) dy = \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_{\mathbb{R}} \tilde{f}(y)g(xy) dy = \frac{1}{T} \int_{\mathbb{R}} \tilde{f}(y) dy \int_0^T g(y) dy = \frac{1}{T} \int_E f(y) dy \int_0^T g(y) dy$$

故可以不妨设 $E = \mathbb{R}$.

(2) 不妨设 $\sup_{\mathbb{R}} |g| > 0$ 的原因: 若 $\sup_{\mathbb{R}} |g| = 0$, 则 $g(x) \equiv 0$, 此时结论显然成立. 因此我们只需要考虑当 $\sup_{\mathbb{R}} |g| > 0$ 时的情况.

(3) 不妨设 $T = 1$ 的原因: 若 (2.124) 式在 $T = 1$ 时已得证明, 则当 $T \neq 1$ 时, 有

$$\frac{1}{T} \int_E f(y) dy \int_0^T g(y) dy \xrightarrow{\text{令 } y=Tx} \int_E f(y) dy \int_0^1 g(Tx) dx = \int_E f(y) dy \int_0^1 g(Ty) dy. \quad (2.125)$$

由于 $g(y)$ 是 \mathbb{R} 上周期为 $T \neq 1$ 的函数, 因此 $g(Ty)$ 就是 \mathbb{R} 上周期为 1 的函数. 从而由假设可知

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_E f(y)g(Txy) dy = \int_E f(y) dy \int_0^1 g(Ty) dy. \quad (2.126)$$

又由(2.125)式及 $T > 0$ 可得

$$\begin{aligned} & \int_E f(y) dy \int_0^1 g(Ty) dy = \frac{1}{T} \int_E f(y) dy \int_0^T g(y) dy \\ & \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_E f(y)g(Txy) dy \xrightarrow{\text{令 } t=Tx} \lim_{t \rightarrow +\infty} \int_E f(y)g(ty) dy = \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_E f(y)g(xy) dy \end{aligned}$$

再结合(2.126)式可得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_E f(y)g(xy) dy = \frac{1}{T} \int_E f(y) dy \int_0^T g(y) dy$. 故可以不妨设 $T = 1$.

(4) 不妨设 $\int_0^1 g(y) dy = 0$ 的原因: 若 (2.124) 式在 $\int_0^1 g(y) dy = 0$ 时已得证明, 则当 $\int_0^1 g(y) dy \neq 0$ 时, 令 $G(y) =$

$g(y) - \int_0^1 g(t)dt$, 则 $G(y)$ 是 \mathbb{R} 上周期为 1 的函数, 并且 $\int_0^1 G(y)dy = 0$. 于是由假设可知

$$\begin{aligned} & \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_E f(y)G(xy)dy = \int_E f(y)dy \int_0^1 G(y)dy \\ \Leftrightarrow & \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_E f(y) \left[g(xy) - \int_0^1 g(t)dt \right] dy = \int_E f(y)dy \int_0^1 \left[g(y) - \int_0^1 g(t)dt \right] dy \\ \Leftrightarrow & \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\int_E f(y)g(xy)dy - \int_E f(y) \int_0^1 g(t)dt dy \right) = \int_E f(y)dy \int_0^1 g(y)dy - \int_E f(y)dy \int_0^1 g(t)dt = 0 \\ \Leftrightarrow & \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_E f(y)g(xy)dy = \int_E f(y) \int_0^1 g(t)dt dy \end{aligned}$$

再结合(2)可知, 此时原结论成立. 故可以不妨设 $\int_0^1 g(y)dy = 0$.

证明 不妨设 $E = \mathbb{R}, \sup_{\mathbb{R}} |g| > 0, T = 1$, 再不妨设 $\int_0^1 g(y)dy = 0$. 因此只需证 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_{\mathbb{R}} f(y)g(xy)dy = 0$. 由 g 的周期为 1 及 $\int_0^1 g(y)dy = 0$ 可得, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$\begin{aligned} & \int_{-n}^0 g(t)dt \xrightarrow{\text{令 } x=t+n} \int_0^n g(x-n)dx \xrightarrow{g \text{ 的周期为 } 1} \int_0^n g(x)dx = \int_0^n g(t)dt \\ & = \sum_{k=0}^{n-1} \int_k^{k+1} g(t)dt \xrightarrow{\text{令 } y=t-k} \sum_{k=0}^{n-1} \int_0^1 g(y+k)dy \xrightarrow{g \text{ 的周期为 } 1} \sum_{k=0}^{n-1} \int_0^1 g(y)dy \\ & = (n-1) \cdot 0 = 0. \end{aligned}$$

从而对 $\forall \beta > \alpha > 0$, 我们有

$$\begin{aligned} \left| \int_{\alpha}^{\beta} g(t)dt \right| &= \left| \int_0^{\beta} g(t)dt - \int_0^{\alpha} g(t)dt \right| = \left| \int_{-\lceil \beta \rceil}^{\beta - \lceil \beta \rceil} g(t + \lceil \beta \rceil)dt - \int_{-\lceil \alpha \rceil}^{\alpha - \lceil \alpha \rceil} g(t + \lceil \alpha \rceil)dt \right| \\ &= \left| \int_{-\lceil \beta \rceil}^{\beta - \lceil \beta \rceil} g(t)dt - \int_{-\lceil \alpha \rceil}^{\alpha - \lceil \alpha \rceil} g(t)dt \right| = \left| \int_0^{\beta - \lceil \beta \rceil} g(t)dt - \int_0^{\alpha - \lceil \alpha \rceil} g(t)dt \right| \\ &= \left| \int_{\alpha - \lceil \alpha \rceil}^{\beta - \lceil \beta \rceil} g(t)dt \right| \leq \sup_{\mathbb{R}} |g|. \end{aligned}$$

故

$$\left| \int_{\alpha}^{\beta} g(xy)dy \right| \xrightarrow{\text{令 } t=xy} \frac{1}{x} \left| \int_{x\alpha}^{x\beta} g(t)dt \right| \leq \frac{\sup_{\mathbb{R}} |g|}{x}, \quad \forall x > 0, \forall \beta > \alpha > 0. \quad (2.127)$$

因为 f 在 \mathbb{R} 上绝对可积, 所以由 Cauchy 收敛准则可知, 对 $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得

$$\left| \int_{|y|>N} f(y)dy \right| < \frac{\varepsilon}{3 \sup_{\mathbb{R}} |g|}. \quad (2.128)$$

由于 f 在 \mathbb{R} 上绝对可积, 从而 f 在 \mathbb{R} 上也 Riemann 可积, 因此由可积的充要条件可知, 存在划分

$$-N = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n = N,$$

使得

$$\sum_{i=1}^n \left(\sup_{[t_{i-1}, t_i]} f - \inf_{[t_{i-1}, t_i]} f \right) (t_i - t_{i-1}) \leq \frac{\varepsilon}{3 \sup_{\mathbb{R}} |g|}. \quad (2.129)$$

于是当 $x > \frac{6N \sum_{j=1}^n |\inf_{[t_{j-1}, t_j]} f| \cdot \sup_{\mathbb{R}} |g|}{\varepsilon}$ 时, 结合(2.127)(2.128)(2.129)可得

$$\begin{aligned}
 \left| \int_{-\infty}^{+\infty} f(y)g(xy)dy \right| &\leq \left| \int_{-N}^N f(y)g(xy)dy \right| + \left| \int_{|y|>N} f(y)g(xy)dy \right| \stackrel{(2.128)}{\leq} \left| \sum_{j=1}^n \int_{t_{j-1}}^{t_j} f(y)g(xy)dy \right| + \frac{\varepsilon}{3 \sup_{\mathbb{R}} |g|} \cdot \sup_{\mathbb{R}} |g| \\
 &\leq \sum_{j=1}^n \left| \int_{t_{j-1}}^{t_j} [f(y) - \inf_{[t_{j-1}, t_j]} f]g(xy)dy \right| + \sum_{j=1}^n \left| \int_{t_{j-1}}^{t_j} \inf_{[t_{j-1}, t_j]} f \cdot g(xy)dy \right| + \frac{\varepsilon}{3} \\
 &\stackrel{(2.127)}{\leq} \sum_{j=1}^n \int_{t_{j-1}}^{t_j} [f(y) - \inf_{[t_{j-1}, t_j]} f]dy \cdot \sup_{\mathbb{R}} |g| + \frac{\sup_{\mathbb{R}} |g|}{x} \sum_{j=1}^n \int_{t_{j-1}}^{t_j} |\inf_{[t_{j-1}, t_j]} f|dy + \frac{\varepsilon}{3} \\
 &\leq \sum_{j=1}^n \int_{t_{j-1}}^{t_j} (\sup_{[t_{j-1}, t_j]} f - \inf_{[t_{j-1}, t_j]} f)dy \cdot \sup_{\mathbb{R}} |g| + \frac{\sup_{\mathbb{R}} |g|}{x} \sum_{j=1}^n \int_{t_{j-1}}^{t_j} |\inf_{[t_{j-1}, t_j]} f|dy + \frac{\varepsilon}{3} \\
 &= \sum_{j=1}^n (\sup_{[t_{j-1}, t_j]} f - \inf_{[t_{j-1}, t_j]} f)(t_j - t_{j-1}) \cdot \sup_{\mathbb{R}} |g| + \frac{\sup_{\mathbb{R}} |g|}{x} \sum_{j=1}^n \int_{t_{j-1}}^{t_j} |\inf_{[t_{j-1}, t_j]} f|dy + \frac{\varepsilon}{3} \\
 &\stackrel{(2.129)}{<} \frac{\varepsilon}{3 \sup_{\mathbb{R}} |g|} \cdot \sup_{\mathbb{R}} |g| + \frac{\sup_{\mathbb{R}} |g|}{x} \sum_{j=1}^n \int_{t_{j-1}}^{t_j} |\inf_{[t_{j-1}, t_j]} f|dy + \frac{\varepsilon}{3} \\
 &\stackrel{x \text{充分大}}{<} \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon
 \end{aligned}$$

因此 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_{\mathbb{R}} f(y)g(xy)dy = 0$. 结论得证. □

定理 2.15 (L^p 版本 Riemann 引理)

设 E 是有界勒贝格可测集, $f \in L^p(E)$, $x \in L^q[0, T]$, $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, $p > 1$ 且 x 周期为 $T > 0$. 则

$$\lim_{y \rightarrow +\infty} \int_E f(t)x(yt)dt = \frac{1}{T} \int_E f(t)dt \int_0^T x(t)dt.$$



证明 见清疏讲义. □

定理 2.16

设 $E \subset \mathbb{R}$ 是可测集且 $f \in L^1(E)$, g 是定义在 \mathbb{R} 的有界可测函数, 满足

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \int_0^x g(t)dt = A \in \mathbb{R}.$$

则我们有

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_E f(y)g(xy)dy = A \cdot \int_E f(y)dy.$$



证明 见清疏讲义. □

例题 2.130 设 $f \in R[0, 2\pi]$, 不直接使用Riemann 引理计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{2\pi} f(x)|\sin(nx)|dx.$$

证明 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 固定 n . 将 $[0, 2\pi]$ 等分成 $2n$ 段, 记这个划分为

$$T : 0 = t_0 < t_1 < \dots < t_{2n} = 2\pi,$$

其中 $t_i = \frac{i\pi}{n}, i = 0, 1, \dots, n$. 此时我们有

$$\int_{t_{i-1}}^{t_i} |\sin(nx)| dx = \int_{\frac{(i-1)\pi}{n}}^{\frac{i\pi}{n}} |\sin(nx)| dx = \frac{1}{n} \int_{(i-1)\pi}^{i\pi} |\sin x| dx = \frac{2}{n}. \quad (2.130)$$

由 $f \in R[0, 2\pi]$ 可知, f 在 $[0, 2\pi]$ 上有界也内闭有界. 从而利用(2.130)式可知, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} f(x) |\sin(nx)| dx &= \sum_{i=1}^{2n} \int_{t_{i-1}}^{t_i} f(x) |\sin(nx)| dx \leq \sum_{i=1}^{2n} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \sup_{[t_{i-1}, t_i]} f \cdot |\sin(nx)| dx \xrightarrow{(2.130) \text{ 式}} \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{2n} \sup_{[t_{i-1}, t_i]} f \\ &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{2n} \sup_{[t_{i-1}, t_i]} f = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{2n} \sup_{[t_{i-1}, t_i]} f \cdot \frac{\pi}{n} = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{2n} \sup_{[t_{i-1}, t_i]} f \cdot (t_i - t_{i-1}). \end{aligned} \quad (2.131)$$

另一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} f(x) |\sin(nx)| dx &= \sum_{i=1}^{2n} \int_{t_{i-1}}^{t_i} f(x) |\sin(nx)| dx \geq \sum_{i=1}^{2n} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \inf_{[t_{i-1}, t_i]} f \cdot |\sin(nx)| dx \xrightarrow{(2.130) \text{ 式}} \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{2n} \inf_{[t_{i-1}, t_i]} f \\ &= \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{2n} \inf_{[t_{i-1}, t_i]} f \cdot \frac{\pi}{n} = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{2n} \inf_{[t_{i-1}, t_i]} f \cdot (t_i - t_{i-1}). \end{aligned} \quad (2.132)$$

由 $f \in R[0, 2\pi]$ 和 Riemann 可积的充要条件可知

$$\int_0^{2\pi} f(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{2n} \sup_{[t_{i-1}, t_i]} f \cdot (t_i - t_{i-1}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{2n} \inf_{[t_{i-1}, t_i]} f \cdot (t_i - t_{i-1}).$$

于是对(2.131)(2.132)式两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 得到

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{2\pi} f(x) |\sin(nx)| dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx.$$

□

例题 2.131 设 f 是 \mathbb{R} 上周期 2π 函数且在 $[-\pi, \pi]$ 上 Riemann 可积, 设

$$S_n(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{f(x+t)}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt, n = 1, 2, \dots.$$

若 $x_0 \in (-\pi, \pi)$ 是 f 在 $[-\pi, \pi]$ 唯一间断点且存在下述极限

$$A = \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x), B = \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x), \lim_{x \rightarrow x_0^+} \frac{f(x) - A}{x - x_0}, \lim_{x \rightarrow x_0^-} \frac{f(x) - B}{x - x_0}.$$

证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n(x_0) = \frac{\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) + \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x)}{2}.$$

笔记

(1) 计算 $I_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{f(x_0+t)}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt$ 的思路: 由于 $\frac{f(x_0+t)}{2 \sin \frac{t}{2}}$ 在 $[0, \pi]$ 上只可能有奇点 $t = 0$, 因此 $\frac{f(x_0+t)}{2 \sin \frac{t}{2}}$ 在 $[0, \pi]$ 上不一定绝对可积. 从而不能直接利用 Riemann 引理. 于是我们需要将 $\frac{f(x_0+t)}{2 \sin \frac{t}{2}}$ 转化为在 $[0, \pi]$ 上无奇点的函数 (排除 $t = 0$ 这个奇点, 即证明 $t = 0$ 不再是奇点), 只要被积函数在积分区间上无奇点且 Riemann 可积, 就一定绝对可积. 进而满足 Riemann 引理的条件, 再利用 Riemann 引理就能求解出 I_1 . 具体处理方式见下述证明.

计算 $I_2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{f(x_0-t)}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt$ 的思路同理, 也是要排除 $t = 0$ 这个可能的奇点, 再利用 Riemann 引理进行求解. 具体计算方式见下述证明.

(2) 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{\pi} \frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt$ 的思路: 注意由于 $\frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}}$ 在 $[0, \pi]$ 上有一个奇点 $t = 0$, 并且对 $\forall t \in (0, \pi]$, 都有

$$\left| \frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}} \right| \geq \left| \frac{1}{2 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{t}{2}} \right| = \frac{\pi}{2t} > 0.$$

而 $\int_0^\pi \frac{\pi}{2t} dt$ 是发散的, 故 $\int_0^\pi \left| \frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}} \right| dt$ 也发散. 因此 $\frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}}$ 在 $[0, \pi]$ 上一定不是绝对可积的, 从而不能利用 Riemann 引理计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt$. 真正能计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt$ 的方法有多种, 下述证明利用的是强行替换/拟合法.

证明 注意到

$$\begin{aligned} S_n(x_0) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^\pi \frac{f(x_0+t)}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{f(x_0+t)}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt + \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 \frac{f(x_0+t)}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt \\ &\stackrel{\text{令 } y=-t}{=} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{f(x_0+t)}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt + \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{f(x_0-t)}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt \end{aligned} \quad (2.133)$$

记 $I_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{f(x_0+t)}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt$, $I_2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{f(x_0-t)}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt$, 则由(2.133)式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} (I_1 + I_2). \quad (2.134)$$

于是

$$I_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{f(x_0+t) - A}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt + \frac{A}{\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt, \quad (2.135)$$

$$I_2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{f(x_0-t) - B}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt + \frac{B}{\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt. \quad (2.136)$$

由条件可知 $\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{f(x_0+t) - A}{2 \sin \frac{t}{2}} = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{f(x_0+t) - A}{t} = \lim_{x \rightarrow x_0^+} \frac{f(x) - A}{x - x_0}$ 存在, $\lim_{t \rightarrow 0^-} \frac{f(x_0-t) - B}{2 \sin \frac{t}{2}} = \lim_{t \rightarrow 0^-} \frac{f(x_0-t) - B}{t} =$

$\lim_{x \rightarrow x_0^-} \frac{f(x) - B}{x - x_0}$ 存在, 因此 $\frac{f(x_0+t) - A}{2 \sin \frac{t}{2}}, \frac{f(x_0-t) - B}{2 \sin \frac{t}{2}}$ 在 $[0, \pi]$ 都没有奇点且 Riemann 可积, 从而

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{f(x_0+t) - A}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt, \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{f(x_0-t) - B}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt$$

都满足 Riemann 引理的条件. 于是由 Riemann 引理可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{f(x_0+t) - A}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt = 0, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{f(x_0-t) - B}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt = 0. \quad (2.137)$$

下面计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt$.

$$\left| \int_0^\pi \frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt - \int_0^\pi \frac{1}{t} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt \right| = \left| \int_0^\pi \frac{t - 2 \sin \frac{t}{2}}{2t \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt \right|. \quad (2.138)$$

而 $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{t - 2 \sin \frac{t}{2}}{2t \sin \frac{t}{2}} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{t - 2 \sin \frac{t}{2}}{t^2} \xrightarrow{\text{L'Hospital's rule}} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1 - \cos \frac{t}{2}}{2t} = 0$, 因此 $\frac{t - 2 \sin \frac{t}{2}}{2t \sin \frac{t}{2}}$ 在 $[0, \pi]$ 上无奇点且 Riemann 可

积, 从而由 Riemann 引理可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{t - 2 \sin \frac{t}{2}}{2t \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt = 0$. 于是再结合(2.138)式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{1}{t} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{\frac{2n+1}{2}\pi} \frac{\sin t}{t} dt = \int_0^{+\infty} \frac{\sin t}{t} dt = \frac{\pi}{2}. \quad (2.139)$$

因此, 由(2.135)(2.136)(2.137)(2.139)式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} I_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{f(x_0+t) - A}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{A}{\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt = 0 + \frac{A}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{A}{2},$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} I_2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{f(x_0-t) - B}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{B}{\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2 \sin \frac{t}{2}} \sin \left(\frac{2n+1}{2} t \right) dt = 0 + \frac{B}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{B}{2}.$$

再结合(2.134)式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} (I_1 + I_2) = \lim_{n \rightarrow \infty} I_1 + \lim_{n \rightarrow \infty} I_2 = \frac{A + B}{2}.$$

□

例题 2.132 设 $f \in C^2[0, \frac{\pi}{2}]$, $f(0) = 0$, 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin^2(nx)}{\sin^2 x} f(x) dx.$$

注 由于 $x = 0$ 可能是 $\frac{f(x)}{\sin^2 x}$ 在 $[0, \frac{\pi}{2}]$ 上的奇点, 因此我们需要将其转化为在 $[0, \frac{\pi}{2}]$ 上不含奇点的函数, 才能利用 Riemann 引理进行计算.

证明 注意到

$$\frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f(x)}{\sin^2 x} \sin^2(nx) dx = \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f(x) - f'(0)x}{\sin^2 x} \sin^2(nx) dx + \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f'(0)x}{\sin^2 x} \sin^2(nx) dx. \quad (2.140)$$

先计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f(x) - f'(0)x}{\sin^2 x} \sin^2(nx) dx$. 由于 $f \in C^2[0, \frac{\pi}{2}]$, 故利用 L'Hospital 法则可知

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f(x) - f'(0)x}{\sin^2 x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f'(x) - f'(0)}{2 \sin x \cos x} = \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f'(x) - f'(0)}{x} = \frac{f''(0)}{2}.$$

于是 $\frac{f(x) - f'(0)x}{\sin^2 x}$ 在 $[0, \frac{\pi}{2}]$ 上无奇点且 Riemann 可积, 从而绝对可积. 故由 Riemann 引理 可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f(x) - f'(0)x}{\sin^2 x} \sin^2(nx) dx &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f(x) - f'(0)x}{\sin^2 x} dx \int_0^{\pi} \sin^2 x dx \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f(x) - f'(0)x}{\sin^2 x} dx < \infty. \end{aligned} \quad (2.141)$$

利用(2.141)式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f(x) - f'(0)x}{\sin^2 x} \sin^2(nx) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln n} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f(x) - f'(0)x}{\sin^2 x} \sin^2(nx) dx = 0. \quad (2.142)$$

下面计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f'(0)x}{\sin^2 x} \sin^2(nx) dx$. 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 我们有

$$\left| \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f'(0)x}{\sin^2 x} \sin^2(nx) dx - \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f'(0)}{x} \sin^2(nx) dx \right| = \left| \frac{f'(0)}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{x^2 - \sin^2 x}{x \sin^2 x} \cdot \sin^2(nx) dx \right|. \quad (2.143)$$

又 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^2 - \sin^2 x}{x \sin^2 x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^2 - (x - \frac{x^3}{6} + o(x^3))^2}{x^3} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{-\frac{x^3}{3} + o(x^3)}{x^3} = -\frac{1}{3}$, 故 $\frac{x^2 - \sin^2 x}{x \sin^2 x}$ 在 $[0, \frac{\pi}{2}]$ 上无奇点且 Riemann 可积, 从而绝对可积. 于是由 Riemann 引理 可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f'(0) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{x^2 - \sin^2 x}{x \sin^2 x} \cdot \sin^2(nx) dx = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{x^2 - \sin^2 x}{x \sin^2 x} dx \int_0^{\pi} \sin^2 x dx = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{x^2 - \sin^2 x}{x \sin^2 x} dx < \infty. \quad (2.144)$$

利用(2.144)式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{x^2 - \sin^2 x}{x \sin^2 x} \cdot \sin^2(nx) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln n} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{x^2 - \sin^2 x}{x \sin^2 x} \cdot \sin^2(nx) dx = 0. \quad (2.145)$$

因此, 对(2.143)式两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 利用(2.145)式可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f'(0)x}{\sin^2 x} \sin^2(nx) dx &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f'(0)}{x} \sin^2(nx) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f'(0)}{\ln n} \int_0^{\frac{n\pi}{2}} \frac{\sin^2 x}{x} dx \\ &\stackrel{\text{Stolz 定理}}{=} f'(0) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_{\frac{n\pi}{2}}^{\frac{(n+1)\pi}{2}} \frac{\sin^2 x}{x} dx}{\ln(1 + \frac{1}{n})} \stackrel{\text{积分中值定理}}{=} f'(0) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{2}{\pi n} \int_{\frac{n\pi}{2}}^{\frac{(n+1)\pi}{2}} (\frac{1}{2} - \cos 2x) dx}{\frac{1}{n}} \\ &= \frac{2f'(0)}{\pi} \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\pi} \cos(x + n\pi) dx \right) = \frac{2f'(0)}{\pi} \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{(-1)^n}{2} \int_0^{\pi} \cos x dx \right) = \frac{f'(0)}{2}. \end{aligned} \quad (2.146)$$

利用(2.142)(2.146)式, 对(2.140)式两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f(x)}{\sin^2 x} \sin^2(nx) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f(x) - f'(0)x}{\sin^2 x} \sin^2(nx) dx + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{f'(0)x}{\sin^2 x} \sin^2(nx) dx = \frac{f'(0)}{2}.$$

□

2.10 极限问题综合

例题 2.133 设二阶可微函数 $f : [1, +\infty) \rightarrow (0, +\infty)$ 满足

$$f''(x) \leq 0, \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty.$$

求极限

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{f^s(n)}.$$

 **笔记** 本例非常经典, 深刻体现了“拉格朗日中值定理”保持阶不变和“和式和积分”转化的思想.

证明 由条件 $f''(x) \leq 0$ 可知, f 是上凸函数. 而上凸函数只能在递增、递减、先增后减中发生一个. 又 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$, 因此 f 一定在 $[1, +\infty)$ 上递增. 再结合 $f''(x) \leq 0$ 可知 $f' \geq 0$ 且单调递减. 下面来求极限.

由 Lagrange 中值定理可得, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 存在 $\theta_n \in (2n-1, 2n)$, 使得

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{f^s(n)} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{f^s(2n)} - \frac{1}{f^s(2n-1)} \right] \xrightarrow{\text{Lagrange 中值定理}} s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-f'(\theta_n)}{f^{s+1}(\theta_n)}. \quad (2.147)$$

由于 $\theta_n \in (2n-1, 2n), \forall n \in \mathbb{N}$ 且 $f \geq 0$ 单调递增, $f' \geq 0$ 单调递减, 因此

$$s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-f'(2n-1)}{f^{s+1}(2n-1)} \leq s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-f'(\theta_n)}{f^{s+1}(\theta_n)} \leq s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-f'(2n)}{f^{s+1}(2n)}. \quad (2.148)$$

又因为 $\left[\frac{-f'(x)}{f^{s+1}(x)} \right]' = \frac{f''(x)f(x) - (s+1)f'(x)}{f^{s+2}(x)} \leq 0$, 所以 $\frac{-f'(x)}{f^{s+1}(x)}$ 单调递减. 从而一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0^+} s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-f'(2n)}{f^{s+1}(2n)} &\leq -\lim_{s \rightarrow 0^+} s \sum_{n=1}^{\infty} \int_{n-1}^n \frac{f'(2x)}{f^{s+1}(2x)} dx = -\lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \int_{2n-2}^{2n} \frac{f'(x)}{f^{s+1}(x)} dx \\ &= -\lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \int_1^{+\infty} \frac{f'(x)}{f^{s+1}(x)} dx = -\lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \int_1^{+\infty} \frac{1}{f^{s+1}(x)} df(x) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \cdot \frac{1}{sf^s(x)} \Big|_1^{+\infty} = -\lim_{s \rightarrow 0^+} \left[\frac{s}{2} \cdot \frac{1}{sf^s(1)} \right] = -\frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (2.149)$$

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0^+} s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-f'(2n)}{f^{s+1}(2n)} &\geq -\lim_{s \rightarrow 0^+} s \sum_{n=1}^{\infty} \int_n^{n+1} \frac{f'(2x)}{f^{s+1}(2x)} dx = -\lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \int_{2n-1}^{2n+1} \frac{f'(x)}{f^{s+1}(x)} dx \\ &= -\lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \int_2^{+\infty} \frac{f'(x)}{f^{s+1}(x)} dx = -\lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \int_2^{+\infty} \frac{1}{f^{s+1}(x)} df(x) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \cdot \frac{1}{sf^s(x)} \Big|_2^{+\infty} = -\lim_{s \rightarrow 0^+} \left[\frac{s}{2} \cdot \frac{1}{sf^s(2)} \right] = -\frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (2.150)$$

于是利用(2.149)(2.150)式, 由夹逼准则可得

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-f'(2n)}{f^{s+1}(2n)} = -\frac{1}{2}. \quad (2.151)$$

另一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0^+} s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-f'(2n-1)}{f^{s+1}(2n-1)} &\leq -\lim_{s \rightarrow 0^+} s \left[\frac{f'(1)}{f^{s+1}(1)} + \sum_{n=2}^{\infty} \int_{n-1}^n \frac{f'(2x-1)}{f^{s+1}(2x-1)} dx \right] = -\lim_{s \rightarrow 0^+} s \left[\frac{f'(1)}{f^{s+1}(1)} + \frac{1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} \int_{2n-3}^{2n-1} \frac{f'(x)}{f^{s+1}(x)} dx \right] \\ &= -\lim_{s \rightarrow 0^+} s \left[\frac{f'(1)}{f^{s+1}(1)} + \frac{1}{2} \int_1^{+\infty} \frac{f'(x)}{f^{s+1}(x)} dx \right] = -\lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \int_1^{+\infty} \frac{f'(x)}{f^{s+1}(x)} dx \\ &= -\lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \int_1^{+\infty} \frac{1}{f^{s+1}(x)} df(x) = \lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \cdot \frac{1}{sf^s(x)} \Big|_1^{+\infty} \\ &= -\lim_{s \rightarrow 0^+} \left[\frac{s}{2} \cdot \frac{1}{sf^s(1)} \right] = -\frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (2.152)$$

$$\begin{aligned}
\lim_{s \rightarrow 0^+} s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-f'(2n-1)}{f^{s+1}(2n-1)} &\geq -\lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \int_n^{n+1} \frac{f'(x)}{f^{s+1}(x)} dx = -\lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \int_{2n-1}^{2n+1} \frac{f'(x)}{f^{s+1}(x)} dx \\
&= -\lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \int_1^{+\infty} \frac{f'(x)}{f^{s+1}(x)} dx = -\lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \int_1^{+\infty} \frac{1}{f^{s+1}(x)} df(x) \\
&= \lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{s}{2} \cdot \frac{1}{sf^s(x)} \Big|_1^{+\infty} = -\lim_{s \rightarrow 0^+} \left[\frac{s}{2} \cdot \frac{1}{sf^s(1)} \right] = -\frac{1}{2}.
\end{aligned} \tag{2.153}$$

于是利用(2.152)(2.153)式, 由夹逼准则可得

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-f'(2n-1)}{f^{s+1}(2n-1)} = -\frac{1}{2}. \tag{2.154}$$

故结合(2.147)(2.148)(2.151)(2.154)式, 由夹逼准则可得

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{f^s(n)} = \lim_{s \rightarrow 0^+} s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-f'(\theta_n)}{f^{s+1}(\theta_n)} = -\frac{1}{2}.$$

□

例题 2.134 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \sup_{x \in [0, 1]} \sum_{k=1}^{n-1} x^k (1-x)^{n-k}$.

证明 根据对称性, 不妨设 $x \in \left[0, \frac{1}{2}\right]$, 先尝试找到最大值点. 在 $x = 0, \frac{1}{2}$ 时代入, 很明显对应的极限是零, 考虑 $x \in \left(0, \frac{1}{2}\right)$, 根据等比数列求和公式有

$$\sum_{k=1}^{n-1} x^k (1-x)^{n-k} = (1-x)^n \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{x}{1-x}\right)^k = \frac{x(1-x)}{1-2x} ((1-x)^n - x^n)$$

如果 $\delta \in \left(0, \frac{1}{2}\right)$ 已经取定, 则在区间 $\left[\delta, \frac{1}{2}\right]$ 中

$$n \sum_{k=1}^{n-1} x^k (1-x)^{n-k} \leq n \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{1}{2}\right)^k (1-\delta)^{n-k} \leq n(1-\delta)^n \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{1}{2(1-\delta)}\right)^k = \frac{n(1-\delta)^n}{1 - \frac{1}{2(1-\delta)}}$$

右端是指数级趋于零的并且上式不依赖于 x , 所以函数会一致趋于零. 因此最大值点应该在 $x = 0$ 附近, 近似的有

$$n \sum_{k=1}^{n-1} x^k (1-x)^{n-k} = \frac{nx(1-x)}{1-2x} ((1-x)^n - x^n) \approx nx(1-x)^n$$

取 $x = \frac{1}{n}$ 显然极限是 $\frac{1}{e}$, 我们猜测这就是答案, 下面开始证明. 首先取 $x = \frac{1}{n}$ 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{1}{n}\right)^k \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-k} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - \frac{1}{n}}{1 - \frac{2}{n}} \left(\left(1 - \frac{1}{n}\right)^n - \left(\frac{1}{n}\right)^n \right) = \frac{1}{e}$$

由此可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \sup_{x \in [0, 1]} \sum_{k=1}^{n-1} x^k (1-x)^{n-k} \geq \frac{1}{e}$, 下面估计上极限. 根据对称性, 不妨只考虑 $x \in \left[0, \frac{1}{2}\right]$, 对任意 $\delta \in \left(0, \frac{1}{2}\right)$ 取定, 当 $x \in \left[\delta, \frac{1}{2}\right]$ 时总有

$$n \sum_{k=1}^{n-1} x^k (1-x)^{n-k} \leq n \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{1}{2}\right)^k (1-\delta)^{n-k} \leq n(1-\delta)^n \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{1}{2(1-\delta)}\right)^k = \frac{n(1-\delta)^n}{1 - \frac{1}{2(1-\delta)}}$$

当 $x \in [0, \delta]$ 时, 结合均值不等式有

$$n \sum_{k=1}^{n-1} x^k (1-x)^{n-k} = \frac{nx(1-x)}{1-2x} ((1-x)^n - x^n) \approx \frac{nx(1-x)^n}{1-2\delta} \leq \frac{\left(1 - \frac{1}{n+1}\right)^{n+1}}{1-2\delta} \leq \frac{1}{e} \frac{1}{1-2\delta}$$

所以可以取 $n > N$ 充分大, 使得 $\frac{n(1-\delta)^n}{1 - \frac{1}{2(1-\delta)}} < \frac{1}{e}$, 此时便有

$$n \sup_{x \in [0,1]} \sum_{k=1}^{n-1} x^k (1-x)^{n-k} \leq \frac{1}{e} \frac{1}{1-2\delta} \Rightarrow \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} n \sup_{x \in [0,1]} \sum_{k=1}^{n-1} x^k (1-x)^{n-k} \leq \frac{1}{e} \frac{1}{1-2\delta}$$

最后, 根据 δ 的任意性, 可知结论成立. \square

例题 2.135 设 $x_n > 0, k$ 为正整数, 证明: $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{n+k}}{x_n} \geq \frac{(k+1)^{k+1}}{k^k}$ 且常数是最佳的.

笔记 此类问题反证法将会带来一个恒成立的不等式, 有很强的效果, 所以一般都用反证法, 证明的灵感来源于 $k=1$ 时的情况.

证明 设 $S_n = x_1 + x_2 + \dots + x_n$, 采用反证法, 则存在 N 使得 $n \geq N$ 时恒成立

$$S_{n+k} \leq \lambda(S_n - S_{n-1}), \lambda \in \left[1, \frac{(k+1)^{k+1}}{k^k}\right)$$

显然 S_n 是单调递增的, 如果 S_n 有界, 则在不等式两端取极限可知 S_n 收敛到零, 矛盾, 所以 S_n 严格单调递增趋于正无穷, 因此对任意 $n \geq N$ 有 $S_n > S_{n-1}$. 如果已经得到了 $S_n > cS_{n-1}$ 对任意 $n \geq N$ 恒成立, 这里 c 是正数, 则对任意 $n \geq N$ 有

$$\begin{aligned} S_{n+k} &> cS_{n+k-1}, S_{n+k-1} > cS_{n+k-2}, \dots, S_{n+1} > cS_n \Rightarrow S_{n+k} > c^k S_n \\ 0 < S_{n+k} - c^k S_n &\leq (\lambda - c^k)S_n - \lambda S_{n-1} \Rightarrow S_n > \frac{\lambda}{\lambda - c^k} S_{n-1} \end{aligned}$$

这样不等式就加强了, 记 $c' = \frac{\lambda}{\lambda - c^k}$, 我们得到 $S_n > c'S_{n-1}$ 对任意 $n \geq N$ 恒成立. 定义数列 u_n 为 $u_1 = 1, u_{n+1} = \frac{\lambda}{\lambda - u_n^k}$, 则重复以上过程可知 $S_n > u_m S_{n-1}$ 对任意 m 以及 $n \geq N$ 都恒成立, 所以 u_m 这个数列必须是有界的, 下面我们就由此导出矛盾. 因为 $u_{n+1} > u_n \Leftrightarrow (\lambda - u_n^k)u_n < \lambda \Leftrightarrow (\lambda - u_n^k)^k u_n^k < \lambda^k$, 由均值不等式有

$$kx^k(\lambda - x^k)^k \leq \left(\frac{k\lambda}{k+1}\right)^{k+1} < k\lambda^k \Leftrightarrow \lambda < \frac{(k+1)^{k+1}}{k^k}$$

显然成立, 所以 u_m 单调递增, 而如果极限存在, 则极限点满足方程 $x = \frac{\lambda}{\lambda - x^k} \Leftrightarrow x(\lambda - x^k) = \lambda$, 这与前面均值不等式导出的结果矛盾, 所以 u_m 单调递增趋于正无穷, 又与有界性矛盾. 综上结论得证. \square

例题 2.136 设 $x_n > 0, x_n \rightarrow 0$ 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln x_n}{x_1 + x_2 + \dots + x_n} = a < 0$, 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln x_n}{\ln n} = -1$.

证明 不妨设 $a = -1$, 否则将 x_n 换成 x_n^k 即可, 取 k 将 a 变成 -1 .

设 $S_n = x_1 + x_2 + \dots + x_n$, 则 $S_n > 0$ 严格单调递增, 如果 S_n 收敛, 则 $\ln x_n \rightarrow -\infty$ 与条件矛盾, 所以 S_n 单调递增趋于正无穷.

因为 $\frac{\ln x_n}{\ln n} = \frac{\ln x_n}{S_n} \frac{S_n}{\ln n}, \frac{\ln x_n}{S_n} \rightarrow -1$, 所以等价的只要证明 $\frac{S_n}{\ln n} \rightarrow 1$.

条件为 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln x_n}{S_n} = -1$, 设想作为等式, 对应着 $S_n - S_{n-1} = e^{-S_n}$ 是一个隐函数类型的递推式, 不方便使用, 所以考虑

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln x_{n+1}}{S_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln x_{n+1}}{S_{n+1}} \frac{S_{n+1}}{S_n} = - \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x_{n+1}}{S_n}\right) = -1$$

现在等价的, 已知 S_n 单调递增趋于无穷且 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln(S_{n+1} - S_n)}{S_n} = -1$, 要证明 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n}{\ln n} = 1$. 由极限定义, 对任意 $\varepsilon > 0$, 存在 N 使得任意 $n > N$ 都有 $(-1 - \varepsilon)S_n < \ln(S_{n+1} - S_n) < (-1 + \varepsilon)S_n$ 也即

$$\left(\frac{1}{e} - \varepsilon\right)^{S_n} + S_n < S_{n+1} < \left(\frac{1}{e} + \varepsilon\right)^{S_n} + S_n, \forall n \geq N$$

不妨要求 $S_N > 1$, 考虑

$$f(x) = \left(\frac{1}{e} + \varepsilon\right)^x + x, f'(x) = 1 + \left(\frac{1}{e} + \varepsilon\right)^x \ln\left(\frac{1}{e} + \varepsilon\right) > 1 - \left(\frac{1}{e} + \varepsilon\right)^x > 0$$

再定义 $u_N = S_N$, $u_{n+1} = \left(\frac{1}{e} + \varepsilon\right)^{u_n} + u_n$, 于是若有 $u_n \leq S_n$ 则结合单调性可知 $u_{n+1} = f(u_n) \leq f(S_n) = S_{n+1}$, 这说明 $S_n \leq u_n$ 对任意 $n \geq N$ 恒成立. 同样考虑

$$g(x) = \left(\frac{1}{e} - \varepsilon\right)^x + x, g'(x) = 1 - \left(\frac{1}{e} - \varepsilon\right)^x \ln\left(\frac{1}{e} - \varepsilon\right) \geq 1 - \left(\frac{1}{e} - \varepsilon\right) \ln\left(\frac{1}{e} - \varepsilon\right) > 0$$

再定义 $v_N = S_N$, $v_{n+1} = \left(\frac{1}{e} - \varepsilon\right)^{v_n} + v_n$, 同样道理 $S_n \geq v_n$ 恒成立, 于是 $\frac{v_n}{\ln n} \leq \frac{S_n}{\ln n} \leq \frac{u_n}{\ln n}, n \geq N$.

注意 u_n, v_n 具备完全一样的形式, 所以统一的考虑 $a_1 > 1, a_{n+1} = a_n + e^{ca_n}$, 其中 c 在 $\frac{1}{e}$ 附近, 显然这个数列是单调递增趋于正无穷的, 我们用 stolz 公式来计算相应的极限, 则有

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln a_n}{n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln a_{n+1} - \ln a_n}{1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e^{-ca_n}}{c^{-a_n} - 1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{c^{-a_{n+1}} - c^{-a_n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{e^{-ca_n}(c^{-(a_{n+1}-a_n)} - 1)} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e^{ca_n}}{c^{-e^{ca_n}} - 1} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^{cx}}{e^{-x \ln c} - 1} = \lim_{x \rightarrow 0+} \frac{x}{e^{-x \ln c} - 1} = \frac{1}{-\ln c} \end{aligned}$$

所以

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_n}{\ln n} = \frac{1}{-\ln(\frac{1}{e} + \varepsilon)} = \frac{1}{1 - \ln(1 + e\varepsilon)}, \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{v_n}{\ln n} = \frac{1}{-\ln(\frac{1}{e} - \varepsilon)} = \frac{1}{1 - \ln(1 - e\varepsilon)}$$

这意味着

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n}{\ln n} \leq \frac{1}{1 - \ln(1 + e\varepsilon)}, \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n}{\ln n} \geq \frac{1}{1 - \ln(1 - e\varepsilon)}, \forall \varepsilon > 0$$

由此可知结论成立. □

例题 2.137 设 $n \in \mathbb{N}$, 计算

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x \sqrt{\cos(2x)} \cdot \sqrt[3]{\cos(3x)} \cdots \sqrt[n]{\cos(nx)}}{x^2}.$$

解 由 Taylor 公式知

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2} + o(x^2), x \rightarrow 0.$$

$$\sqrt[4]{1+x} = 1 + \frac{x}{4} + o(x), x \rightarrow 0.$$

于是

$$\sqrt[4]{\cos x} = \sqrt[4]{1 - \frac{x^2}{2} + o(x^2)} = 1 + \frac{-\frac{x^2}{2} + o(x^2)}{4} + o(x^2) = 1 - \frac{k}{2}x^2 + o(x^2), x \rightarrow 0.$$

从而

$$\prod_{k=1}^n \sqrt[4]{\cos kx} = \prod_{k=1}^n \left(1 - \frac{k}{2}x^2 + o(x^2)\right) = 1 - \left(\sum_{k=1}^n \frac{k}{2}\right)x^2 + o(x^2), x \rightarrow 0.$$

故

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \prod_{k=1}^n \sqrt[4]{\cos kx}}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\left(\sum_{k=1}^n \frac{k}{2}\right)x^2 + o(x^2)}{x^2} = \frac{n(n+1)}{4}.$$
□

例题 2.138 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n + \sqrt{i}}\right).$$

 **笔记** 注意到

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n + \sqrt{i}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{i}}{n}},$$

对 $\forall i \in \mathbb{N}$, 都有

$$\frac{\sqrt{i}}{n} \leq \frac{1}{\sqrt{n}} \rightarrow 0, n \rightarrow \infty.$$

故 $\sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{i}}{n}}$ 中的每一项 $\frac{1}{1 + \frac{\sqrt{i}}{n}}$ 都可以 Taylor 展开.

解 由 Taylor 公式知

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n + \sqrt{i}} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{i}}{n}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{\sqrt{i}}{n} + \frac{i}{n^2} + O\left(\frac{i\sqrt{i}}{n^3}\right) \right) \\ &= \frac{1}{n} \left[n - \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{i}}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n i}{n^2} + nO\left(\frac{1}{n\sqrt{n}}\right) \right] \\ &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{i}}{n^2} + \frac{n+1}{2n^2} + O\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right) \\ &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{i}}{n^2} + O\left(\frac{1}{n}\right). \end{aligned}$$

于是

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n + \sqrt{i}} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{i}}{n\sqrt{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{i}{n}} = \int_0^1 \sqrt{x} dx = \frac{2}{3}.$$

□

例题 2.139 设 $f \in R[0, 1]$, 证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (-1)^k f\left(\frac{k}{n}\right) = 0.$$

笔记 注意 $\frac{2k}{2n-1}, \frac{2k-1}{2n-1} \in \left[\frac{k}{n}, \frac{k+1}{n}\right]$.

证明 注意到

$$\begin{aligned} \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^{2n} (-1)^k f\left(\frac{k}{2n}\right) &= \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n f\left(\frac{2k}{2n}\right) - \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n f\left(\frac{2k-1}{2n}\right) \\ &= \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n f\left(\frac{k}{n}\right) - \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n f\left(\frac{k-\frac{1}{2}}{n}\right) \\ &\rightarrow \frac{1}{2} \int_0^1 f(x) dx - \frac{1}{2} \int_0^1 f(x) dx = 0, n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2n-1} \sum_{k=1}^{2n-1} (-1)^k f\left(\frac{k}{2n-1}\right) &= \frac{1}{2n-1} \sum_{k=1}^{n-1} f\left(\frac{2k}{2n-1}\right) - \frac{1}{2n-1} \sum_{k=1}^n f\left(\frac{2k-1}{2n-1}\right) \\ &= \frac{n}{2n-1} \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} f\left(\frac{2k}{2n-1}\right) - \frac{n}{2n-1} \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f\left(\frac{2k-1}{2n-1}\right) \\ &\rightarrow \frac{1}{2} \int_0^1 f(x) dx - \frac{1}{2} \int_0^1 f(x) dx = 0, n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

故由子列极限命题 (b) 可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (-1)^k f\left(\frac{k}{n}\right) = 0.$$

□

例题 2.140 设 $x_{n+1} = x_n - x_n^3$, $x_1 \in \mathbb{R}$, 判断 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 收敛性.

笔记 因为递推函数 $g(x) = x(1 - x^2)$ 关于原点对称, 而 $\{x_n\}$ 的敛散性只由 x_1 决定, 所以我们只需要考虑 $x_1 > 0$ 的情况即可, 由于 $g(x)$ 关于原点对称, 故 $x_1 < 0$ 的情况和 $x_1 > 0$ 的情况类似. 因此我们可以直接考虑数列 $\{|x_n|\}$. 这样能避免很多分类讨论. 注意这个递推函数 $g(x)$ 只有一个不动点 $x = 0$.

如果不加绝对值, 原递推函数的蛛网图会比较杂乱, 加上绝对值后讨论会比较清晰. 实际上, 通过蛛网图分析, 也能得到使得 $\{x_n\}$ 发散的 x_1 的临界点满足 $g(x_1) = x_2, g(x_2) = x_1$, 即 $g(g(x_1)) = x_1$. 于是就有

$$-x_1^6 + 3x_1^4 - 3x_1^2 + 2 = 0. \quad (2.155)$$

但是当 $x_1 = \pm 1, \pm 2$ 上式不成立, 故上述方程没有有理根. 令 $t = x_1^2$, 则上式可化为

$$-t^3 + 3t^2 - 3t + 2 = 0.$$

当 $t = 2$ 时, 上式成立. 故上式可化为

$$(t - 2)(-t^2 + t - 1) = 0.$$

因此上式只有一个实根 $t = 2$, 即(2.155)式只有当 $x_1^2 = 2$ 时才有实根. 故(2.155)式只有两个实根 $x_1 = \pm\sqrt{2}$.

考虑 $|x_{n+1}| = |x_n - x_n^3| = |x_n||1 - x_n^2|$, 记 $f(x) = x|1 - x^2|$, 则 $f(x)$ 有两个不动点 $x = \pm\sqrt{2}$.

证明 考虑 $|x_{n+1}| = |x_n - x_n^3| = |x_n||1 - x_n^2|$, 则

(1) 当 $|x_1| > \sqrt{2}$ 时, 则 $|x_{n+1}| = |x_n||x_n^2 - 1| \geq |x_n| > \sqrt{2}$. 故此时 $\{|x_n|\}$ 递增, 且有下界 $\sqrt{2}$. 而 f 没有大于 $\sqrt{2}$ 的不动点, 因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_n| = +\infty$.

(2) 当 $|x_1| \leq \sqrt{2}$ 时, 则 $|x_{n+1}| = |x_n||x_n^2 - 1| \leq |x_n| \leq \sqrt{2}$. 故此时 $\{|x_n|\}$ 递减, 且有下界 $\sqrt{2}$. 于是 $A \triangleq \lim_{n \rightarrow \infty} |x_n|$ 存在. 对 $|x_{n+1}| = |x_n||x_n^2 - 1|$ 两边同时取极限得 $A = 0$ 或 $\sqrt{2}$.

(i) 若 $A = 0$, 则由 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_n| = A = 0$ 可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$.

(ii) 若 $A = \sqrt{2}$, 则由 $\{|x_n|\}$ 递减, 且 $|x_n| \leq \sqrt{2}$ 知 $\sqrt{2} = \lim_{n \rightarrow \infty} |x_n| \leq |x_n| \leq \sqrt{2} \Rightarrow |x_n| = \sqrt{2}, n = 1, 2, \dots$. 此时 $x_1 = \pm\sqrt{2}$, 再代入 $x_{n+1} = x_n - x_n^3$ 得 $x_n = (-1)^n x_1, n = 2, 3, \dots$. 故此时 $\{x_n\}$ 发散.

综上

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \begin{cases} \text{发散}, & |x_1| \geq \sqrt{2} \\ 0, & |x_1| < \sqrt{2} \end{cases}.$$

□

例题 2.141 设函数 $f : [a, b] \rightarrow [a, b]$ 满足

$$|f(x) - f(y)| \leq |x - y|, \forall x, y \in [a, b]$$

设递推

$$x_1 \in [a, b], x_{n+1} = \frac{1}{2}(x_n + f(x_n)), n = 1, 2, \dots$$

证明 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 存在.

证明 由于 $a \leq f(x) \leq b$, 因此归纳易得 $a \leq x_n \leq b$. 令 $g(x) = \frac{x + f(x)}{2}$, 则

$$g(y) - g(x) = \frac{y - x - [f(y) - f(x)]}{2} \geq 0, \forall y \geq x.$$

由命题 2.17 可知递增递推数列 $\{x_n\}$ 一定单调, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 存在.

□

例题 2.142 设 $f(x) \in C[0, 1]$, $f(x) > 0$, 证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^1 f^{n+1}(x) dx}{\int_0^1 f^n(x) dx} = \max_{[0, 1]} f.$$

笔记 回顾例题 2.116 和 命题 2.13. 因此我们只需证明命题 2.13 的反向, 再结合例题 2.116 就能得证. 但是反向 Stolz

定理一般不会直接应用, 因此我们可以尝试利用单调有界定理证明比值极限存在, 再利用命题 2.13 就能直接得证.

实际上, 只要证明了单调性, 就能利用反向 Stolz 定理证明命题 2.13 的反向也成立, 再利用例题 2.116 就能得到结论.

证明 注意到

$$\frac{\int_0^1 f^{n+2}(x)dx}{\int_0^1 f^{n+1}(x)dx} \geq \frac{\int_0^1 f^{n+1}(x)dx}{\int_0^1 f^n(x)dx} \iff \int_0^1 f^{n+2}(x)dx \int_0^1 f^n(x)dx \geq \left(\int_0^1 f^{n+1}(x)dx \right)^2. \quad (2.156)$$

由 Cauchy 不等式知

$$\int_0^1 f^{n+2}(x)dx \int_0^1 f^n(x)dx \geq \left(\int_0^1 f^{\frac{n+2}{2}}(x) f^{\frac{n}{2}}(x) dx \right)^2 = \left(\int_0^1 f^{n+1}(x)dx \right)^2.$$

故(2.156)式成立, 即 $\left\{ \frac{\int_0^1 f^{n+1}(x)dx}{\int_0^1 f^n(x)dx} \right\}_{n=0}^{\infty}$ 单调递增. 因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^1 f^{n+1}(x)dx}{\int_0^1 f^n(x)dx} \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$. 由例题 2.116 可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\int_0^1 f^n(x)dx} = \max_{[0,1]} f.$$

再根据命题 2.13 可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^1 f^{n+1}(x)dx}{\int_0^1 f^n(x)dx} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\int_0^1 f^n(x)dx} = \max_{[0,1]} f.$$

□

例题 2.143

1. 设 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset (0, +\infty)$ 满足

$$x_n + \frac{1}{x_{n+1}} < 2, \quad n = 1, 2, \dots$$

证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 存在并求极限.

2. 设 $\{a_n\}_{n=1}^{\infty} \subset (0, +\infty)$ 满足

$$a_{n+1} + \frac{4}{a_n} < 4, \quad n = 1, 2, \dots$$

证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ 存在并求极限.

3. 设 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset (0, +\infty)$ 满足

$$x_n + \frac{4}{x_{n+1}^2} < 3, \quad n = 1, 2, \dots$$

证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 存在并求极限.

4. 设 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset (0, +\infty)$ 满足

$$\ln x_n + \frac{1}{x_{n+1}} < 1, \quad n = 1, 2, \dots$$

证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 存在并求极限.

 **笔记** 此类问题其实就是把 x_{n+1}, x_n 部分全部换成 x , 数字部分往往是 x 部分的一个最值, 从把这个数字用不等式放缩为数列来得到估计.

证明

1. 由均值不等式可知

$$x_n + \frac{1}{x_{n+1}} < 2 \leq x_{n+1} + \frac{1}{x_{n+1}} \Rightarrow x_{n+1} \geq x_n.$$

并且 $x_n < 2 - \frac{1}{x_{n+1}} < 2$, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n \triangleq x$ 存在. 于是

$$2 \leq x + \frac{1}{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(x_n + \frac{1}{x_{n+1}} \right) \leq 2 \Rightarrow x + \frac{1}{x} = 2 \Rightarrow x = 1.$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 1$.

2.

3.

4.

□

例题 2.144 设 $f(x) \in C^1(\mathbb{R})$, $|f(x)| \leq 1$, $f'(x) > 0$, 证明: 对任意 $b > a > 0$ 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f' \left(nx - \frac{1}{x} \right) dx = 0.$$

证明 证法一:

$$\begin{aligned} \int_a^b f' \left(nx - \frac{1}{x} \right) dx &= \int_a^b \frac{1}{n + \frac{1}{x^2}} \left(n + \frac{1}{x^2} \right) f' \left(nx - \frac{1}{x} \right) dx = \int_a^b \frac{1}{n + \frac{1}{x^2}} df \left(nx - \frac{1}{x} \right) \\ &= \frac{f \left(nb - \frac{1}{b} \right) - f \left(na - \frac{1}{a} \right)}{n + \frac{1}{b^2}} + \int_a^b f \left(nx - \frac{1}{x} \right) \frac{2}{x^3 \left(n + \frac{1}{x^2} \right)^2} dx \\ &\leq \frac{1}{n + \frac{1}{b^2}} + \frac{1}{n + \frac{1}{a^2}} + \frac{2}{a^3 \left(n + \frac{1}{b^2} \right)^2} \int_a^b f \left(nx - \frac{1}{x} \right) dx \\ &\leq \frac{1}{n + \frac{1}{b^2}} + \frac{1}{n + \frac{1}{a^2}} + \frac{2(b-a)}{a^3 \left(n + \frac{1}{b^2} \right)^2} \rightarrow 0, n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

证法二: 令 $y = nx - \frac{1}{x}$, 则 $x = \frac{y + \sqrt{y^2 + 4n}}{2n} > a > 0$. 于是

$$\begin{aligned} \int_a^b f' \left(nx - \frac{1}{x} \right) dx &= \int_{na - \frac{1}{a}}^{nb - \frac{1}{b}} f'(y) \frac{1 + \frac{y}{\sqrt{y^2 + 4n}}}{2n} dy = \int_{na - \frac{1}{a}}^{nb - \frac{1}{b}} \frac{1 + \frac{y}{\sqrt{y^2 + 4n}}}{2n} df(y) \\ &= \frac{1 + \frac{nb - \frac{1}{b}}{\sqrt{(nb - \frac{1}{b})^2 + 4n}}}{2n} f \left(nb - \frac{1}{b} \right) - \frac{1 + \frac{na - \frac{1}{a}}{\sqrt{(na - \frac{1}{a})^2 + 4n}}}{2n} f \left(na - \frac{1}{a} \right) - \int_{na - \frac{1}{a}}^{nb - \frac{1}{b}} f(y) \frac{\sqrt{y^2 + 4n} + \frac{y^2}{\sqrt{y^2 + 4n}}}{4n^2(y^2 + 4n)} dy \\ &\leq \frac{1 + \frac{nb - \frac{1}{b}}{\sqrt{(nb - \frac{1}{b})^2 + 4n}}}{2n} + \frac{1 + \frac{na - \frac{1}{a}}{\sqrt{(na - \frac{1}{a})^2 + 4n}}}{2n} + \int_{na - \frac{1}{a}}^{nb - \frac{1}{b}} \frac{\sqrt{(nb - \frac{1}{b})^2 + 4n} + \frac{(nb - \frac{1}{b})^2}{\sqrt{(nb - \frac{1}{b})^2 + 4n}}}{4n^2((na - \frac{1}{a})^2 + 4n)} dy \\ &\rightarrow 0, n \rightarrow +\infty. \end{aligned}$$

□

例题 2.145 求极限

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty \frac{\sin nx}{x} e^{-x} dx.$$

证明 证法一: 对 $\forall \delta > 0$, 我们有

$$\int_\delta^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx < \frac{1}{\delta} \int_\delta^\infty \frac{1}{e^x} dx < +\infty.$$

于是由 Riemann 引理 可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_\delta^\infty \frac{\sin nx}{x} e^{-x} dx = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin x dx \int_\delta^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx = 0.$$

注意到

$$\int_0^\delta \frac{\sin nx}{x} e^{-x} dx \sim \int_0^\delta \frac{\sin nx}{x} dx, \delta \rightarrow 0^+,$$

$$\int_0^\delta \frac{\sin nx}{x} dx = \int_0^{n\delta} \frac{\sin x}{x} dx \rightarrow \int_0^\infty \frac{\sin x}{x} dx \xrightarrow{\text{命题 8.3(2)}} \frac{\pi}{2}, n \rightarrow \infty,$$

故

$$\int_0^\infty \frac{\sin nx}{x} e^{-x} dx = \int_0^\delta \frac{\sin nx}{x} e^{-x} dx + \int_\delta^\infty \frac{\sin nx}{x} e^{-x} dx = \frac{\pi}{2}.$$

证法二: 记 $p(x) = \frac{e^{-x} - 1}{x}$, $p(0) = -1$, 则 $p(x)$ 可导, 并且

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \frac{\sin nx}{x} e^{-x} dx &= \int_0^\infty \frac{e^{-x} - 1}{x} \sin nx dx + \int_0^\infty \frac{\sin nx}{x} dx \stackrel{\text{命题 8.3(2)}}{=} \int_0^\infty p(x) \sin nx dx + \frac{\pi}{2} \\ &= \frac{\pi}{2} - \int_0^\infty p(x) d\frac{\cos nx}{n} = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{n} \left(1 - \int_0^\infty p'(x) \cos nx dx \right). \end{aligned}$$

求导有 $p'(x) = \frac{1 - xe^{-x} - e^{-x}}{x^2}$, $p'(0) = \frac{1}{2}$, 所以 $\left| \int_0^\infty p'(x) \cos nx dx \right| \leq \int_0^\infty \frac{1 - xe^{-x} - e^{-x}}{x^2} dx < \infty$. 由此可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty \frac{\sin nx}{x} e^{-x} dx = \frac{\pi}{2}.$$

□

例题 2.146 设 $f(x), g(x) \in C[0, 1]$ 且 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{g(x)}{x}$ 为有限数, 证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 f(x) g(x^n) dx = f(1) \int_0^1 \frac{g(x)}{x} dx.$$

证明 证法一: 注意到

$$n \int_0^1 f(x) g(x^n) dx = \int_0^1 f(x^{\frac{1}{n}}) g(x) x^{\frac{1}{n}-1} dx = \int_0^1 \frac{g(x)}{x} \cdot x^{\frac{1}{n}} f(x^{\frac{1}{n}}) dx.$$

令 $h(x) \triangleq \begin{cases} \frac{g(x)}{x}, & x \neq 0 \\ \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{g(x)}{x}, & x = 0 \end{cases}$, 则 $h \in C[0, 1]$. 从而

$$n \int_0^1 f(x) g(x^n) dx = \int_0^1 h(x) \cdot x^{\frac{1}{n}} f(x^{\frac{1}{n}}) dx.$$

$\forall \varepsilon > 0$, 取 $\delta = \varepsilon$, 对 $\forall x \in [\delta, 1]$, 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} x^{\frac{1}{n}} = 1$ 及 $f \in C[0, 1]$ 可知, 存在 $N > 0$, 使得

$$\left| x^{\frac{1}{n}} - 1 \right| < \varepsilon, \quad \left| f(x^{\frac{1}{n}}) - f(1) \right| < \varepsilon, \quad \forall n > N.$$

设 $|h(x)|, |f(x)| \leq M \in \mathbb{R}$, 则

$$\begin{aligned} &\left| \int_0^1 h(x) \cdot x^{\frac{1}{n}} f(x^{\frac{1}{n}}) dx - f(1) \int_0^1 h(x) dx \right| = \left| \int_0^1 h(x) \left[x^{\frac{1}{n}} f(x^{\frac{1}{n}}) - f(1) \right] dx \right| \\ &\leq \int_0^\delta |h(x)| \left| x^{\frac{1}{n}} f(x^{\frac{1}{n}}) - f(1) \right| dx + \int_\delta^1 |h(x)| \left| x^{\frac{1}{n}} f(x^{\frac{1}{n}}) - f(1) \right| dx \\ &\leq 2M^2 \delta + \int_\delta^1 |h(x)| \left[\left| x^{\frac{1}{n}} f(x^{\frac{1}{n}}) - x^{\frac{1}{n}} f(1) \right| + \left| x^{\frac{1}{n}} f(1) - f(1) \right| \right] dx \\ &= 2M^2 \delta + \int_\delta^1 |h(x)| \left[x^{\frac{1}{n}} \left| f(x^{\frac{1}{n}}) - f(1) \right| + f(1) \left| x^{\frac{1}{n}} - 1 \right| \right] dx \\ &< 2M^2 \varepsilon + \int_\varepsilon^1 M [1 + f(1)] \varepsilon dx = (2M^2 + M [1 + f(1)] (1 - \varepsilon)) \varepsilon. \end{aligned}$$

故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^1 h(x) \cdot x^{\frac{1}{n}} f(x^{\frac{1}{n}}) dx = f(1) \int_0^1 h(x) dx.$$

即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^1 f(x) g(x^n) dx = f(1) \int_0^1 \frac{g(x)}{x} dx.$$

证法二: 因为可以用在两个端点, 插值于 f 的多项式 (f 的 Bernstein 多项式也可以) 在 $[0, 1]$ 上一致逼近 f , 所以只需对连续可导的函数 f 证明.

对 $x \in (0, 1]$ 定义 $G(x) = \int_0^x \frac{g(t)}{t} dt$, 则 G 可导, 且 $G'(x) = \frac{g(x)}{x}$. 因而 $\left(\frac{1}{n}G(x^n)\right)' = \frac{g(x^n)}{x}$. 用分部积分法, 得

$$\begin{aligned} n \int_0^1 f(x)g(x^n) dx &= n \int_0^1 x f(x) \cdot \frac{g(x^n)}{x} dx \\ &= n \left[x f(x) \cdot \frac{1}{n} G(x^n) \right]_0^1 - \int_0^1 (f(x) + x f'(x)) \frac{1}{n} G(x^n) dx \\ &= f(1)G(1) - \int_0^1 (f(x) + x f'(x)) G(x^n) dx \\ &= f(1) \int_0^1 \frac{g(x)}{x} dx - \int_0^1 (f(x) + x f'(x)) G(x^n) dx. \end{aligned}$$

因为 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{g(x)}{x}$ 收敛, 所以存在 $M > 0$, 使得

$$|f(x) + x f'(x)| \leq M, \quad G'(x) = \frac{|g(x)|}{x} \leq M \quad (x \in [0, 1]).$$

因此 $|G(x)| \leq Mx$.

故

$$\left| \int_0^1 (f(x) + x f'(x)) G(x^n) dx \right| \leq M^2 \int_0^1 x^n dx = \frac{M^2}{n+1} \rightarrow 0, n \rightarrow \infty.$$

因此

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} n \int_0^1 f(x)g(x^n) dx = f(1) \int_0^1 \frac{g(x)}{x} dx.$$

□

例题 2.147 设 $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, 且 $f(0) = 0$, 当 $x \neq 0$ 时, $f(x) = \int_0^x \cos \frac{1}{t} \cos \frac{3}{t} \cos \frac{5}{t} \cos \frac{7}{t} dt$, 求证: f 是可导的, 并求 $f'(0)$.



笔记 此类问题一般都是利用 Riemann 引理解决.

证明 由 Riemann 引理可知

$$\int_1^\infty \frac{\cos nx}{x^2} dx = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos x dx \int_1^\infty \frac{1}{x^2} dx = 0, \forall n \in \mathbb{N}.$$

于是

$$\begin{aligned} f'(0) &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(0)}{x - 0} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{x} \int_0^x \cos \frac{1}{t} \cos \frac{3}{t} \cos \frac{5}{t} \cos \frac{7}{t} dt \\ &\stackrel{t=\frac{1}{u}}{=} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{x} \int_{\frac{1}{x}}^\infty \frac{\cos u \cos 3u \cos 5u \cos 7u}{u^2} du = \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \lambda \int_\lambda^\infty \frac{\cos u \cos 3u \cos 5u \cos 7u}{u^2} du \\ &\stackrel{u=\lambda x}{=} \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \int_1^\infty \frac{\cos(\lambda x) \cos(3\lambda x) \cos(5\lambda x) \cos(7\lambda x)}{x^2} dx \\ &= \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \int_1^\infty \frac{\frac{1}{2} (\cos(2\lambda x) + \cos(4\lambda x)) \cos(5\lambda x) \cos(7\lambda x)}{x^2} dx \\ &= \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \int_1^\infty \frac{\frac{1}{4} (\cos(3\lambda x) + \cos(7\lambda x) + \cos(9\lambda x) + \cos(\lambda x)) \cos(7\lambda x)}{x^2} dx \\ &= \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \int_1^\infty \frac{\frac{1}{8} [\cos(16\lambda x) + \cos(14\lambda x) + \cos(10\lambda x) + \cos(6\lambda x) + \cos(4\lambda x) + \cos(2\lambda x) + 1]}{x^2} dx \\ &= \frac{1}{8} \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \int_1^\infty \frac{1}{x^2} dx = \frac{1}{8}. \end{aligned}$$

□

例题 2.148 证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(n \int_{n\pi}^{2n\pi} \frac{|\sin x|}{x^2} dx - \frac{1}{\pi^2} \right) = 0.$$

笔记 如果需要估计得更精确, 就需要利用 E-M 公式对 $\sum_{k=n}^{2n-1} \frac{1}{(x+k\pi)^2}$ 进行更精确的估计和计算.

证明 注意到

$$\begin{aligned} \int_{n\pi}^{2n\pi} \frac{|\sin x|}{x^2} dx &= \int_0^{n\pi} \frac{|\sin x|}{(x+n\pi)^2} dx = \sum_{k=1}^n \int_{(k-1)\pi}^{k\pi} \frac{|\sin x|}{(x+n\pi)^2} dx \\ &= \sum_{k=1}^n \int_0^\pi \frac{|\sin x|}{(x+(n+k-1)\pi)^2} dx = \int_0^\pi \sin x \sum_{k=1}^n \frac{1}{(x+(n+k-1)\pi)^2} dx \\ &= \int_0^\pi \sin x \sum_{k=n}^{2n-1} \frac{1}{(x+k\pi)^2} dx. \end{aligned}$$

对 $\forall x \in [0, \pi]$, 我们有

$$\sum_{k=n}^{2n-1} \frac{1}{[(k+1)\pi]^2} \leq \sum_{k=n}^{2n-1} \frac{1}{(x+k\pi)^2} \leq \sum_{k=n}^{2n-1} \frac{1}{(k\pi)^2}.$$

又因为

$$\frac{1}{k} - \frac{1}{k+1} = \frac{1}{k(k+1)} \leq \frac{1}{k^2} \leq \frac{1}{k(k-1)} = \frac{1}{k-1} - \frac{1}{k}, \forall k \in \mathbb{N},$$

所以一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_{n\pi}^{2n\pi} \frac{|\sin x|}{x^2} dx &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^\pi \sin x \sum_{k=n}^{2n-1} \frac{1}{(x+k\pi)^2} dx \leq \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^\pi \sin x \sum_{k=n}^{2n-1} \frac{1}{(k\pi)^2} dx \\ &\leq \frac{1}{\pi^2} \lim_{n \rightarrow \infty} n \sum_{k=n}^{2n-1} \left(\frac{1}{k-1} - \frac{1}{k} \right) \int_0^\pi \sin x dx \\ &= \frac{2}{\pi^2} \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{2n-1} \right) = \frac{1}{\pi^2}. \end{aligned}$$

另一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_{n\pi}^{2n\pi} \frac{|\sin x|}{x^2} dx &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^\pi \sin x \sum_{k=n}^{2n-1} \frac{1}{(x+k\pi)^2} dx \geq \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^\pi \sin x \sum_{k=n}^{2n-1} \frac{1}{[(k+1)\pi]^2} dx \\ &\geq \frac{1}{\pi^2} \lim_{n \rightarrow \infty} n \sum_{k=n}^{2n-1} \left(\frac{1}{k+1} - \frac{1}{k+2} \right) \int_0^\pi \sin x dx \\ &= \frac{2}{\pi^2} \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{1}{n+1} - \frac{1}{2n+1} \right) = \frac{1}{\pi^2}. \end{aligned}$$

故由夹逼准则可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(n \int_{n\pi}^{2n\pi} \frac{|\sin x|}{x^2} dx - \frac{1}{\pi^2} \right) = 0.$$

□

第3章 函数与微分

3.1 基本定理

常见的反例: $f(x) = x^m \sin \frac{1}{x^n}$.

定理 3.1 (Leibniz 公式)

$$(f(x)g(x))^{(n)} = \sum_{k=0}^n C_n^k f^{(n-k)}(x)g^{(k)}(x).$$



例题 3.1 设 $f(x)$ 定义在 $[0, 1]$ 中且 $\lim_{x \rightarrow 0^+} f\left(x\left(\frac{1}{x} - \left[\frac{1}{x}\right]\right)\right) = 0$, 证明: $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = 0$.

笔记 将极限定义中的 ε, δ 适当地替换成 $\frac{1}{n}, \frac{1}{N}$ 往往更方便我们分析问题和书写过程.

证明 用 $\{x\}$ 表示 x 的小数部分, 则 $x\left(\frac{1}{x} - \left[\frac{1}{x}\right]\right) = x\left\{\frac{1}{x}\right\}$.

对任意 $\varepsilon > 0$, 依据极限定义, 存在 $\delta > 0$ 使得任意 $x \in (0, \delta)$ 都有 $|f(x\{\frac{1}{x}\})| < \varepsilon$.

取充分大的正整数 N 使得 $\frac{1}{N} < \delta$, 则任意 $x \in \left(\frac{1}{N+1}, \frac{1}{N}\right)$ 都有 $|f(x\{\frac{1}{x}\})| < \varepsilon$.

考虑函数 $x\{\frac{1}{x}\}$ 在区间 $\left(\frac{1}{N+1}, \frac{1}{N}\right)$ 中的值域, 也就是连续函数

$$g(u) = \frac{u - [u]}{u} = \frac{u - N}{u}, u \in (N, N+1)$$

的值域, 考虑端点处的极限可知 $g(u)$ 的值域是 $\left(0, \frac{1}{N+1}\right)$, 且严格单调递增. 所以对任意 $y \in \left(0, \frac{1}{N+1}\right)$, 都存在 $x \in \left(\frac{1}{N+1}, \frac{1}{N}\right) \subset (0, \delta)$ 使得 $\frac{1}{x} = g^{-1}(y) \in (N, N+1)$, 即 $y = g\left(\frac{1}{x}\right) = x\left\{\frac{1}{x}\right\}$, 故 $|f(y)| = |f(x\{\frac{1}{x}\})| < \varepsilon$.

也就是说, 任意 $\varepsilon > 0$, 存在正整数 N , 使得任意 $y \in \left(0, \frac{1}{N+1}\right)$, 都有 $|f(y)| < \varepsilon$, 结论得证.



3.2 微分学计算

3.2.1 单变量微分学计算

例题 3.2

(1) 设 $f(x) = \prod_{k=0}^n (x - k)$. 对整数 $0 \leq j \leq n$, 求导数 $f'(j)$.

(2) 设 $g(x) = \prod_{k=0}^n (e^x - k)$, 求 $g'(\ln j), j = 0, 1, 2, \dots, n$.

解

(1) **解法一:** 注意到 $f'(x) = \sum_{i=0}^n \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^n (x - k)$, 故

$$f'(j) = \sum_{i=0}^n \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^n (j - k) = \prod_{k=0}^n (j - k) + \sum_{i=0}^n \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^n (j - k)$$

$$\begin{aligned}
&= (-1)^{n-j} j!(n-j)! + \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n (j-i) \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i, j}}^n (j-k) \\
&= (-1)^{n-j} j!(n-j)!
\end{aligned}$$

解法二：

$$\begin{aligned}
f'(j) &= \lim_{x \rightarrow j} \frac{f(x) - f(j)}{x - j} = \lim_{x \rightarrow j} \frac{\prod_{k=0}^n (x-k) - \prod_{k=0}^n (j-k)}{x - j} \\
&= \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^n (j-k) + \lim_{x \rightarrow j} \frac{(j-x) \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^n (j-k)}{x - j} \\
&= \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^n (j-k) = (-1)^{n-j} j!(n-j)!
\end{aligned}$$

(2) 记 $f(x) = \prod_{i=0}^n (x-i)$, 则 $g(x) = f(e^x)$. 从而 $g'(x) = e^x f'(e^x)$, 于是由 (1) 可知

$$g'(\ln j) = j f'(j) = j \cdot (-1)^{n-j} j!(n-j)!$$

□

例题 3.3 对 $n \in \mathbb{N}$,

- (1) 设 $f(x) = \sin(ax), a \in \mathbb{R}$, 求 $f^{(n)}$.
- (2) 设 $f(x) = e^x \cos x$, 求 $f^{(n)}$.
- (3) 设 $f(x) = \frac{\ln x}{x}$, 求 $f^{(n)}$.
- (4) 设 $f(x) = \frac{1}{1-x^2}$, 求 $f^{(n)}$.
- (5) 设 $f(x) = \arctan x, x > 0$, 求 $f^{(n)}$.

解

- (1) 我们断言

$$f^{(n)}(x) = a^n \sin\left(ax + \frac{n}{2}\pi\right), \quad \forall n \in \mathbb{N}. \quad (3.1)$$

当 $n=0$ 时, 上式显然成立. 假设当 $n=k$ 时上式成立, 则

$$f^{(k+1)}(x) = a^{k+1} \cos\left(ax + \frac{k}{2}\pi\right) = a^{k+1} \sin\left(ax + \frac{k+1}{2}\pi\right).$$

故由数学归纳法可知 (3.1) 式成立.

- (2) 由 Euler 公式可知 $\cos x = \operatorname{Re}(e^{ix})$, 从而 $f(x) = \operatorname{Re}[e^{(1+i)x}]$. 于是

$$f^{(n)}(x) = \operatorname{Re}[(1+i)^n e^{(1+i)x}], \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

注意到

$$1+i = \sqrt{2} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2}i \right) = \sqrt{2}e^{\frac{\pi}{4}i},$$

进而 $(1+i)^n = 2^{\frac{n}{2}} e^{\frac{n\pi}{4}i}$. 故

$$f^{(n)}(x) = \operatorname{Re}\left[2^{\frac{n}{2}} e^{\frac{n\pi}{4}i+(1+i)x}\right] = 2^{\frac{n}{2}} e^x \operatorname{Re}\left[e^{(x+\frac{n\pi}{4})i}\right] = 2^{\frac{n}{2}} e^x \cos\left(x + \frac{n\pi}{4}\right).$$

- (3) 令 $y = f(x) = \frac{\ln x}{x}$, 则 $\ln x = xy$. 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 两边同时对 x 求 n 阶导, 得

$$(\ln x)^{(n)} = (xy)^{(n)} \iff \frac{(-1)^{n-1}(n-1)!}{x^n} = \sum_{k=0}^n C_n^k x^{(k)} y^{(n-k)} = xy^{(n)} + ny^{(n-1)}.$$

从而对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$\begin{aligned} xy^{(n)} + ny^{(n-1)} &= \frac{(-1)^{n-1} (n-1)!}{x^n} \\ \iff (-1)^n x^{n+1} y^{(n)} - (-1)^{n-1} nx^n y^{(n-1)} &= -(n-1)! \\ \iff \frac{(-1)^n x^{n+1} y^{(n)}}{n!} - \frac{(-1)^{n-1} x^n y^{(n-1)}}{(n-1)!} &= -\frac{1}{n}. \end{aligned}$$

于是

$$\frac{(-1)^n x^{n+1} y^{(n)}}{n!} - xy = \sum_{k=1}^n \left(-\frac{1}{k} \right).$$

故

$$f^{(n)}(x) = y^{(n)} = \frac{(-1)^n n!}{x^{n+1}} \left(\sum_{k=1}^n \left(-\frac{1}{k} \right) - \ln x \right).$$

(4) 注意到 $f(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1-x} + \frac{1}{1+x} \right)$, 则 $f^{(n)}(x) = \frac{n!}{2} \left(\frac{1}{(1-x)^{n+1}} + \frac{(-1)^n}{(1+x)^{n+1}} \right)$.

(5) 注意到 $f'(x) = \frac{1}{1+x^2} = \frac{1}{2i} \left(\frac{1}{x-i} - \frac{1}{x+i} \right)$, 故

$$\begin{aligned} f^{(n)}(x) &= \left(\frac{1}{1+x^2} \right)^{(n-1)} = \frac{(-1)^{n-1} (n-1)!}{2i} \left[\frac{1}{(x-i)^n} - \frac{1}{(x+i)^n} \right] = \frac{(-1)^{n-1} (n-1)!}{2i (x^2+1)^n} [(x+i)^n - (x-i)^n] \\ &= \frac{(-1)^{n-1} (n-1)!}{2i (x^2+1)^n} \left[\left(\sqrt{1+x^2} e^{i \arctan \frac{1}{x}} \right)^n - \left(\sqrt{1+x^2} e^{-i \arctan \frac{1}{x}} \right)^n \right] \\ &= \frac{(-1)^{n-1} (n-1)!}{2i (x^2+1)^{\frac{n}{2}}} \left(e^{in \arctan \frac{1}{x}} - e^{-in \arctan \frac{1}{x}} \right) = \frac{(-1)^{n-1} (n-1)!}{2i (x^2+1)^{\frac{n}{2}}} \cdot 2i \cdot \sin \left(n \arctan \frac{1}{x} \right) \\ &= \frac{(-1)^{n-1} (n-1)!}{(x^2+1)^{\frac{n}{2}}} \sin \left(n \arctan \frac{1}{x} \right). \end{aligned}$$

□

例题 3.4 设 $f(x) = x^2 \ln(x + \sqrt{1+x^2})$, 计算 $f^{(n)}(0), n \in \mathbb{N}$.

笔记 此类问题都是通过背 Taylor 公式之后通过拼凑来得到 $f^{(n)}(0)$, 这是因为

$$f(x) \sim \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(0)}{n!} x^n.$$

解 注意到

$$\begin{aligned} \left[\ln \left(x + \sqrt{1+x^2} \right) \right]' &= (\operatorname{arcsinh} x)' = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} = (1+x^2)^{-\frac{1}{2}} \\ &\xrightarrow{\text{广义二项式定理}} \sum_{n=0}^{\infty} C_{-\frac{1}{2}}^n x^{2n}, \end{aligned}$$

于是

$$\begin{aligned} \ln \left(x + \sqrt{1+x^2} \right) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_{-\frac{1}{2}}^n}{2n+1} x^{2n+1} = x + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_{-\frac{1}{2}}^n}{2n+1} x^{2n+1} \\ &= x + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(-\frac{1}{2} \right) \left(-\frac{1}{2} - 1 \right) \cdots \left(-\frac{1}{2} - n + 1 \right)}{(2n+1) \cdot n!} x^{2n+1} \\ &= x + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (2n-1)!!}{(2n+1) \cdot n!} x^{2n+1}. \end{aligned}$$

从而 $f(x) = x^3 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (2n-1)!!}{(2n+1) \cdot n!} x^{2n+3}$, 因此

$$f^{(n)}(0) = \begin{cases} 6, & n = 3 \\ \frac{(-1)^m (2m-1)!! (2m+3)!}{m! \cdot 2^m (2m+1)}, & n = 2m+3, m = 1, 2, \dots \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

□

命题 3.1

$$\arcsin^2 x = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^{2n-1} ((n-1)!)^2}{(2n)!} x^{2n}, x \in (-1, 1).$$

◆

例题 3.5 生成级数或者建立递推法求解高阶导数值 对 $n \in \mathbb{N}_0$,

- (1) 设 $f(x) = \arcsin^2 x$, 求 $f^{(n)}(0)$.
- (2) 设 $f(x) = \arcsin x \cdot \arccos x$, 求 $f^{(n)}(0)$.
- (3) 设 $f(x) = (x + \sqrt{x^2 + 1})^m, m \in \mathbb{N}$, 求 $f^{(n)}(0)$.
- (4) 设 $f(x) = \arctan^2 x$, 求 $f^{(n)}(0)$.

笔记 此类问一般是先建立函数满足的微分方程, 然后用乘积求导法则或者形式幂级数对比系数来得到导数的递推, 从而完成了证明.

解

- (1) **解法一:** 注意到

$$f'(x) = \frac{2 \arcsin x}{\sqrt{1-x^2}} \iff \sqrt{1-x^2} f' = 2 \arcsin x,$$

令 $y = f(x)$, 则对上式两边同时求导得

$$-\frac{x}{\sqrt{1-x^2}} f' + \sqrt{1-x^2} f'' = \frac{2}{\sqrt{1-x^2}} \iff -xy' + (1-x^2)y'' = 2.$$

再对上式两边同时对 x 求 $n (n \geq 2)$ 阶导, 得

$$\begin{aligned} & [-xy' + (1-x^2)y'']^{(n)} = 2^{(n)} \\ \iff & -[ny^{(n)} + xy^{(n+1)}] + \left[\binom{n}{2} \cdot (-2)y^{(n)} + \binom{n}{1} (-2x)y^{(n+1)} + (1-x^2)y^{(n+2)} \right] = 0 \end{aligned}$$

将 $x = 0$ 代入上式得

$$f^{(n+2)}(0) = n^2 f^{(n)}(0), \forall n \geq 2. \quad (3.2)$$

显然上式对 $n = 1$ 也成立. 又注意到 $f''(0) = 2$, 因此对 $\forall n \in \mathbb{N}_1$, 由(3.2)式可得

$$\frac{f^{(2n+2)}(0)}{f^{(2n)}(0)} = 4n^2 \Rightarrow \frac{f^{(2n+2)}(0)}{f^{(2)}(0)} = \prod_{i=1}^n 4i^2 \Rightarrow f^{(2n+2)}(0) = 2^{2n+1}(n!)^2.$$

显然上式对 $n = 0$ 也成立. 故

$$f^{(2n+2)}(0) = 2^{2n+1}(n!)^2, \forall n \in \mathbb{N}_0.$$

又 $f'''(0) = 0$, 故由(3.2)式可得

$$f^{(2n-1)}(0) = (2n-1)^2 f^{(2n-3)}(0) = \dots = [(2n-1)!!]^2 f^{(3)}(0) = 0, \forall n \in \mathbb{N}_1.$$

解法二: 注意到

$$f'(x) = \frac{2 \arcsin x}{\sqrt{1-x^2}} \iff \sqrt{1-x^2} f' = 2 \arcsin x,$$

令 $y = f(x)$, 则对上式两边同时求导得

$$-\frac{x}{\sqrt{1-x^2}}f' + \sqrt{1-x^2}f'' = \frac{2}{\sqrt{1-x^2}} \iff -xy' + (1-x^2)y'' = 2. \quad (3.3)$$

因为 $f \in C^\infty(\mathbb{R})$, 所以由 Taylor 公式可知

$$y = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, \quad y' = \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^{n-1}, \quad y'' = \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1) a_n x^{n-2},$$

其中 $a_n = \frac{f^{(n)}(0)}{n!}$, $n \in \mathbb{N}_0$. 再将上式代入(3.3)式可得

$$\begin{aligned} 2 &= -\sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^n + \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1) a_n x^{n-2} - \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1) a_n x^n \\ &= -\sum_{n=0}^{\infty} n a_n x^n + \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^n - \sum_{n=0}^{\infty} n(n-1) a_n x^n \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} [(n+2)(n+1) a_{n+2} - n a_n - n(n-1) a_n] x^n. \end{aligned}$$

比较上式两边系数, 得对 $\forall n \in \mathbb{N}_1$, 都有

$$\begin{aligned} &(n+2)(n+1) a_{n+2} - n a_n - n(n-1) a_n = 0 \\ &\iff (n+2)(n+1) \cdot \frac{f^{(n+2)}(0)}{(n+2)!} - n \cdot \frac{f^{(n)}(0)}{n!} - n(n-1) \cdot \frac{f^{(n)}(0)}{n!} = 0 \\ &\iff f^{(n+2)}(0) = n^2 f^{(n)}(0). \end{aligned} \quad (3.4)$$

又 $f''(0) = 2$, 因此对 $\forall n \in \mathbb{N}_1$, 由 (3.4)式可得

$$\frac{f^{(2n+2)}(0)}{f^{(2n)}(0)} = 4n^2 \Rightarrow \frac{f^{(2n+2)}(0)}{f^{(2)}(0)} = \prod_{i=1}^n 4i^2 \Rightarrow f^{(2n+2)}(0) = 2^{2n+1}(n!)^2.$$

显然上式对 $n = 0$ 也成立. 故

$$f^{(2n+2)}(0) = 2^{2n+1}(n!)^2, \forall n \in \mathbb{N}_0.$$

又 $f'''(0) = 0$, 故由(3.4)式可得

$$f^{(2n-1)}(0) = (2n-1)^2 f^{(2n-3)}(0) = \cdots = [(2n-1)!!]^2 f^{(3)}(0) = 0, \forall n \in \mathbb{N}_1.$$

(2)

(3)

(4)

□

命题 3.2

设 f 在 a 处 $n+1$ 阶连续可导的, 证明:

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{d^n}{dx^n} \left[\frac{f(x) - f(a)}{x - a} \right] = \frac{f^{(n+1)}(a)}{n+1}.$$

▲

注 不妨设 $a = 0, f(a) = 0$ 的原因: 先证不妨设 $f(a) = 0$ 成立. 假设 $f(a) = 0$ 时结论成立, 则当 $f(a) \neq 0$ 时, 令 $g(x) = f(x) - f(a)$, 则 $g(a) = 0$, 从而由假设可知

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{d^n}{dx^n} \left[\frac{f(x) - f(a)}{x - a} \right] = \lim_{x \rightarrow a} \frac{d^n}{dx^n} \left[\frac{g(x)}{x - a} \right] = \frac{g^{(n+1)}(a)}{n+1} = \frac{f^{(n+1)}(a)}{n+1}.$$

故可以不妨设 $f(a) = 0$.

再证不妨设 $a = 0$ 成立. 假设 $a = 0$ 时结论成立, 则当 $a \neq 0$ 时, 令 $g(x) = f(x+a)$, 则由假设可知

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{d^n}{dx^n} \left[\frac{g(x)}{x} \right] = \frac{g^{(n+1)}(0)}{n+1}.$$

从而

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow a} \frac{d^n}{dx^n} \left[\frac{f(x)}{x-a} \right] &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{d^n}{dx^n} \left[\frac{f(x+a)}{x} \right] = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{d^n}{dx^n} \left[\frac{g(x)}{x} \right] \\ &= \frac{g^{(n+1)}(0)}{n+1} = \frac{f^{(n+1)}(a)}{n+1}. \end{aligned}$$

故可以不妨设 $a = 0$.

证明 不妨设 $a = 0, f(a) = 0$, 从而

$$\frac{d^n}{dx^n} \left[\frac{f(x)}{x} \right] = \sum_{k=0}^n C_n^k f^{(k)}(x) \frac{(-1)^{n-k} (n-k)!}{x^{n-k+1}} = \frac{n!(-1)^n}{x^{n+1}} \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} f^{(k)}(x) (-x)^k.$$

于是由 L'Hospital 法则可得

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{d^n}{dx^n} \left[\frac{f(x)}{x} \right] &= n!(-1)^n \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} f^{(k)}(x) (-x)^k}{x^{n+1}} \\ &\stackrel{\text{L'Hospital 法则}}{=} n!(-1)^n \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} f^{(k+1)}(x) (-x)^k - \sum_{k=1}^n \frac{1}{(k-1)!} f^{(k)}(x) (-x)^{k-1}}{(n+1)x^n} \\ &= n!(-1)^n \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} f^{(k+1)}(x) (-x)^k - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{(k)!} f^{(k+1)}(x) (-x)^k}{(n+1)x^n} \\ &= n!(-1)^n \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{n!} f^{(n+1)}(x) (-x)^n}{(n+1)x^n} \\ &= \frac{f^{(n+1)}(0)}{n+1}. \end{aligned}$$

□

例题 3.6 设 $f \in C^\infty(\mathbb{R}), n \in \mathbb{N}$ 满足

$$f^{(j)}(0) = 0, j = 0, 1, 2, \dots, n-1, f^{(n)}(0) \neq 0.$$

证明: $g(x) = \begin{cases} \frac{f(x)}{x^n}, & x \neq 0 \\ \frac{f^{(n)}(0)}{n!}, & x = 0 \end{cases}$ 在 \mathbb{R} 上无穷次可微.

笔记 本题不能对 Taylor 公式的 Peano 余项求导来说明 g 可微分性, 这是不严格的.

证明 当 $n = 0$ 时, $g = f \in C^\infty(\mathbb{R})$ 显然成立. 假设命题对 $n \in \mathbb{N}$ 成立, 考虑 $n+1$ 的情形. 令 $h(x) = \frac{f(x)}{x}$, 则

$$\frac{f(x)}{x^{n+1}} = \frac{\frac{f(x)}{x^n}}{x} = \frac{h(x)}{x^n}. \quad (3.5)$$

对 $\forall k \in \mathbb{N}$, 由命题 3.2 可知

$$\lim_{x \rightarrow 0} h^{(k)}(x) = \lim_{x \rightarrow 0} \left[\frac{f(x)}{x} \right]^{(k)} = \frac{f^{(k+1)}(0)}{k+1}.$$

于是由导数极限定理可知 $h^{(k)}(0) = \frac{f^{(k+1)}(0)}{k+1}, \forall k \in \mathbb{N}$, 故 h 在 $x = 0$ 处无穷次可微. 又由 $f \in C^\infty(\mathbb{R})$, 从而 $h \in C^\infty(\mathbb{R} \setminus \{0\})$, 故 $h \in C^\infty(\mathbb{R})$. 于是

$$\begin{aligned} h^{(j)}(0) &= \lim_{x \rightarrow 0} h^{(j)}(x) = \frac{f^{(j+1)}(0)}{j+1} = 0, \quad 0 \leq j \leq n-1, \\ h^{(n)}(0) &= \lim_{x \rightarrow 0} h^{(n)}(x) = \frac{f^{(n+1)}(0)}{n+1} \neq 0. \end{aligned} \quad (3.6)$$

因此 $h(x)$ 满足归纳假设条件, 进而由归纳假设及(3.5)(3.6)式可知

$$g(x) = \begin{cases} \frac{f(x)}{x^{n+1}}, & x \neq 0 \\ \frac{f^{(n+1)}(0)}{(n+1)!}, & x = 0 \end{cases} = \begin{cases} \frac{h(x)}{x^n}, & x \neq 0 \\ \frac{h^{(n)}(0)}{n!}, & x = 0 \end{cases} \in C^\infty(\mathbb{R}).$$

因此由数学归纳法可知, 结论成立.

□

第4章 微分中值定理

4.1 Hermite 插值定理

定理 4.1 (Taylor 定理)

(1) 带 Peano 余项:

设 $f(x)$ 在 x_0 处 n 阶可导. 则 $\exists \delta > 0$, 使得当 $x \in U(x_0, \delta)$ 时, 有

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k + o((x - x_0)^n).$$

(2) 带 Lagrange 余项:

设 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上存在 n 阶连续导数, 且 (a, b) 上存在 $n+1$ 阶导数, x_0 为 $[a, b]$ 内一定点, 则对于任意的 $x \in [a, b]$, 在 x, x_0 之间存在一个数 ξ 使得

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k + \frac{f^{(k+1)}(\xi)}{(n+1)!} (x - x_0)^{n+1}.$$

(3) 带积分型余项:

设 $f(x)$ 定义是在 $U(x_0, \delta)$ 上的函数 $f(x)$ 在 x_0 处 $n+1$ 阶可导, 对任意 $x \in U(x_0, \delta)$, t 在 x 与 x_0 之间, 都有

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k + \frac{1}{n!} \int_{x_0}^x f^{(n+1)}(t) (x - t)^n dt.$$

(4) 带 Cauchy 型余项:

设 $f(x)$ 定义是在 $U(x_0, \delta)$ 上的函数 $f(x)$ 在 x_0 处 $n+1$ 阶可导, 对任意 $x \in U(x_0, \delta)$, 都存在 ξ 在 x 与 x_0 之间, 使得

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k + \frac{1}{n!} f^{(n+1)}(\xi) (x - \xi)^n (x - x_0).$$



证明

(1) 带 Peano 余项:

(2) 带 Lagrange 余项:

(3) 带积分型余项:

(4) 带 Cauchy 型余项:



定理 4.2 (Hermite 插值定理)

给定 $a < x_1 < x_2 < \dots < x_m < b$ 和非负整数 $s_j, j = 0, 1, 2, \dots, m$. 设 $f \in C^{\sum_{j=1}^{m-1}(s_j+1)-1} [a, b]$ 且 $f \in D^{\sum_{j=1}^m(s_j+1)} (a, b)$, 设 $p(x)$ 满足条件: 对闭区间 $[a, b]$ 中的 m 个点 $a \leq x_1 < x_2 < \dots < x_m \leq b, s_j \in \mathbb{N}_0, j = 1, 2, \dots, m$, 都有唯一的次数不超过 $\sum_{j=1}^m (s_j + 1) - 1$ 的多项式 $p(x) \in \mathbb{R}[x]$, 并且

$$p^{(i)}(x_j) = f^{(i)}(x_j), i = 0, 1, \dots, s_j, j = 1, 2, \dots, m.$$

并称满足上述条件的多项式 $p(x)$ 为 **Hermite 插值多项式**, 则对每个 $x \in [a, b]$, 都存在 $\theta \in (\min\{x, x_1\},$

$\max\{x, x_m\}$), 使得

$$f(x) = p(x) + \frac{\sum_{j=1}^{m(s_j+1)} (\theta)}{\left(\sum_{j=1}^m (s_j + 1)\right)!} (x - x_1)^{s_1+1} (x - x_2)^{s_2+1} \cdots (x - x_m)^{s_m+1}.$$



笔记 $p(x)$ 的求法: 先由各插值点的次数确定 $p(x)$ 的最高次数 (即 $\sum_{j=1}^m (s_j + 1) - 1$), 再由方程 $p^{(i)}(x_j) = f^{(i)}(x_j)$, $i = 0, 1, \dots, s_j$, $j = 1, 2, \dots, m$. 直接解出.

证明



命题 4.1 (Lagrange 插值公式)

设 $f \in C[a, b] \cap D^2(a, b)$, 证明: 对 $\forall x \in [a, b]$, 存在 $\theta \in (a, b)$ 使得

$$f(x) = \frac{x-b}{a-b}f(a) + \frac{x-a}{b-a}f(b) + \frac{f''(\theta)}{2}(x-a)(x-b).$$



注 考试中先用 K 值法证明, 再直接用.

笔记 K 值法: 先令要证的中值等式中的高阶导数中值点 (本题为 $f''(\theta)$) 为常数, 再构造函数由 Rolle 中值定理推出结论即可.

证明 当 $x = a$ 或 b 时, 结论显然成立.

对 $\forall x \in (a, b)$, 固定 x , 记

$$K = \frac{2 \left[f(x) - \frac{x-b}{a-b}f(a) - \frac{x-a}{b-a}f(b) \right]}{(x-a)(x-b)}.$$

令 $g(y) = f(y) - \frac{y-b}{a-b}f(a) - \frac{y-a}{b-a}f(b) - \frac{K}{2}(y-a)(y-b)$, 则

$$g'(y) = f'(y) - \frac{f(a)}{a-b} - \frac{f(b)}{b-a} - \frac{K}{2}(2y-a-b), \quad g''(y) = f''(y) - K.$$

从而 $g(a) = g(b) = g(x) = 0$, 由 Rolle 中值定理可知, 存在 $\theta_1 \in (a, x), \theta_2 \in (x, b)$, 使得

$$g'(\theta_1) = g'(\theta_2) = 0.$$

再由 Rolle 中值定理可得, 存在 $\theta \in (\theta_1, \theta_2) \subset (a, b)$, 使得 $g''(\theta) = f''(\theta) - K = 0$, 即 $f''(\theta) = K$.



定理 4.3 (带积分型余项的 Lagrange 插值公式)

设 f 是 $[a, b]$ 上的二阶可微函数且 f'' 在 $[a, b]$ 可积, 则成立

$$f(x) = \frac{b-x}{b-a}f(a) + \frac{x-a}{b-a}f(b) + \int_a^b f''(y)k(x, y)dy,$$

这里

$$k(x, y) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}(y-b), & b \geq y \geq x \geq a, \\ \frac{b-x}{b-a}(a-y), & b \geq x \geq y \geq a. \end{cases}$$

特别的, 若还有 $f(a) = f(b) = 0$, 则有

$$f(x) = \int_a^b f''(y)k(x, y)dy. \quad (4.1)$$



笔记 $k(x, y)$ 也叫 Green 函数. 容易验证 $|k(x, y)| \leq |k(x, x)|$.

证明 考虑

$$g(x) = f(x) - \frac{b-x}{b-a}f(a) - \frac{x-a}{b-a}f(b), x \in [a, b],$$

则有 $g''(x) = f''(x)$, $g(a) = g(b) = 0$. 因此只需对 g 证明式(4.1).

事实上, 由分部积分可得

$$\begin{aligned} \int_a^b g''(y)k(x, y)dy &= \frac{b-x}{b-a} \int_a^x g''(y)(a-y)dy + \frac{x-a}{b-a} \int_x^b g''(y)(y-b)dy \\ &= \frac{b-x}{b-a} \left[(a-x)g'(x) - \int_a^x g'(y)dy \right] + \frac{x-a}{b-a} \left[-g'(x)(x-b) + \int_x^b g'(y)dy \right] \\ &= \frac{b-x}{b-a} [(a-x)g'(x) + g(x)] + \frac{x-a}{b-a} [-g'(x)(x-b) + g(x)] \\ &= g(x). \end{aligned}$$

这就证明了(4.1)式. □

例题 4.1 设 $f \in D^3[0, 1]$ 满足 $f(0) = -1, f'(0) = 0, f(1) = 0$, 证明对任何 $x \in [0, 1]$, 存在 $\theta \in (0, 1)$, 使得

$$f(x) = -1 + x^2 + \frac{x^2(x-1)}{6}f'''(\theta).$$

证明 当 $x = 0$ 或 1 时, 结论显然.

对 $\forall x \in (0, 1)$, 固定 x , 记 $K = \frac{6[f(x) + 1 - x^2]}{x^2(x-1)}$. 令 $g(y) = f(y) + 1 - y^2 - \frac{y^2(y-1)}{6}K$, 则

$$\begin{aligned} g'(y) &= f'(y) - 2y - \frac{y(y-1)}{3}K - \frac{y^2}{6}K, \\ g''(y) &= f''(y) - 2 - \frac{2y-1}{3}K - \frac{y}{3}K, \\ g'''(y) &= f'''(y) - K. \end{aligned}$$

从而 $g(0) = g(1) = g(x) = 0$, 由 Rolle 中值定理可知, 存在 $\theta_1 \in (0, x), \theta_2 \in (x, 1)$, 使得

$$g'(\theta_1) = g'(\theta_2) = 0.$$

又由 $f'(0) = 0$ 可知

$$g'(0) = g'(\theta_1) = g'(\theta_2) = 0.$$

再由 Rolle 中值定理可得, 存在 $\xi_1 \in (0, \theta_1), \xi_2 \in (\theta_1, \theta_2)$, 使得

$$g''(\xi_1) = g''(\xi_2) = 0.$$

于是再由 Rolle 中值定理可得, 存在 $\theta \in (\xi_1, \xi_2) \subset (0, 1)$, 使得 $g'''(\theta) = f'''(\theta) - K$. 即 $f'''(\theta) = K$. □

例题 4.2 设 $f \in C[0, 2] \cap D(0, 2)$ 满足 $f(0) = f(2) = 0, |f'(x)| \leq M, \forall x \in (0, 2)$. 证明

$$\left| \int_0^2 f(x) dx \right| \leq M.$$

 **笔记** 靠近哪个点就用哪个点的插值多项式.(原因是: 越靠近插值点, 拟合的效果越好)

证明 当 $x \in [0, 1]$, 由 Lagrange 中值定理(插值定理), 我们有

$$f(x) = f(0) + \frac{f'(\theta(x))}{1!}(x-0) = f'(\theta(x))x,$$

于是

$$|f(x)| \leq |f'(\theta(x))| \cdot x \leq Mx. \quad (4.2)$$

当 $x \in [1, 2]$, 由 Lagrange 中值定理(插值定理), 我们有

$$f(x) = f(2) + \frac{f'(\zeta(x))}{1!}(x-2) = f'(\zeta(x))(x-2),$$

于是

$$|f(x)| \leq |f'(\zeta(x))| \cdot |x - 2| \leq M(2 - x). \quad (4.3)$$

结合(4.2) 和(4.3), 我们有

$$\begin{aligned} \left| \int_0^2 f(x) dx \right| &\leq \left| \int_0^1 f(x) dx \right| + \left| \int_1^2 f(x) dx \right| \leq \int_0^1 |f(x)| dx + \int_1^2 |f(x)| dx \\ &\leq \int_0^1 (Mx) dx + \int_1^2 (M(2-x)) dx = M. \end{aligned}$$

□

例题 4.3 设 $f \in D^2[0, 1], f(0) = f(1) = 0, |f''(x)| \leq M$, 证明

$$\left| \int_0^1 f(x) dx \right| \leq \frac{M}{12}.$$

笔记 最多可以拟合 $f(0), f(1)$ 两个条件, 需要插值一次多项式, 余项需要 2 阶导数, 条件完美符合. 因此先由 Hermite 插值定理 (Lagrange 插值公式) 直接写出插值多项式和余项: 存在 $\theta(x) \in (0, 1)$, 使得

$$f(x) = \frac{f''(\theta(x))}{2}x(x-1), \forall x \in [0, 1].$$

但是注意考试时, 需要先用 K 值法证明上式再使用.

证明 由 Hermite 插值定理可知, 存在 $\theta(x) \in (0, 1)$, 使得

$$f(x) = \frac{f''(\theta(x))}{2}x(x-1), \forall x \in [0, 1].$$

积分并取绝对值就有

$$\left| \int_0^1 f(x) dx \right| = \left| \int_0^1 \frac{f''(\theta(x))}{2}x(x-1) dx \right| \leq \int_0^1 \left| \frac{f''(\theta(x))}{2} \right| |x(x-1)| dx \leq \frac{M}{2} \int_0^1 x(1-x) dx = \frac{M}{12}.$$

□

例题 4.4 设 $f \in D^2[a, b]$, 证明存在 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x) dx = (b-a) \frac{f(a) + f(b)}{2} - \frac{(b-a)^3}{12} f''(\xi).$$

笔记 题目并没有明确给出插值点的相关条件, 需要我们自己选取合适的插值点.(一般插值点都是特殊点, 比如: 端点、中点、极值点等)

我们观察到需要证明的等式中含有 a, b 两点并且 f 2 阶可导, 因此直接选取这两点作为插值点即可.

注 考试中下述证明中的 Lagrange 插值公式也需要先用 K 值法证明才能使用.

本题也可以直接用 K 值法证明. 只需令 $g(y) = \int_a^y f(x) dx = (y-a) \frac{f(a) + f(y)}{2} - \frac{(y-a)^3}{12} K$ 即可.

证明 由 Lagrange 插值公式(或 Hermite 插值定理) 可知, 对 $\forall x \in [a, b]$, 存在 $\theta(x) \in (a, b)$ 使得

$$f(x) = \frac{x-b}{a-b}f(a) + \frac{x-a}{b-a}f(b) + \frac{f''(\theta(x))}{2}(x-a)(x-b). \quad (4.4)$$

两边同时积分得到

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^b \frac{x-b}{a-b}f(a) dx + \int_a^b \frac{x-a}{b-a}f(b) dx + \frac{1}{2} \int_a^b f''(\theta(x))(x-a)(x-b) dx. \quad (4.5)$$

由(4.4)式可得

$$f''(\theta(x)) = \frac{2 \left[f(x) - \frac{x-b}{a-b}f(a) - \frac{x-a}{b-a}f(b) \right]}{(x-a)(x-b)} \in C(a, b).$$

又由 L'Hospital 法则可得

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow a^+} f''(\theta(x)) &= \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{2 \left(f(x) - \frac{x-b}{a-b}f(a) - \frac{x-a}{b-a}f(b) \right)}{(x-a)(x-b)} = \frac{2}{a-b} \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x) - \frac{x-b}{a-b}f(a) - \frac{x-a}{b-a}f(b)}{x-a} \\ &= \frac{2}{a-b} \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f'(x) - \frac{f(a)}{a-b} - \frac{f(b)}{b-a}}{1} = \frac{2}{b-a} \left[\frac{f(b) - f(a)}{b-a} - f'(a) \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lim_{x \rightarrow b^-} f''(\theta(x)) &= \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{2(f(x) - \frac{x-b}{a-b}f(a) - \frac{x-a}{b-a}f(b))}{(x-a)(x-b)} = \frac{2}{b-a} \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f(x) - \frac{x-b}{a-b}f(a) - \frac{x-a}{b-a}f(b)}{x-a} \\ &= \frac{2}{b-a} \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f'(x) - \frac{f(a)}{a-b} - \frac{f(b)}{b-a}}{1} = \frac{2 \left[f'(b) - \frac{f(b)-f(a)}{b-a} \right]}{b-a}.\end{aligned}$$

从而 $f''(\theta(x))$ 可以连续延拓到 $[a, b]$ 上, 又因为改变有限个点的函数值后, 其积分结果不变, 所以可以不妨设 $f''(\theta(x)) \in C[a, b]$. 于是由积分中值定理可知, 存在 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\frac{1}{2} \int_a^b f''(\theta(x))(x-a)(x-b) dx = \frac{f''(\xi)}{2} \int_a^b (x-a)(x-b) dx \quad (4.6)$$

利用(4.5)和(4.6)式可得

$$\begin{aligned}\int_a^b f(x) dx &= (b-a) \cdot \frac{f(a)+f(b)}{2} + \frac{f''(\xi)}{2} \int_a^b (x-a)(x-b) dx \\ &= (b-a) \frac{f(a)+f(b)}{2} - \frac{(b-a)^3}{12} f''(\xi).\end{aligned}$$

□

例题 4.5 设 $f \in C^2[a, b]$, 证明存在 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x) dx = (b-a) f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{(b-a)^3}{24} f''(\xi).$$

 **笔记** 本题需要我们选取合适的插值点和插值条件, 这里我们应该选 $f(\frac{a+b}{2}), f'(\frac{a+b}{2})$ 作为插值条件, 插值多项式为 1 次, 余项需要 2 阶导数.

注 本题也可以直接用 K 值法证明.

证明 由 Taylor 定理 (Hermite 插值定理) 可知, 存在 $\theta \in (a, b)$, 使得

$$f(x) = f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f'\left(\frac{a+b}{2}\right)\left(x - \frac{a+b}{2}\right) + \frac{f''(\theta)}{2}\left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2.$$

两边同时积分, 并由积分中值定理可知, 存在 $\xi \in (a, b)$

$$\begin{aligned}\int_a^b f(x) dx &= (b-a) f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \int_a^b \frac{f''(\theta)}{2}\left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2 dx = (b-a) f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{f''(\xi)}{2} \int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2 dx \\ &= (b-a) f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{(b-a)^3}{24} f''(\xi).\end{aligned}$$

□

例题 4.6 设 $f \in C^2[0, 1]$ 满足 $f(0) = f(1) = 0$, 证明

$$\int_0^1 \left| \frac{f''(x)}{f(x)} \right| dx \geq 4.$$

证明 由带积分余项的 Lagrange 插值定理可知, 我们有

$$f(x) = \int_0^1 f''(y) k(x, y) dy, \quad \text{其中} \quad k(x, y) = \begin{cases} \frac{x-0}{1-0}(y-1), & 1 \geq y \geq x \geq 0, \\ \frac{1-x}{1-0}(0-y), & 1 \geq x \geq y \geq 0. \end{cases}$$

从而

$$\begin{aligned}|f(x)| &\leq \int_0^1 |f''(y)| |k(x, y)| dy \leq |k(x, x)| \int_0^1 |f''(y)| dy \\ &= x(1-x) \int_0^1 |f''(y)| dy \leq \frac{1}{4} \int_0^1 |f''(y)| dy.\end{aligned}$$

故

$$\int_0^1 \left| \frac{f''(x)}{f(x)} \right| dx \geq \int_0^1 \frac{|f''(x)|}{\frac{1}{4} \int_0^1 |f''(y)| dy} dx = \frac{4}{\int_0^1 |f''(y)| dy} \int_0^1 |f''(x)| dx = 4.$$

但实际上, 我们可以得到

$$\int_0^1 \left| \frac{f''(x)}{f(x)} \right| dx \geq \int_0^1 \frac{|f''(x)|}{x(1-x) \int_0^1 |f''(y)| dy} dx = \frac{1}{\int_0^1 |f''(y)| dy} \int_0^1 \frac{|f''(x)|}{x(1-x)} dx.$$

□

命题 4.2 (导数内插)

1. 设 f 在 $[0, +\infty)$ 二阶可微且

$$|f(x)| \leq M_0, |f''(x)| \leq M_2, \forall x \geq 0. \quad (4.7)$$

证明

$$|f'(x)| \leq 2\sqrt{M_0 M_2}, \forall x > 0. \quad (4.8)$$

2. 若 f 在 \mathbb{R} 二阶可微且不等式 (4.7) 对 $x \in \mathbb{R}$ 都成立, 则可以改进估计 (4.8) 为

$$|f'(x)| \leq \sqrt{2M_0 M_2}, \forall x \in \mathbb{R}. \quad (4.9)$$

3. 设 $m \geq 2$, 若 f 在 \mathbb{R} 上 m 阶可导, 且记

$$\sup_{x \in \mathbb{R}} |f^{(k)}(x)| = M_k, \forall k \in \mathbb{N}_0, x \in \mathbb{R}.$$

证明

$$M_k \leq 2^{\frac{k(m-k)}{2}} M_0^{1-\frac{k}{m}} M_m^{\frac{k}{m}}, k = 1, 2, \dots, m-1. \quad (4.10)$$



笔记 涉及任意点相关性质时, 我们可以用 Taylor 公式的另外一种写法:

$$f(x+h) = f(x) + f'(x)h + \frac{f''(x)}{2}h^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(\theta)}{n!}h^n.$$

证明

1. 不妨设 $M_0, M_2 > 0$, 因为其余情况是平凡的. 待定 $h > 0$, 然后由 Taylor 中值定理, 我们有

$$f(x+h) = f(x) + f'(x)h + \frac{f''(\theta)}{2}h^2, \theta \in [x, x+h]. \quad (4.11)$$

于是由 (4.11) 得

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} - \frac{f''(\theta)}{2}h.$$

于是运用条件 (4.7) 得

$$|f'(x)| \leq \frac{|f(x+h)| + |f(x)|}{h} + \frac{|f''(\theta)|}{2}h \leq \frac{2M_0}{h} + \frac{M_2}{2}h.$$

为了使上式得到的估计尽可能小, 因此我们需要求上式右边的最小值, 即

$$\frac{2M_0}{h} + \frac{M_2}{2}h \geq 2\sqrt{\frac{2M_0}{h} \cdot \frac{M_2}{2}h} = 2\sqrt{M_0 M_2},$$

当且仅当 $h = 2\sqrt{\frac{M_0}{M_2}} > 0$ 时等号成立. 于是我们得到不等式 (4.8) 成立.

2. 不妨设 $M_0, M_2 > 0$, 其余情况是平凡的. 因为定义域的扩大, 于是我们可以进一步加强不等式 (4.8) 为不等式 (4.9). 使用的标准技巧, 即式 (4.11) 的对偶式:

$$f(x-h) = f(x) - f'(x)h + \frac{f''(\xi)}{2}h^2, \theta \in [x, x+h]. \quad (4.12)$$

将式 (4.11) 减去 (4.12) 得

$$f(x+h) - f(x-h) = 2f'(x)h + [f''(\theta) - f''(\xi)] \frac{h^2}{2}.$$

现在

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} - [f''(\theta) - f''(\xi)] \frac{h}{4}.$$

于是利用不等式 (4.7) 得

$$|f'(x)| \leq \frac{2M_0}{2h} + \frac{2M_2h}{4} = \frac{M_0}{h} + \frac{M_2h}{2}.$$

同样的为了上式右边尽可能小, 我们取最小值得

$$\frac{M_0}{h} + \frac{M_2h}{2} \geq 2\sqrt{\frac{M_0}{h} \cdot \frac{M_2h}{2}} = \sqrt{2M_0M_2},$$

当且仅当 $h = \sqrt{\frac{2M_0}{M_2}} > 0$ 时等号成立. 这就证明了不等式 (4.9).

3. 当 $m = 2$, 由本题第二问知不等式 (4.10) 成立. 现在假定对 $m \geq 2$ 有不等式 (4.10) 成立. 考虑 $k = 1$ 即得

$$M_1 \leq 2^{\frac{m-1}{2}} M_0^{1-\frac{1}{m}} M_m^{\frac{1}{m}}. \quad (4.13)$$

把 f' 看成 f 用不等式 (4.10) 得

$$M_{k+1} \leq 2^{\frac{k(m-k)}{2}} M_1^{1-\frac{k}{m}} M_{m+1}^{\frac{k}{m}}, \quad k = 1, 2, \dots, m-1. \quad (4.14)$$

在 (4.14) 代入 $k = m-1$ 得

$$M_m \leq 2^{\frac{m-1}{2}} M_1^{1-\frac{1}{m}} M_{m+1}^{\frac{1}{m}}.$$

继续运用不等式 (4.13) 得

$$M_m \leq 2^{\frac{m-1}{2}} \left(2^{\frac{m-1}{2}} M_0^{1-\frac{1}{m}} M_m^{\frac{1}{m}} \right)^{\frac{1}{m}} M_{m+1}^{1-\frac{1}{m}} \Rightarrow M_m \leq 2^{\frac{m}{2}} M_0^{\frac{1}{m+1}} M_{m+1}^{\frac{m}{m+1}}.$$

由上式和归纳假设 (4.10), 对 $k = 1, 2, \dots, m$, 我们有

$$M_k \leq 2^{\frac{k(m-k)}{2}} M_0^{1-\frac{k}{m}} M_m^{\frac{k}{m}} \leq 2^{\frac{k(m-k)}{2}} M_0^{1-\frac{k}{m}} \left(2^{\frac{m}{2}} M_0^{\frac{1}{m+1}} M_{m+1}^{\frac{m}{m+1}} \right)^{\frac{k}{m}} = 2^{\frac{k(m+1-k)}{2}} M_0^{1-\frac{k}{m+1}} M_{m+1}^{\frac{k}{m+1}},$$

这就证明了对任何 $m \geq 2$, 都有不等式 (4.10) 成立, 我们完成了证明. □

例题 4.7 设 $f \in D[a, b]$ 且 $|f'(x)| \leq M$, $\int_a^b f(x)dx = 0$. 考虑 $F(x) = \int_a^x f(t)dt$.

$$(1) \text{ 证明 } |F(x)| \leq \frac{M(b-a)^2}{8}.$$

$$(2) \text{ 若还有 } f(a) = f(b) = 0, \text{ 证明 } |F(x)| \leq \frac{M(b-a)^2}{16}.$$

笔记 因为题目的微分阶数不够, 因此是靠近谁推谁的模型.

先来第一问, 因为 $F(b) = F(a) = 0$, $|F''(x)| = |f'(x)| \leq M$. 即 F 有两个初值条件, 插左右端点, 合计两个条件, 拟合多项式一次, 余项应该是二次的, 因此微分条件足够, 运用插值定理直接得到插值公式.

再来看第二问, 此时 $F(a) = F(b) = F'(a) = F'(b) = 0$, 需要拟合初值条件太多 (4 个初值条件, 插 3 次多项式, 余项要到 4 阶导数). 因此属于靠近谁推谁模型.

证明 (1) 由插值定理, 对每个 $x \in [a, b]$, 存在 $\theta \in [a, b]$, 使得

$$F(x) = \frac{F''(\theta)}{2}(x-a)(x-b).$$

$$|F(x)| = \left| \frac{F''(\theta)}{2}(x-a)(x-b) \right| \leq \frac{M}{2} \left(\frac{a+b}{2} - a \right) \left(b - \frac{a+b}{2} \right) = \frac{M(b-a)^2}{8}.$$

(2) 设 $x_0 \in [a, b]$ 是 $|F|$ 最大值点, 不妨设 $x_0 \in (a, b)$, 否则不等式平凡. 不妨设 $x_0 \in (a, \frac{a+b}{2}]$, 则我们对 $x \in [a, \frac{a+b}{2}]$, 运用插值定理, 我们知道存在 $\theta, \eta \in [a, \frac{a+b}{2}]$, 使得

$$F(x) = \frac{F''(\theta)}{2}(x-a)^2, \quad F(x) = F(x_0) + \frac{F''(\eta)}{2}(x-x_0)^2,$$

即

$$F(x_0) = \frac{F''(\theta)}{2}(x-a)^2 - \frac{F''(\eta)}{2}(x-x_0)^2.$$

因此

$$|F(x_0)| \leq \frac{M}{2} [(x-a)^2 + (x-x_0)^2].$$

特别的取 $x = \frac{a+x_0}{2}$ 使上式右端达到最小, 我们有

$$|F(x_0)| \leq \frac{M}{4}(x_0-a)^2 \leq \frac{M}{4} \left(\frac{a+b}{2} - a \right)^2 = \frac{M}{16}(b-a)^2.$$

□

例题 4.8 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上可导, $f(a) = f(b) = 0$, 证明: $\exists \xi \in (a, b)$ 使得 $(b-a)f'(\xi) = f\left(\frac{a+b}{2}\right)$.

证明 由 Lagrange 中值定理, 存在 $\theta_1 \in \left(a, \frac{a+b}{2}\right)$, $\theta_2 \in \left(\frac{a+b}{2}, b\right)$, 使得

$$f'(\theta_1) = \frac{f\left(\frac{a+b}{2}\right)}{\frac{a+b}{2} - a} = \frac{2}{b-a} f\left(\frac{a+b}{2}\right), f'(\theta_2) = \frac{f\left(\frac{a+b}{2}\right)}{\frac{a+b}{2} - b} = -\frac{2}{b-a} f\left(\frac{a+b}{2}\right).$$

注意到

$$\left[\frac{2}{b-a} f\left(\frac{a+b}{2}\right) - \frac{1}{b-a} f\left(\frac{a+b}{2}\right) \right] \left[-\frac{2}{b-a} f\left(\frac{a+b}{2}\right) - \frac{1}{b-a} f\left(\frac{a+b}{2}\right) \right] = -\frac{3f^2\left(\frac{a+b}{2}\right)}{(b-a)^2} \leq 0,$$

因此 $\frac{1}{b-a} f\left(\frac{a+b}{2}\right)$ 介于 $\pm \frac{2}{b-a} f\left(\frac{a+b}{2}\right)$ 之间, 从而由导函数介值性我们知道存在 $\xi \in (a, b)$ 使得 $(b-a)f'(\xi) = f\left(\frac{a+b}{2}\right)$.

□

4.2 函数构造类

4.2.1 单中值点问题 (一阶构造类)

例题 4.9

1. 设 $f \in C[0, 2] \cap D(0, 2)$ 满足 $f(0) = f(2) = 0$, $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{f(x) - 2}{x-1} = 5$. 则存在 $\xi \in (0, 2)$ 使得

$$f'(\xi) = \frac{2\xi - f(\xi)}{\xi}.$$

2. 设 $f \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$, $f(0) = 0$, 证明: 存在 $u \in (0, 1)$, 使得

$$f'(u) = \frac{uf(u)}{1-u}.$$

3. 设 $f \in C[-1, 2] \cap D(-1, 2)$ 且有 $f(-1) = f(2) = -\frac{1}{2}$, $f\left(\frac{1}{2}\right) = 1$. 证明对任何实数 $\lambda \in \mathbb{R}$, 都存在 $\xi \in (-1, 2)$, 使得

$$f'(\xi) = \lambda \left[f(\xi) - \frac{\xi}{2} \right] + \frac{1}{2}.$$

 **笔记** 我们在草稿纸上构造函数, 构造过程无需展示给别人或者卷面. 构造的本质是猜测, 所以无需严格的逻辑. 注

1. **Step 1** 考虑微分方程 $y' = \frac{2x-y}{x}$, 解得 $y = \frac{c}{x} + x$.

Step 2 分离常数 c 得 $c = x(y-x)$, 常数变易得构造函数 $c(x) = x(f(x)-x)$.

2. **Step 1** 考虑微分方程 $y' = \frac{xy}{1-x}$, 解得 $y = \frac{ce^{-x}}{x-1}$.

Step 2 分离常数 c 得 $c = e^x(x-1)y$, 常数变易得构造函数 $c(x) = e^x(x-1)f(x)$.

3. **Step 1** 考虑微分方程 $y' = \lambda \left[y - \frac{x}{2} \right] + \frac{1}{2}$, 解得 $y = ce^{\lambda x} + \frac{x}{2}$.

Step 2 分离常数 c 得 $c = \frac{y - \frac{x}{2}}{e^{\lambda x}}$, 常数变易得构造函数 $c(x) = \frac{f(x) - \frac{x}{2}}{e^{\lambda x}}$.

证明

1. 由 $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{f(x) - 2}{x - 1} = 5$ 及 $f \in C[0, 2]$ 可知

$$f(1) = \lim_{x \rightarrow 1} f(x) = 5 \lim_{x \rightarrow 1} (x - 1) + 2 = 2.$$

从而

$$f'(1) = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{f(x) - f(1)}{x - 1} = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{f(x) - 2}{x - 1} = 5.$$

构造函数 $c(x) = x(f(x) - x)$, 我们求导得

$$c'(x) = f(x) - 2x + xf'(x). \quad (4.15)$$

注意到

$$c(0) = 0, c(1) = 1, c(2) = -4.$$

于是由 Lagrange 中值定理得 $\alpha \in (0, 1), \beta \in (1, 2)$, 使得

$$c'(\alpha) = \frac{c(1) - c(0)}{1 - 0} = 1, c'(\beta) = \frac{c(1) - c(2)}{1 - 2} = -5.$$

由导数介值定理知存在 $\xi \in (0, \eta)$ 使得 $c'(\xi) = 0$. 由(4.15)知

$$f'(\xi) = \frac{2\xi - f(\xi)}{\xi}.$$

这就完成了证明.

2. 构造 $c(x) = e^x(x - 1)f(x)$, 则 $c(0) = c(1) = 0$, 由罗尔中值定理, 存在 $u \in (0, 1)$, 使得 $c'(u) = 0$, 这恰好是

$$f'(u) = \frac{uf(u)}{1 - u}.$$

3. 构造 $c(x) = \frac{f(x) - \frac{x}{2}}{e^{\lambda x}}$. 注意到

$$c(-1) = 0, c(2) = -\frac{3}{2e^{2\lambda}}, c\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{3}{4e^{\frac{\lambda}{2}}}.$$

由零点定理知存在 $\theta \in (\frac{1}{2}, 2)$, 使得 $c(\theta) = 0$. 再由罗尔中值定理知存在 $\xi \in (-1, \theta) \subset (-1, 2)$, 使 $c'(\xi) = 0$, 即

$$f'(\xi) = \lambda \left[f(\xi) - \frac{\xi}{2} \right] + \frac{1}{2}.$$

□

例题 4.10 设 $f \in D[0, 1]$ 且 $f(0) > 0, f(1) > 0, \int_0^1 f(x)dx = 0$, 证明存在 $\xi \in (0, 1)$, 使得

$$f'(\xi) + 3f^3(\xi) = 0.$$

注 虽然本题直接考虑微分方程: $y' + 3y^2 = 0$ 解出 y , 然后常数变易也不难得构造函数. 但是下述证明的方法旨在介绍一种新的解决这类问题的方法.

笔记 此类构造虽然仍然是一阶构造, 但是要把部分 f 视为已知函数来构造, 对于本题, 即 $3f^2$ 视为已知的函数. 考虑 $y' + 3f^2y = 0$. 解得 $y = ce^{-\int_0^x 3f^2(t)dt}$, 分离变量得构造函数 $c(x) = f(x)e^{\int_0^x 3f^2(t)dt}$.

证明 证法一: 构造函数 $c(x) = f(x)e^{\int_0^x 3f^2(t)dt}$, 注意到

$$c'(x) = e^{\int_0^x 3f^2(t)dt} [f'(x) + 3f^3(x)].$$

以及由积分中值定理, 我们知道存在 $\theta \in (0, 1)$, 使得

$$f(\theta) = \int_0^1 f(x)dx = 0.$$

注意到若 f 只有一个零点, 则因为 $f(0) > 0, f(1) > 0$, 我们知道 $f(x) > 0, \forall x \in [0, \theta) \cup (\theta, 1]$, 从而 $\int_0^1 f(x)dx > 0$, 这是一个矛盾! 于是存在 $\theta_1 \neq \theta_2$, 使得 $f(\theta_1) = f(\theta_2) = 0$. 现在就有 $c(\theta_1) = c(\theta_2) = 0$, 由罗尔中值定理, 存在 $\xi \in (0, 1)$, 使得 $c'(\xi) = 0$, 即

$$f'(\xi) + 3f^3(\xi) = 0.$$

证法二: 构造函数 $c(x) = f(x)e^{\int_0^x 3f^2(t)dt}$, 注意到

$$c'(x) = e^{\int_0^x 3f^2(t)dt} [f'(x) + 3f^3(x)].$$

以及由积分中值定理, 我们知道存在 $\theta \in (0, 1)$, 使得

$$f(\theta) = \int_0^1 f(x)dx = 0.$$

从而 $c(\theta) = 0$. 因为 $f(0), f(1) > 0$, 所以 $c(0), c(1) > 0$. 又由 $c \in C[0, 1]$, 故 $c(x)$ 在 $[0, 1]$ 上可取到最大、最小值. 由于 $c(\theta) = 0 < c(0), c(1)$, 因此 $c(x)$ 只能在 $(0, 1)$ 上可取到最小值, 即存在 $\xi \in (0, 1)$, 使得 $c(\xi) \leq c(x), \forall x \in [0, 1]$. 由费马引理可知 $c'(\xi) = 0$, 即

$$f'(\xi) + 3f^3(\xi) = 0.$$

□

例题 4.11 设 $f \in C^1[0, 1]$, 证明存在 $\xi \in [0, 1]$, 使得

$$f'(\xi) = \int_0^1 (12x - 6)f(x)dx.$$

笔记 核心想法: 分部积分转移导数, 但是需要控制非积分部分为零.

注 $\int_0^1 (12x - 6)f(x)dx = \int_0^1 (6x^2 - 6x)'f(x)dx$ 的原因: 我们希望利用分部积分后能够直接转移导数而没有多余部分, 因此我们待定 $\int_0^1 (12x - 6)f(x)dx = \int_0^1 (ax^2 + bx + c)'f(x)dx$, 即 $12x - 6 = (ax^2 + bx + c)'$. 分部积分得到

$$\int_0^1 (12x - 6)f(x)dx = \int_0^1 (ax^2 + bx + c)'f(x)dx = (ax^2 + bx + c)f(x) \Big|_0^1 - \int_0^1 (ax^2 + bx + c)f'(x)dx.$$

我们希望 $(ax^2 + bx + c)f(x) \Big|_0^1 = (a + b + c)f(1) - cf(0) = 0$, 即希望 $x = 0, 1$ 恰好是 $ax^2 + bx + c$ 的根, 并且 $12x - 6 = (ax^2 + bx + c)'$. 从而

$$\begin{cases} a + b + c = 0 \\ c = 0 \\ 2a = 12 \\ b = -6 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = 6 \\ b = -6 \\ c = 0 \end{cases}$$

由此可知, 满足我们期望的二次函数只有 $6x^2 - 6x$, 即 $\int_0^1 (12x - 6)f(x)dx = \int_0^1 (6x^2 - 6x)'f(x)dx$.

证明

$$\begin{aligned} \int_0^1 (12x - 6)f(x)dx &= \int_0^1 (6x^2 - 6x)'f(x)dx \xrightarrow{\text{分部积分}} - \int_0^1 (6x^2 - 6x)f'(x)dx \\ &\xrightarrow{\text{积分中值定理}} f'(\xi) \int_0^1 (6x^2 - 6x)dx = f'(\xi), \xi \in [0, 1]. \end{aligned}$$

□

例题 4.12

1. 设 $f \in D^2[0, 1]$ 使得 $f(0) = f(1)$, 证明存在 $\eta \in (0, 1)$ 使得

$$f''(\eta) = \frac{2f'(\eta)}{1 - \eta}.$$

2. 设 $f \in D^2[0, \frac{\pi}{4}]$, $f(0) = 0, f'(0) = 1, f(\frac{\pi}{4}) = 1$, 证明存在 $\xi \in (0, \frac{\pi}{4})$, 使得

$$f''(\xi) = 2f(\xi)f'(\xi).$$

注

1. 考虑微分方程 $y'' = \frac{2y'}{1-x}$, 解得 $y' = \frac{c}{(1-x)^2}$, 常数变易得到构造函数 $c(x) = (1-x)^2 f'(x)$.

2. 虽然我们可以通过解微分方程得到构造函数, 但是也不要忘记直接猜测构造函数的想法. 当需要考虑的微

分方程比较难解时, 就只能猜测构造函数.

考虑微分方程: $y'' = 2yy'$, 解得 $y' = y^2 + c$, 得到构造函数 $c(x) = f'(x) - f^2(x)$. 但是根据这个构造函数结合已知条件再利用中值定理无法得到结论. ($f(\frac{\pi}{4}) = 1$ 用不了) 因此需要构造更加具体的函数才行.

然而原问题等价于利用 Rolle 中值定理找一个中值点 $\xi \in (0, \frac{\pi}{4})$, 使得 $c'(\xi) = 0$. 但由条件只能得到 $c(0) = 1, c(\frac{\pi}{4})$ 无法确定. 因此我们希望还能找一个点 $x_0 \in (0, \frac{\pi}{4})$, 使得 $c(x_0) = f'(x_0) - f^2(x_0) = 1$.

将这个看作一个新的中值问题, 即已知设 $f \in D^2[0, \frac{\pi}{4}], f(0) = 0, f'(0) = 1, f(\frac{\pi}{4}) = 1$, 证明: 存在 $x_0 \in (0, \frac{\pi}{4})$, 使得

$$c(x_0) = f'(x_0) - f^2(x_0) = 1.$$

考虑微分方程: $y' - y^2 = 1$, 解得 $\arctan y = x + C$, 常数变易得到新的构造函数 $g(x) = \arctan f(x) - x$. 由条件可知 $g(0) = g(\frac{\pi}{4}) = 0$, 从而由 Rolle 中值定理可知, 存在 $x_0 \in (0, \frac{\pi}{4})$, 使得 $g'(x_0) = 0 \Leftrightarrow f'(x_0) - f^2(x_0) = 1$. 从而找到了满足我们需求的中值点 x_0 , 故结论得证.(具体证明见下述证明)

证明

- 令 $c(x) = (1-x)^2 f'(x)$, 则 $c'(x) = 2(x-1)f'(x) + (1-x)^2 f''(x)$. 由 $f(0) = f(1)$ 及 Rolle 中值定理可得, 存在 $\xi \in (0, 1)$, 使得 $f'(\xi) = 0$. 从而 $c(1) = c(\xi) = 0$, 再根据 Rolle 中值定理可得, 存在 $\eta \in (0, 1)$, 使得

$$c'(\eta) = 0 \Leftrightarrow f''(\eta) = \frac{2f'(\eta)}{1-\eta}.$$

- 令 $c(x) = f'(x) - f^2(x)$, $g(x) = \arctan f(x) - x$, 则 $g'(x) = \frac{f'(x) - f^2(x) - 1}{1 + f^2(x)}$. 进而由条件可得 $g(0) = g(\frac{\pi}{4}) = 0, g'(0) = 0$. 于是由 Rolle 中值定理可知, 存在 $a \in (0, \frac{\pi}{4})$, 使得 $g'(a) = 0$, 即 $f'(a) = f^2(a) + 1$. 从而 $c(a) = 1, c(0) = f'(0) - f^2(0) = 1$, 故再由 Rolle 中值定理可得, 存在 $\xi \in (0, \frac{\pi}{4})$, 使得

$$c(1) = 0 \Leftrightarrow f''(\xi) = 2f(\xi)f'(\xi).$$

□

4.2.2 多中值点问题

例题 4.13 设 $f \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$ 且 $f(0) = 0, f(1) = 1$. 证明存在互不相同的 $\lambda, \mu \in (0, 1)$ 使得

$$f'(\lambda)(1 + f'(\mu)) = 2.$$



笔记 核心想法: 插入一个点 c , 将两个中值点问题转换为如何确定这单个插入点 c 的问题.

注 思路分析: 待定 $c \in (0, 1)$, 运用拉格朗日中值定理, 我们知道存在 $\lambda \in (0, c), \mu \in (c, 1)$, 使得

$$f'(\lambda) = \frac{f(c) - f(0)}{c - 0} = \frac{f(c)}{c}, f'(\mu) = \frac{f(c) - f(1)}{c - 1} = \frac{f(c) - 1}{c - 1}.$$

需要

$$2 = f'(\lambda)(1 + f'(\mu)) = \frac{f(c)}{c} \left[1 + \frac{f(c) - 1}{c - 1} \right] \Leftrightarrow (f(c) + c)(f(c) + 2c - 2) = 0.$$

只需找到一个 $c \in (0, 1)$ 使得上式成立.

若考虑 $f(c) = c$, 则此时令 $g(x) = f(x) - x$, 则现在我们只需找到一个 $c \in (0, 1)$, 使得 $g(c) = 0$ 即可. 但是由条件可知 $g(0) = g(1) = 0$, 无法用中值定理直接找出 $c \in (0, 1)$, 使得 $g(c) = 0$. 故取 $k = 1$ 不能找到满足我们的需求的 c .

若考虑 $f(c) = 2 - 2c$, 则此时令 $g(x) = f(x) + 2x - 2$, 则现在我们只需找到一个 $c \in (0, 1)$, 使得 $g(c) = 0$ 即可. 由条件可知 $g(0) = -2, g(1) = 1$, 从而由连续函数介值定理可得, 存在 $c \in (0, 1)$, 使得 $g(c) = 0$. 故取 $k = \frac{1-2c}{c-1}$ 能找到满足我们的需求的 c , 进而就确定了满足题目要求的 λ 和 μ .

证明 令 $g(x) = f(x) + 2x - 2$, 则由条件可知 $g(0) = -2, g(1) = 1$, 从而由连续函数介值定理可得, 存在 $c \in (0, 1)$, 使

得 $g(c) = 0$, 即 $f(c) = 2 - 2c$. 运用 Lagrange 中值定理, 我们知道存在 $\lambda \in (0, c), \mu \in (c, 1)$, 使得

$$f'(\lambda) = \frac{f(c) - f(0)}{c - 0} = \frac{f(c)}{c}, f'(\mu) = \frac{f(c) - f(1)}{c - 1} = \frac{f(c) - 1}{c - 1}.$$

再结合 $f(c) = 2 - 2c$ 可得

$$f'(\lambda)(1 + f'(\mu)) = \frac{f(c)}{c} \left[1 + \frac{f(c) - 1}{c - 1} \right] = 2.$$

故结论得证. □

例题 4.14 设 $f \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$ 使得 $f(0) = 0, f(1) = 1$, 正实数满足 $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = 1$. 证明存在互不相同的 $x_1, x_2, \dots, x_n \in (0, 1)$, 使得

$$\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{f'(x_i)} = 1.$$

 **笔记** 核心想法: 插入 $n - 1$ 个点 y_i , 将 n 个中值点问题转换为如何确定这些插入点 y_i 的问题.

注 思路分析: 证明的想法就是插入 $n - 1$ 个点 $0 = y_0 < y_1 < y_2 < \dots < y_{n-1} < y_n = 1$ 之后用 Lagrange 定理得

$$f'(x_i) = \frac{f(y_i) - f(y_{i-1})}{y_i - y_{i-1}}, x_i \in (y_{i-1}, y_i), i = 1, 2, \dots, n.$$

于是需要满足

$$1 = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{f'(x_i)} = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i(y_i - y_{i-1})}{f(y_i) - f(y_{i-1})}.$$

自然期望

$$f(y_i) - f(y_{i-1}) = \lambda_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (4.16)$$

此时就有

$$\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{f'(x_i)} = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i-1}) = 1.$$

而为了得到(4.16), 我们只需反复用介值定理即可. 由条件可知 $0 = f(0) < \lambda_1 < f(1) = 1$, 从而由连续函数介值定理可得, 存在 $y_1 \in (0, 1)$, 使得 $f(y_1) = \lambda_1$. 进而 $\lambda_1 = f(y_1) < \lambda_1 + \lambda_2 < f(1) = 1$, 于是再由连续函数介值定理可得, 存在 $y_2 \in (y_1, 1)$, 使得 $f(y_2) = \lambda_1 + \lambda_2$. 以此类推, 反复利用介值定理即可得到

$$f(y_i) = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i, i = 1, 2, \dots, n-1.$$

其中 $0 = y_0 < y_1 < y_2 < \dots < y_{n-1} < y_n = 1$.

证明 由条件可知 $0 = f(0) < \lambda_1 < f(1) = 1$, 从而由连续函数介值定理可得, 存在 $y_1 \in (0, 1)$, 使得 $f(y_1) = \lambda_1$. 进而 $\lambda_1 = f(y_1) < \lambda_1 + \lambda_2 < f(1) = 1$, 于是再由连续函数介值定理可得, 存在 $y_2 \in (y_1, 1)$, 使得 $f(y_2) = \lambda_1 + \lambda_2$. 以此类推, 反复利用介值定理即可得到

$$f(y_i) = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i, i = 1, 2, \dots, n-1.$$

其中 $0 = y_0 < y_1 < y_2 < \dots < y_{n-1} < y_n = 1$. 再利用 Lagrange 定理得

$$f'(x_i) = \frac{f(y_i) - f(y_{i-1})}{y_i - y_{i-1}}, x_i \in (y_{i-1}, y_i), i = 1, 2, \dots, n.$$

于是

$$\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{f'(x_i)} = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i(y_i - y_{i-1})}{f(y_i) - f(y_{i-1})} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i-1}) = 1.$$

故结论得证. □

4.2.3 只能猜的类型

来看一种很无趣的需要自己猜的类型. 此类问题的核心是两个中值参数相互制约, 此时需要你自己复原中值参数.

例题 4.15 设 $f \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$ 且 $f(0) = 0$ 且 $f(x) \neq 0, \forall x \in (0, 1]$, 证明对任何 $\alpha > 0$, 存在 $\xi \in (0, 1)$ 使得

$$\alpha \frac{f'(\xi)}{f(\xi)} = \frac{f'(1-\xi)}{f(1-\xi)}.$$

注 注意到

$$\alpha \frac{f'(\xi)}{f(\xi)} = \frac{f'(1-\xi)}{f(1-\xi)} \Leftrightarrow \alpha f'(\xi) f(1-\xi) - f(\xi) f'(1-\xi) = 0.$$

因此想到构造函数 $g(x) = f^\alpha(x)f(1-x)$.

笔记 不妨设 $f(x) > 0, \forall x \in (0, 1]$ 的原因: 如果 $f(x) < 0$, 则 $f^\alpha(x)$ 可能无意义.

由 $f \in C[0, 1]$ 且 $f(x) \neq 0, \forall x \in (0, 1]$ 可知, $f(x)$ 在 $(0, 1]$ 要么恒大于零, 要么恒小于零. 否则由零点存在定理得到矛盾! 假设结论对 $f(x) > 0, \forall x \in (0, 1]$ 成立, 则当 $f(x) < 0, \forall x \in (0, 1]$ 时, 令 $F(x) = -f(x) > 0, \forall x \in (0, 1]$, 则 $F(0) = 0$. 从而由假设可知, 对 $\forall \alpha > 0$, 存在 $\xi \in (0, 1)$, 使得

$$\alpha \frac{F'(\xi)}{F(\xi)} = \frac{F'(1-\xi)}{F(1-\xi)} \Leftrightarrow \alpha \frac{f'(\xi)}{f(\xi)} = \frac{f'(1-\xi)}{f(1-\xi)}.$$

故不妨设成立.

证明 不妨设 $f(x) > 0, \forall x \in (0, 1]$. 对 $\forall \alpha > 0$, 令 $g(x) = f^\alpha(x)f(1-x)$, 则 $g(0) = g(1) = 0$. 从而由 Rolle 中值定理可知, 存在 $\xi \in (0, 1)$, 使得

$$g'(\xi) = 0 \Rightarrow g'(\xi) = \alpha f^{\alpha-1}(\xi)f'(\xi)f(1-\xi) - f^\alpha(\xi)f'(1-\xi) \Rightarrow \alpha \frac{f'(\xi)}{f(\xi)} = \frac{f'(1-\xi)}{f(1-\xi)}.$$

□

4.3 中值极限问题

此类问题有一个固定操作, 即对中值点再套一次中值定理, 使得中值参数可以暴露出来, 从而解出参数求极限得到证明.

例题 4.16 设 $f \in C^2[0, 1], f'(0) = 0, f''(0) \neq 0$, 证明对任何 $x \in (0, 1)$, 存在 $\xi(x) \in (0, 1)$, 使得

$$\int_0^x f(t)dt = f(\xi(x))x,$$

且

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\xi(x)}{x} = \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

证明 对 $\forall x \in (0, 1)$, 由积分中值定理可知, 存在 $\xi(x) \in (0, 1)$, 使得

$$\int_0^x f(t)dt = f(\xi(x))x.$$

从而对 $\forall x \in (0, 1)$, 由 Taylor 定理可知, 存在 $\theta(x) \in (0, \xi(x))$, 使得

$$f(\xi(x)) = f(0) + f'(0)\xi(x) + \frac{1}{2}f''(\theta(x))\xi^2(x) = f(0) + \frac{f''(\theta(x))}{2}\xi^2(x).$$

从而将 $\int_0^x f(t)dt = f(\xi(x))x$ 代入上式可得

$$\int_0^x f(t)dt = x \left[f(0) + \frac{f''(\theta(x))}{2}\xi^2(x) \right].$$

故 $f''(\theta(x))\xi^2(x) = 2 \left(\frac{\int_0^x f(t)dt}{x} - f(0) \right)$. 于是

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \theta(x) = 0 \Rightarrow \lim_{x \rightarrow 0^+} f''(\theta(x)) = f''(0).$$

因此由 L'Hospital 法则可得

$$\begin{aligned} f''(0) \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\xi^2(x)}{x^2} &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f''(\theta(x))\xi^2(x)}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{2 \left(\int_0^x f(t)dt - xf(0) \right)}{x^3} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{2(f(x) - f(0))}{3x^2} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f'(x)}{3x} = \frac{f''(0)}{3}. \end{aligned}$$

又 $f''(0) \neq 0$, 故 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\xi^2(x)}{x^2} = \frac{1}{3}$, 因此 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\xi(x)}{x} = \frac{1}{\sqrt{3}}$.

□

例题 4.17 设 f 在 $x = a$ 的邻域 $n + p$ 阶可导且 $p \geq 1$, 于是有

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x - a) + \cdots + \frac{f^{(n-1)}(a)}{(n-1)!}(x - a)^{n-1} + \frac{f^{(n)}(c)}{n!}(x - a)^n. \quad (4.17)$$

如果对于 $j = 1, 2, \dots, p-1$ 都有 $f^{(n+j)}(a) = 0, f^{(n+p)}(a) \neq 0$, 求极限 $\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{c-a}{x-a}$.

证明 由 Taylor 中值定理及条件可知, 存在 $\theta \in U(a)$, 使得

$$f^{(n)}(c) = f^{(n)}(a) + \frac{f^{(n+p)}(\theta)}{p!}(c - a)^p. \quad (4.18)$$

从而结合上式, 再利用带 Peano 余项的 Taylor 公式可得

$$\lim_{x \rightarrow a^+} f^{(n+p)}(\theta) = \lim_{x \rightarrow a^+} p! \frac{f^{(n)}(c) - f^{(n)}(a)}{(c - a)^p} = \lim_{x \rightarrow a^+} p! \frac{\frac{f^{(n+p)}(a)}{p!}(c - a)^p + o((c - a)^p)}{(c - a)^p} = f^{(n+p)}(a).$$

于是利用(4.17)(4.18)式, 再结合带 Peano 余项的 Taylor 公式可得

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow a^+} \left(\frac{c-a}{x-a} \right)^p &\stackrel{(4.18)}{=} \lim_{x \rightarrow a^+} \left[p! \cdot \frac{f^{(n)}(c) - f^{(n)}(a)}{(x-a)^p f^{(n+p)}(\theta)} \right] \stackrel{(4.17)}{=} \lim_{x \rightarrow a^+} \left[p! \cdot \frac{\frac{n! [f(x) - \sum_{j=0}^{n-1} \frac{f^{(j)}(a)}{j!} (x-a)^j]}{(x-a)^n} - f^{(n)}(a)}{(x-a)^p f^{(n+p)}(\theta)} \right] \\ &= \lim_{x \rightarrow a^+} \left[n! p! \cdot \frac{f(x) - \sum_{j=0}^n \frac{f^{(j)}(a)}{j!} (x-a)^j}{(x-a)^{n+p} f^{(n+p)}(\theta)} \right] = \frac{n! p!}{f^{(n+p)}(a)} \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{\frac{f^{(n+p)}(a)}{(n+p)!} (x-a)^{n+p} + o[(x-a)^{n+p}]}{(x-a)^{n+p}} \\ &= \frac{n! p!}{(n+p)!}. \end{aligned}$$

故 $\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{c-a}{x-a} = \sqrt[p]{\frac{n! p!}{(n+p)!}}$.

□

4.4 性态分析类

定理 4.4 (积分中值定理)

(1) $f(x) \in R[a, b]$, $g(x)$ 是 $[a, b]$ 上的非负递减函数, 则存在 $\zeta \in [a, b]$, 使得

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = g(a) \int_a^\zeta f(x)dx.$$

(2) $f(x) \in R[a, b]$, $g(x)$ 是 $[a, b]$ 上的非负递增函数, 则存在 $\zeta \in [a, b]$, 使得

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = g(b) \int_\zeta^b f(x)dx.$$

(3) $f(x) \in R[a, b]$, $g(x)$ 是 $[a, b]$ 上的单调函数, 则存在 $\zeta \in [a, b]$, 使得

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = g(a) \int_a^\zeta f(x)dx + g(b) \int_\zeta^b f(x)dx.$$

(4) $f(x) \in R[a, b]$ 且不变号, $g(x) \in R[a, b]$, 则存在 η 介于 $g(x)$ 上下确界之间, 使得

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = \eta \int_a^b f(x)dx.$$

(5) $f(x) \in R[a, b]$ 且不变号, $g(x) \in C[a, b]$, 则存在 $\zeta \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = g(\zeta) \int_a^b f(x)dx.$$

(6) 若 (1)(2)(3) 中再加入条件 $g(x)$ 在 (a, b) 中不为常数, 则结论可以加强到 $\zeta \in (a, b)$.



定理 4.5 (Hadamard 不等式)

f 是 $[a, b]$ 上的下凸函数, 则

$$\frac{f(a) + f(b)}{2} \geq \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x)dx \geq f\left(\frac{a+b}{2}\right).$$



笔记 一句话积累证明: 一边是区间再现, 一边是换元到区间 $[0, 1]$.

注 左边的不等式证明中的线性换元构造思路: 我期望找到一个线性函数 $g(t)$, 使得令 $x = g(t)$ 换元后, 有

$$\int_a^b f(x)dx \xlongequal{x=g(t)} \int_0^1 f(g(t))g'(t)dt.$$

即 $g(0) = a, g(1) = b$. 因此 $g(t) = \frac{b-a}{1-0}t + a = a + (b-a)t$. 从而

$$\int_a^b f(x)dx \xlongequal{x=a+(b-a)t} (b-a) \int_0^1 f(a+(b-a)t)dt = (b-a) \int_0^1 f((1-t)a+bt)dt.$$

证明 由 f 在 $[a, b]$ 上下凸, 一方面, 我们有

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x)dx = \int_0^1 f(a(1-t)+bt)dt \leq \int_0^1 [(1-t)f(a) + tf(b)]dt = \frac{f(a) + f(b)}{2}.$$

另一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x)dx &= \frac{1}{b-a} \int_a^b f(a+b-x)dx = \frac{1}{2(b-a)} \int_a^b [f(a+b-x) + f(x)]dx \\ &\geq \frac{1}{b-a} \int_a^b f\left(\frac{a+b}{2}\right)dx = f\left(\frac{a+b}{2}\right). \end{aligned}$$

故结论成立. □

例题 4.18 若 f 在 $[0, 1]$ 上有二阶导数且 $f(0) = 0, f(1) = 1, \int_0^1 f(x)dx = 1$, 证明存在 $\eta \in (0, 1)$ 使得 $f''(\eta) < -2$.

注 通过 $f''(x) + 2 \geq 0, \forall x \in (0, 1)$ 来推出 $f + x^2$ 在 $[0, 1]$ 下凸: 实际上, 令 $g = f + x^2$, 则 $g'' \geq 0, \forall x \in (0, 1)$, 从而 g 在 $(0, 1)$ 下凸. 因为 $g = f + x^2 \in C[0, 1]$ 和 g 在 $(0, 1)$ 下凸我们就有

$$g(\lambda x + (1-\lambda)y) \leq \lambda g(x) + (1-\lambda)g(y), \forall x, y \in (0, 1), \lambda \in [0, 1].$$

上式中令 x 趋于 0 或者 1 也成立, 再令 y 趋于 1 或者 0 也成立. 因此 g 在 $[0, 1]$ 下凸.

证明 若不然, 对任何 $x \in (0, 1)$ 都有 $f''(x) \geq -2$, 于是 $f(x) + x^2$ 是 $[0, 1]$ 的下凸函数. 于是由 Hadamard 不等式我们知道

$$\frac{4}{3} = \int_0^1 [f(x) + x^2]dx \leq \frac{f(0) + 0^2 + f(1) + 1^2}{2} = \frac{2}{2} = 1,$$

矛盾! 现在存在 $\eta \in (0, 1)$ 使得 $f''(\eta) < -2$. □

命题 4.3

设 $f \in C^3(\mathbb{R})$ 满足

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \geq f\left(\frac{a+b}{2}\right), \quad \forall b \neq a.$$

证明: f 是下凸函数.



注 本题对一般情况 $f \in C(\mathbb{R})$ 也成立, 需要取磨光函数如卷积磨光核. 详细见清疏讲义.



笔记 这就是 Hadamard 不等式的反向结果.

证明 当 $f \in C^3(\mathbb{R})$ 时, 由 L'Hospital 法则可得

$$\begin{aligned} & \lim_{b \rightarrow a^+} \frac{\int_a^b f(x) dx - (b-a)f\left(\frac{a+b}{2}\right)}{\frac{1}{6}(b-a)^3} \\ &= \lim_{b \rightarrow a^+} \frac{f(b) - f\left(\frac{a+b}{2}\right) - \frac{b-a}{2}f'\left(\frac{a+b}{2}\right)}{\frac{1}{2}(b-a)^2} \\ &= \lim_{b \rightarrow a^+} \frac{f'(b) - f'\left(\frac{a+b}{2}\right) - \frac{b-a}{4}f''\left(\frac{a+b}{2}\right)}{b-a} \\ &= \lim_{b \rightarrow a^+} \left(f''(b) - \frac{3}{4}f''\left(\frac{a+b}{2}\right) - \frac{b-a}{8}f'''\left(\frac{a+b}{2}\right) \right) \\ &= \frac{1}{4}f''(a) \geq 0. \end{aligned}$$

因此

$$f''(x) \geq 0, \forall x \in \mathbb{R},$$

所以 f 是下凸函数.



定理 4.6 (Darboux 中值定理/导数介值定理)

设 $f \in D[a, b]$, 对任何介于 $f'(a), f'(b)$ 之间的 η , 存在 $c \in [a, b]$ 使得 $f'(c) = \eta$.



证明 和连续函数介值定理一样, 我们只需证明导数满足零点定理. 即不妨设 $f'(a) < 0 < f'(b)$, 去找 $c \in [a, b]$ 使得 $f'(c) = 0$. 事实上由极限保号性和

$$\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} = f'(a) < 0, \quad \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f(x) - f(b)}{x - b} = f'(b) > 0,$$

我们知道存在 $\delta > 0$, 使得

$$f(x) < f(a), \forall x \in (a, a + \delta], f(x) < f(b), \forall x \in [b - \delta, b).$$

因此 f 最小值在内部取到, 此时由费马引理知最小值的导数为 0, 从而证毕!



定理 4.7 (加强的 Rolle 中值定理)

(a): 设 $f \in D(a, b)$ 且在 $[a, b]$ 上 f 有介值性, 则若 $f(a) = f(b)$, 必然存在 $\theta \in (a, b)$, 使得 $f'(\theta) = 0$.

(b): 设 $f \in C[a, +\infty) \cap D^1(a, +\infty)$ 满足 $f(a) = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$, 则存在 $\theta \in (a, +\infty)$ 使得 $f'(\theta) = 0$.



笔记 一旦罗尔成立, 所有中值定理和插值定理都会有类似的结果, 可以具体情况具体分析.

证明 对于 (a): 不妨设 f 不恒为常数, 则可取 $x_0 \in (a, b)$, 使得 $f(x_0) \neq f(a)$, 不妨设 $f(x_0) > f(a)$, 则由 f 的介值性, 我们知道存在 $x_1 \in (a, x_0), x_2 \in (x_0, b)$, 使得

$$f(x_1) = \frac{f(a) + f(x_0)}{2}, \quad f(x_2) = \frac{f(b) + f(x_0)}{2}.$$

因为 $f(a) = f(b)$, 我们知道 $f(x_1) = f(x_2)$, 由 Rolle 中值定理 ($f \in C[x_1, x_2] \cap D(x_1, x_2)$) 可知, 存在 $\theta \in (a, b)$, 使得

$f'(\theta) = 0$. 这就完成了 (a) 的证明.

对于 (b): 若对任何 $x \in (0, +\infty)$ 使得 $f'(x) \neq 0$, 则由导数介值性可知, f' 恒大于 0 或恒小于 0(否则, 由导数介值性可得到一个零点). 从而 f 在 $[0, +\infty)$ 严格单调, 不妨设为递增. 现在

$$f(x) \geq f(a+1) > f(a), \forall x \geq a+1,$$

于是

$$f(a) = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \geq f(a+1) > f(a),$$

这就是一个矛盾! 因此我们证明了存在 $\theta \in (a, +\infty)$ 使得 $f'(\theta) = 0$.

□

例题 4.19 设 f 在 $[a, b]$ 连续, (a, b) 可微且不是线性函数, 证明: 存在 $\xi \in (a, b)$ 使得

$$f'(\xi) > \frac{f(b) - f(a)}{b - a}.$$

 **笔记** $g(x) = f(x) - f(a) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a)$ 这个线性构造必须记忆!

证明 考虑

$$g(x) = f(x) - f(a) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a),$$

则 $g(a) = g(b) = 0$ 且 g 不是常值函数. 因 $g' \leq 0$ 恒成立会导致 g 在 $[a, b]$ 递减, 从而 $0 = g(b) < g(a) = 0$, 这不可能! 现在存在 $\xi \in (a, b)$ 使得 $g'(\xi) > 0$, 即结论成立.

□

例题 4.20

1. 设 $f \in C[0, \pi] \cap D(0, \pi)$ 满足

$$\int_0^\pi f(x) \cos x dx = \int_0^\pi f(x) \sin x dx = 0.$$

证明存在 $\xi \in (0, \pi)$, 使得 $f'(\xi) = 0$.

2. 设 $f \in C[0, \frac{\pi}{2}]$ 满足

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} f(x) dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(x) \cos x dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(x) \sin x dx = 0. \quad (4.19)$$

证明: f 在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 至少有三个互不相同的零点.

 **笔记** 此类给出积分等式的问题, 往往就是寻求给定积分等式的线性组合来实现目标. 即本题我们要寻求合适的 $a, b \in \mathbb{R}$, 考虑积分

$$\int_0^\pi f(x)(a \cos x + b \sin x) dx = 0.$$

一句话证明本题 1 问, 就是寻求合适的 $a, b \in \mathbb{R}$, 使得 $a \cos x + b \sin x$ 和 f 的符号一致. 第 2 问可以待定系数解方程来得到线性组合 $a \cos x + b \sin x + c$ 使其与 f 符号一致.

证明

1. 我们只需断言 f 在 $[0, \pi]$ 至少有两个不相同的零点, 之后由罗尔定理就给出了存在 $\xi \in (0, \pi)$, 使得 $f'(\xi) = 0$. 由积分中值定理可知, 存在 $x_0 \in (0, \pi)$, 使得

$$\int_0^\pi f(x) \sin x dx = f(x_0) \int_0^\pi \sin x dx = 2f(x_0) = 0.$$

即 f 在 $(0, \pi)$ 上有一个零点 x_0 . 若 f 在 $[0, \pi]$ 只有一个零点, 则 f 在 $[0, x_0), (x_0, \pi]$ 不同号(否则 f 不变号, 则由积分中值定理知 $\sin \eta \int_0^\pi f(x) dx = \int_0^\pi f(x) \sin x dx = 0, \eta \in (0, \pi)$, 从而 $f = 0$, 这与 f 只有一个零点矛盾!). 不妨设

$$f(x) < 0, \forall x \in [0, x_0), f(x) > 0, \forall x \in (x_0, \pi].$$

此时根据条件就有

$$\int_0^\pi f(x) \sin(x - x_0) dx = \int_0^\pi f(x) (\cos x_0 \sin x - \sin x_0 \cos x) dx = \cos x_0 \int_0^\pi f(x) \sin x dx - \sin x_0 \int_0^\pi f(x) \cos x dx = 0.$$

又注意到

$$f(x) \sin(x - x_0) > 0, \forall x \in [0, \pi] \setminus \{x_0\},$$

故 $0 = \int_0^\pi f(x) \sin(x - x_0) dx > 0$, 矛盾! 这就完成了证明.

2. 不妨设 f 不恒为 0, 由积分中值定理和(4.19)式知 f 在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 至少有一个零点且变号. 若 f 在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 只变号一次, 设在 x_1 变号, 则 f 在 x_1 两侧符号相反. 由(4.19)式得

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} f(x) \sin(x - x_1) dx = 0.$$

但是 $f(x) \sin(x - x_1)$ 不变号, 这就推出 $f = 0$ 而矛盾! 若 f 在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 只变号两次, 设变号处为 x_1, x_2 , 考虑

$$g(x) \triangleq \sin x - \frac{\sin x_2 - \sin x_1}{\cos x_2 - \cos x_1} \cos x + \frac{\sin(x_2 - x_1)}{\cos x_2 - \cos x_1}, x \in [0, \frac{\pi}{2}].$$

注意到

$$g'(x) = \cos x + \frac{\sin x_2 - \sin x_1}{\cos x_2 - \cos x_1} \sin x = \frac{\sin x_2 - \sin x_1}{\cos x_2 - \cos x_1} \cos x \left(\tan x - \frac{\cos x_1 - \cos x_2}{\sin x_2 - \sin x_1} \right),$$

我们知 g' 在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 有且只有一个零点. 注意 $g(x_1) = g(x_2) = 0$, 我们由罗尔中值定理知道 g' 在 (x_1, x_2) 有零点, 因此 g 当且仅当在 x_1, x_2 变号. 现由(4.19)式得

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} f(x) g(x) dx = 0.$$

但是 fg 不变号, 故 $f = 0$, 这就是一个矛盾! 至此我们证明了 f 在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 至少有三个互不相同的零点.

□

例题 4.21 设 $f \in C([0, \pi])$, 证明: 不能同时有

$$\int_0^\pi |f(x) - \sin x|^2 dx < \frac{\pi}{4} \quad \text{和} \quad \int_0^\pi |f(x) - \cos x|^2 dx < \frac{\pi}{4}. \quad (4.20)$$

又问何时上面的两个不等式成为等式?

证明 利用 Cauchy-Schwarz 不等式, 有

$$\int_0^\pi (\sin x - f(x))(f(x) - \cos x) dx \leq \left(\int_0^\pi |\sin x - f(x)|^2 dx \right)^{1/2} \left(\int_0^\pi |f(x) - \cos x|^2 dx \right)^{1/2}.$$

因此当式(4.20)中的两个不等式同时成立时, 有

$$\begin{aligned} \int_0^\pi |\sin x - \cos x|^2 dx &= \int_0^\pi |\sin x - f(x) + f(x) - \cos x|^2 dx \\ &= \int_0^\pi |\sin x - f(x)|^2 dx + \int_0^\pi |f(x) - \cos x|^2 dx + 2 \int_0^\pi (\sin x - f(x))(f(x) - \cos x) dx \\ &< \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} + 2 \cdot \frac{\pi}{4} = \pi. \end{aligned}$$

但是, 另一方面,

$$\int_0^\pi |\sin x - \cos x|^2 dx = \int_0^\pi (1 - \sin 2x) dx = \pi.$$

于是所证结论成立.

当式(4.20)中两个不等式都是等式时, 应有

$$\int_0^\pi (\sin x - f(x))(f(x) - \cos x) dx = \left(\int_0^\pi |\sin x - f(x)|^2 dx \right)^{1/2} \left(\int_0^\pi |f(x) - \cos x|^2 dx \right)^{1/2} = \frac{\pi}{4}.$$

此时, 由 Cauchy-Schwarz 不等式等号成立充要条件知

$$a \sin x - a f(x) = b f(x) - b \cos x \implies f(x) = \frac{a \sin x + b \cos x}{a + b}, \quad a, b \in \mathbb{R}.$$

从而

$$\begin{aligned}
 & \int_0^\pi |f(x) - \sin x|^2 dx = \int_0^\pi |f(x) - \cos x|^2 dx = \frac{\pi}{4} \\
 \iff & \int_0^\pi \left| \frac{b(\cos x - \sin x)}{a+b} \right|^2 dx = \int_0^\pi \left| \frac{a(\sin x - \cos x)}{a+b} \right|^2 dx = \frac{\pi}{4} \\
 \iff & \frac{b^2}{(a+b)^2} \int_0^\pi (1 - \sin 2x) dx = \frac{a^2}{(a+b)^2} \int_0^\pi (1 - \sin 2x) dx = \frac{\pi}{4} \\
 \iff & \frac{b^2\pi}{(a+b)^2} = \frac{a^2\pi}{(a+b)^2} = \frac{\pi}{4} \iff \frac{a}{a+b} = \frac{b}{a+b} = \frac{1}{2} \\
 \iff & a = b = 1.
 \end{aligned}$$

故 $f(x) = \frac{\sin x + \cos x}{2}$. 或者直接验证

$$\begin{aligned}
 & \int_0^\pi \left(f(x) - \frac{\sin x + \cos x}{2} \right)^2 dx = \int_0^\pi \left(\frac{\sin x - f(x)}{2} - \frac{f(x) - \cos x}{2} \right)^2 dx \\
 & = \frac{1}{4} \int_0^\pi |\sin x - f(x)|^2 dx + \frac{1}{4} \int_0^\pi |f(x) - \cos x|^2 dx - \frac{1}{2} \int_0^\pi (\sin x - f(x))(f(x) - \cos x) dx \\
 & = \frac{\pi}{16} + \frac{\pi}{16} - \frac{\pi}{8} = 0.
 \end{aligned}$$

又 f 为连续函数, 故 $f(x) = \frac{\sin x + \cos x}{2}$. □

例题 4.22 设 $f(x) \in C[0, 1]$, 证明:

(1) 存在唯一的 $\xi \in (0, 1)$, 使得

$$\int_0^\xi e^{f(t)} dt = \int_\xi^1 e^{-f(t)} dt$$

(2) 对任何大于 1 的正整数 n , 存在唯一的 $\xi_n \in (0, 1)$, 使得

$$\int_{\frac{1}{n}}^{\xi_n} e^{f(t)} dt = \int_{\xi_n}^1 e^{-f(t)} dt$$

并求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \xi_n$.

证明

(1) 令 $F(x) = \int_0^x e^{f(t)} dt - \int_x^1 e^{-f(t)} dt$, 则 $F(0) = - \int_0^1 e^{-f(t)} dt < 0$, $F(1) = \int_0^1 e^{f(t)} dt > 0$. 又 $F'(x) = e^{f(x)} + e^{-f(x)} > 0$, 故由零点存在定理可知, 存在唯一的 $\xi \in (0, 1)$, 使得 $F(\xi) = 0$, 即 $\int_0^\xi e^{f(t)} dt = \int_\xi^1 e^{-f(t)} dt$.

(2) 令 $F_n(x) = \int_{\frac{1}{n}}^x e^{f(t)} dt - \int_x^1 e^{-f(t)} dt$, 则 $F_n\left(\frac{1}{n}\right) = - \int_{\frac{1}{n}}^1 e^{-f(t)} dt < 0$, $F_n(1) = \int_x^1 e^{-f(t)} dt > 0$. 又 $F'_n(x) = e^{f(x)} + e^{-f(x)} > 0$, 故由零点存在定理可知, 存在唯一的 $\xi_n \in \left(\frac{1}{n}, 1\right)$, 使得 $F(\xi_n) = 0$, 即

$$\int_{\frac{1}{n}}^{\xi_n} e^{f(t)} dt = \int_{\xi_n}^1 e^{-f(t)} dt. \quad (4.21)$$

因为 $\xi_n \in (0, 1), \forall n \in \mathbb{N}$, 所以由聚点定理可知, $\{\xi_n\}$ 存在收敛子列. 任取 $\{\xi_n\}$ 的一个收敛子列 $\{\xi_{n_k}\}$, 设

$\lim_{k \rightarrow \infty} \xi_{n_k} = a$, 则由(4.21)式可知

$$\int_{\frac{1}{n_k}}^{\xi_{n_k}} e^{f(t)} dt = \int_{\xi_{n_k}}^1 e^{-f(t)} dt.$$

令 $k \rightarrow \infty$, 由归结原则得到

$$\int_0^a e^{f(t)} dt = \int_a^1 e^{-f(t)} dt.$$

由(1)可知 $a = \xi$. 故由**命题 1.1(a)**可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} \xi_n = \xi$.

□

例题 4.23 设 $f \in C(0, 1)$ 且存在互不相同的 $x_1, x_2, x_3, x_4 \in (0, 1)$ 满足

$$a = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} < \frac{f(x_4) - f(x_3)}{x_4 - x_3} = b.$$

证明 对任何 $\lambda \in (a, b)$, 存在互不相同的 $x_5, x_6 \in (0, 1)$, 使得 $\lambda = \frac{f(x_6) - f(x_5)}{x_6 - x_5}$.

证明 要证原结论, 等价于对 $\forall \lambda \in (a, b)$, 存在 $x_5 \neq x_6$ 且 $x_5, x_6 \in (0, 1)$, 使得

$$f(x_6) - f(x_5) = \lambda(x_6 - x_5) \iff f(x_6) - \lambda x_6 = f(x_5) - \lambda x_5.$$

即证 $f(x) - \lambda x$ 在 $(0, 1)$ 上不是单射. 又由命题 5.10 及 $f \in C(0, 1)$, 故只须证 $f(x) - \lambda x$ 不是严格单调的. 对 $\forall \lambda \in (a, b)$, 令 $g(x) = f(x) - \lambda x$, 不妨设 $x_2 > x_1, x_4 > x_3$, 则

$$\frac{g(x_2) - g(x_1)}{x_2 - x_1} = a - \lambda < 0, \quad \frac{g(x_4) - g(x_3)}{x_4 - x_3} = b - \lambda > 0.$$

从而 $g(x_2) < g(x_1), g(x_4) > g(x_3)$, 故 g 在 $(0, 1)$ 上非严格单调, 结论得证.

□

例题 4.24 $f \in D[a, b]$, 且在 (a, b) 上 f' 有零点. 证明: 存在 $\theta \in (a, b)$, 使得

$$f'(\theta) = \frac{f(\theta) - f(a)}{b - a}.$$

注 先考虑微分方程: $y' = \frac{y - f(a)}{b - a}$, 解出微分方程的解, 再常数变易得到构造函数: $g(x) = \frac{f(x) - f(a)}{e^{\frac{x}{b-a}}}$.

证明 令 $g(x) = \frac{f(x) - f(a)}{e^{\frac{x}{b-a}}}$, 则 $g'(x) = \frac{f'(x) - \frac{f(x) - f(a)}{b-a}}{e^{\frac{x}{b-a}}}$. 由条件可设 $f'(c) = 0, c \in (a, b)$. 从而 $g'(c) = \frac{-\frac{f(c) - f(a)}{b-a}}{e^{\frac{c}{b-a}}} = 0$.

(i) 若 $g'(c) = 0$, 则取 $\theta = c$ 即可.

(ii) 若 $g'(c) > 0$, 则 $f(c) < f(a)$. 从而 $g(c) = \frac{f(c) - f(a)}{e^{\frac{c}{b-a}}} < 0$. 于是存在 $\delta > 0$, 使得

$$g(x) \leq g(c) < 0, \forall x \in (c - \delta, c + \delta).$$

又因为 $g(a) = 0$, 所以

$$g(x) \leq g(c) < g(a), \forall x \in (c - \delta, c + \delta). \quad (4.22)$$

由于 $g \in C[a, c]$, 因此 g 在 $[a, c]$ 上存在最小值. 由(4.22)式可知, g 在 $[a, c]$ 上的最小值一定在 (a, c) 上取到. 故存在 $\theta \in (a, c)$, 使得

$$g(\theta) = \min_{x \in (a, c)} g(x).$$

由 Fermat 引理可知, $g'(\theta) = 0$, 即 $f'(\theta) = \frac{f(\theta) - f(a)}{b - a}$.

(iii) 若 $g'(c) < 0$, 则由 (ii) 同理可证, 存在 $\theta \in (a, b)$, 使得 $f'(\theta) = \frac{f(\theta) - f(a)}{b - a}$.

□

例题 4.25 设 $f \in C[0, 1]$ 满足 $\int_0^1 f(x) dx = 0, \int_0^1 x f(x) dx = 1$, 证明: 存在 $\xi \in [0, 1]$ 使得 $|f(\xi)| = 4$.

笔记 考虑题目条件的线性组合, 待定 $a \in \mathbb{R}$ 考虑

$$1 = \left| \int_0^1 (x - a) f(x) dx \right| \leq \int_0^1 |x - a| \cdot |f(x)| dx \leq \max_{x \in [0, 1]} |f(x)| \cdot \int_0^1 |x - a| dx.$$

为了使放缩最精确, 我们希望右边积分 $\int_0^1 |x - a| dx$ 达到最小, 容易知道是 $a = \frac{1}{2}$.

证明 注意到

$$1 = \left| \int_0^1 \left(x - \frac{1}{2} \right) f(x) dx \right| \leq \int_0^1 \left| x - \frac{1}{2} \right| \cdot |f(x)| dx \leq \max_{x \in [0, 1]} |f(x)| \cdot \int_0^1 \left| x - \frac{1}{2} \right| dx = \frac{1}{4} \max_{x \in [0, 1]} |f(x)|.$$

故 $\max_{x \in [0, 1]} |f(x)| \geq 4$. 又因为 $\int_0^1 f(x) dx = 0$, 所以由积分中值定理可知, 存在 $\theta \in (0, 1)$, 使得 $f(\theta) = |f(\theta)| = 0$. 从而由介值定理可知, 存在 $\xi \in [0, 1]$, 使得 $|f(\xi)| = 4$.

□

例题 4.26 已知 f 在 $[-1, 1]$ 上二阶可导, 且 $f(0) = f'(0) = 0, f(-1) = -1, f(1) = 1$. 证明:

- (i) 存在 $\xi \in (-1, 1)$, 使得 $|f''(\xi)| > 2$;
- (ii) 存在 $\eta \in (-1, 1)$, 使得 $|f''(\eta)| < 2$.

证明 (i) 反证, 假设 $|f''(x)| \leq 2, \forall x \in (-1, 1)$. 令 $g(x) \triangleq f(x) - x^2, x \in [0, 1]$. 则

$$g'(x) = f'(x) - 2x, \quad g''(x) = f''(x) - 2 \leq 0, \quad \forall x \in [0, 1]$$

从而 $g'(x)$ 在 $[0, 1]$ 上单调递减. 又 $g'(0) = 0$, 故

$$g'(x) \leq g'(0) = 0, \quad \forall x \in [0, 1]$$

因此 $g(x)$ 在 $[0, 1]$ 上单调递减. 又 $g(1) = g(0) = 0$, 故

$$0 = g(1) \leq g(x) \leq g(0) = 0 \implies g(x) = 0, \quad \forall x \in [0, 1]$$

即

$$f(x) = x^2, \quad \forall x \in [0, 1]$$

再令 $h(x) \triangleq f(x) + x^2, x \in [-1, 0]$, 则同理可得 $h(x) = 0, \forall x \in [-1, 0]$. 即

$$f(x) = -x^2, \quad \forall x \in [-1, 0]$$

综上,

$$f(x) = \begin{cases} x^2, & x \in [0, 1] \\ -x^2, & x \in [-1, 0) \end{cases}$$

但此时 $f''(0^+) = 2 \neq -2 = f''(0^-)$, 故 f 此时在 $x = 0$ 处二阶不可导, 矛盾! 故结论成立.

(ii) 令

$$g(x) \triangleq f(x) - x^2, \quad h(x) \triangleq f(x) + x^2$$

则 $g(0) = g(1) = h(0) = h(-1) = 0, g'(0) = h'(0) = 0$. 由 Rolle 中值定理知, 存在 $x_1 \in (0, 1), x_2 \in (-1, 0)$, 使得

$$g'(x_1) = g'(0) = 0, \quad h'(x_2) = h'(0) = 0$$

再由 Rolle 中值定理知, 存在 $\xi_1 \in (0, x_1), \xi_2 \in (x_2, 0)$, 使得

$$g''(\xi_1) = h''(\xi_2) = 0$$

即

$$f''(\xi_1) = 2, \quad f''(\xi_2) = -2$$

再由导数的介值性知, 存在 $\xi \in (0, 1)$, 使得

$$f''(\xi_2) < f''(\xi) < f''(\xi_1) \implies |f''(\xi)| < 2$$

□

第5章 函数性态分析

5.1 基本性态分析模型

命题 5.1 (多个函数取最值或者中间值)

设 f, g, h 是定义域上的连续函数, 则

(a): $\max\{f, g\}, \min\{f, g\}$ 是定义域上的连续函数.

(b): $\text{mid}\{f, g, h\}$ 是定义域上的连续函数.



注 这里 $\text{mid}\{f, g, h\}$ 表示取中间值函数, 显然这个命题可以推广到多个函数的情况.

证明 只需要注意

$$\begin{aligned}\max\{f, g\} &= \frac{f + g + |f - g|}{2}, \min\{f, g\} = \frac{f + g - |f - g|}{2}, \\ \text{mid}\{f, g, h\} &= f + g + h - \max\{f, g, h\} - \min\{f, g, h\}.\end{aligned}$$



命题 5.2

若 f 是区间 I 上处处不为零的连续函数, 则 f 在区间 I 上要么恒大于零, 要么恒小于零.



证明 用反证法, 若存在 $x_1, x_2 \in I$, 使得 $f(x_1) = f(x_2) = 0$, 则由零点存在定理可知, 存在 $\xi \in (\min\{x_1, x_2\}, \max\{x_1, x_2\})$, 使得 $f(\xi) = 0$ 矛盾.



命题 5.3

设 f 为区间 I 上的可微函数. 证明: f' 为 I 上的常值函数的充分必要条件是 f 为线性函数.



证明 充分性显然, 下证必要性. 设 $f'(x) \equiv C$, 其中 C 为某一常数. $\forall x \in I$, 任取固定点 $x_0 \in I$, 由 Lagrange 中值定理可知, 存在 $\xi \in (\min\{x_0, x\}, \max\{x_0, x\})$, 使得

$$f(x) = f'(\xi)(x - x_0) + f(x_0) = C(x - x_0) + f(x_0).$$

故 $f(x)$ 为线性函数.



定理 5.1 (闭区间上单调函数必可积)

设 f 在 $[a, b]$ 上单调, 则 $f \in R[a, b]$.



证明



命题 5.4 (连续的周期函数的基本性质)

设 $f \in C(\mathbb{R})$ 且以 $T > 0$ 为周期, 则

(1) f 在 \mathbb{R} 上有界.

(2) f 在 \mathbb{R} 上一致连续.



证明

(1) 由 $f \in C[0, T]$ 知, 存在 $M > 0$, 使得

$$|f(x)| < M, \quad \forall x \in [0, T]$$

对 $\forall y \in \mathbb{R}$, 存在 $n \in \mathbb{Z}, x \in [0, T]$, 使得 $y = nT + x$. 又 f 以 T 为周期, 故 $|f(y)| = |f(x)| < M$.

(2) 由推论 5.2 知 f 在 $[nT, (n+1)T], \forall n \in \mathbb{Z}$ 上一致连续, 从而由一致连续的拼接同理可知 f 在 $(-\infty, +\infty)$ 上也一致连续.

□

命题 5.5 (导数有正增长率则函数爆炸)

设 f 在 $[a, +\infty)$ 可微且 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = c > 0$, 证明

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty.$$

◆



笔记 类似的还有趋于 $-\infty$ 或者非极限形式的结果, 读者应该准确理解含义并使得各种情况都能复现, 我们引用本结论时未必就是本结论本身, 而是其蕴含的思想.

证明 因为 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = c > 0$, 所以存在 $X > a$, 使得 $f'(x) > \frac{c}{2}, \forall x \geq X$. 于是由 Lagrange 中值定理得到, 对 $\forall x \geq X$, 存在 $\theta \in (X, x)$, 使得

$$f(x) = f(X) + f'(\theta)(x - X) \geq f(X) + \frac{c}{2}(x - X), \forall x \geq X.$$

让 $x \rightarrow +\infty$ 就得到

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty.$$

□

命题 5.6 (函数不爆破则各阶导数必然趋于 0 的子列)

设 $k \in \mathbb{N}, a \in \mathbb{R}$ 且 $f \in D^k[a, +\infty)$, 若 $\lim_{x \rightarrow +\infty} |f(x)| \neq +\infty$, 那么存在趋于正无穷的 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset [a, +\infty)$ 使得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f^{(k)}(x_n) = 0.$$

◆



笔记 存在 $X > 0$ 使得 $f^{(k)}$ 在 $(X, +\infty)$ 要么恒正, 要么恒负的原因: 否则, 对 $\forall X > 0$, 存在 $x_1, x_2 \in (X, +\infty)$, 使得 $f^{(k)}(x_1) > 0, f^{(k)}(x_2) < 0$. 从而由导数的介值性可知, 存在 $\xi_X \in (x_1, x_2)$, 使得 $f^{(k)}(\xi_X) = 0$. 于是

令 $X = 1$, 则存在 $y_1 > 1$, 使得 $f^{(k)}(y_1) = 0$;

令 $X = \max\{2, y_1\}$, 则存在 $y_2 > \max\{2, y_1\}$, 使得 $f^{(k)}(y_2) = 0$;

.....

令 $X = \max\{n, y_{n-1}\}$, 则存在 $y_n > \max\{n, y_{n-1}\}$, 使得 $f^{(k)}(y_n) = 0$;

.....

这样得到一个数列 $\{y_n\}_{n=1}^{\infty}$ 满足

$$\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = +\infty \text{ 且 } f^{(k)}(y_n) = 0, \forall n \in \mathbb{N}.$$

这与假设矛盾!

证明 注意到若不存在 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} f^{(k)}(x_n) = 0$ 成立那么将存在 $X > 0$ 使得 $f^{(k)}$ 在 $(X, +\infty)$ 要么恒正, 要么恒负. 因此如果找不到子列使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} f^{(k)}(x_n) = 0$ 成立, 那么不妨设存在 $X_1 > 0$ 使得

$$f^{(k)}(x) > 0, \forall x \geq X_1.$$

因此 $\liminf_{x \rightarrow +\infty} f^{(k)}(x) > 0$. 否则就有 $\liminf_{x \rightarrow +\infty} f^{(k)}(x) = 0$, 从而存在子列使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} f^{(k)}(x_n) = 0$ 成立, 矛盾!

取 $m = \liminf_{x \rightarrow +\infty} f^{(k)}(x) > 0$, 则存在 $X > 0$, 使得

$$f^{(k)}(x) \geq \inf_{y \geq X} f^{(k)}(y) \geq \liminf_{x \rightarrow +\infty} f^{(k)}(x) = m > 0, \forall x \geq X. \quad (5.1)$$

于是由 Taylor 中值定理, 我们知道对每个 $x > X$, 运用(5.1), 都有

$$f(x) = \sum_{j=0}^{k-1} \frac{f^{(j)}(X)}{j!} (x-X)^j + \frac{f^{(k)}(\theta)}{k!} (x-X)^k \geq \sum_{j=0}^{k-1} \frac{f^{(j)}(X)}{j!} (x-X)^j + \frac{m}{k!} (x-X)^k,$$

于是 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$, 这就是一个矛盾! 因此我们证明了必有子列使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} f^{(k)}(x_n) = 0$ 成立. \square

定理 5.2 (严格单调和导数的关系)

1. 设 $f \in C[a, b] \cap D(a, b)$ 且 f 递增, 则 f 在 $[a, b]$ 严格递增的充要条件是对任何 $[x_1, x_2] \subset [a, b]$ 都存在 $c \in (x_1, x_2)$ 使得 $f'(c) > 0$.
2. 设 $f \in C[a, b] \cap D(a, b)$ 且 f 递减, 则 f 在 $[a, b]$ 严格递减的充要条件是对任何 $[x_1, x_2] \subset [a, b]$ 都存在 $c \in (x_1, x_2)$ 使得 $f'(c) < 0$.



证明 若 f 在 $[a, b]$ 严格递增, 则对任何 $[x_1, x_2] \subset [a, b]$, 由 Lagrange 中值定理可知, 存在 $c \in (x_1, x_2)$, 使得

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} = f'(c) > 0.$$

反之对任何 $[x_1, x_2] \subset [a, b]$ 都存在 $c \in (x_1, x_2)$ 使得 $f'(c) > 0$. 任取 $[s, t] \subset [a, b]$, 现在有 $c \in (s, t)$ 使得 $f'(c) > 0$, 则根据 $f'(c) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(c+h) - f(c)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(c) - f(c-h)}{h} > 0$, 再结合 f 递增, 可知存在充分小的 $h > 0$ 使得

$$f(s) \leq f(c-h) < f(c) < f(c+h) \leq f(t),$$

这就证明了 f 严格递增. 严格递减是类似的, 我们完成了证明. \square

定理 5.3 (单侧导数极限定理)

设 $f \in C[a, b] \cap D^1(a, b]$ 且 $\lim_{x \rightarrow a^+} f'(x) = c$ 存在, 证明 f 在 a 右可导且 $f'_+(a) = c$.



注 本结果当然也可对应写出左可导的版本和可导的版本, 以及对应的无穷版本(即 a, b, c 相应的取 $\pm\infty$).

笔记 本结果告诉我们可在 f 连续的时候用 f' 的左右极限存在性来推 f 可导性.

证明 运用 Lagrange 中值定理, 我们知道

$$\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} = \lim_{x \rightarrow a^+} f'(\theta(x)) = c,$$

其中 $\theta(x) \in (a, x)$, $\lim_{x \rightarrow a^+} \theta(x) = a$. 这就完成了这个定理的证明. \square

例题 5.1 经典光滑函数

考虑

$$f(x) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{x^2}}, & |x| > 0 \\ 0, & |x| = 0 \end{cases}$$

则 $f \in C^\infty(\mathbb{R})$ 且 $f^{(n)}(0) = 0, \forall n \in \mathbb{N}$.

证明 我们归纳证明, 首先 $f \in C^0(\mathbb{R}) = C(\mathbb{R})$, 假定 $f \in C^k(\mathbb{R})$, $k \in \mathbb{N}$. 注意到存在多项式 $p_{k+1} \in \mathbb{R}[x]$, 使得

$$f^{(k+1)}(x) = p_{k+1} \left(\frac{1}{x} \right) e^{-\frac{1}{x^2}}, \forall x \neq 0.$$

于是

$$\lim_{x \rightarrow 0} f^{(k+1)}(x) = \lim_{x \rightarrow 0} p_{k+1} \left(\frac{1}{x} \right) e^{-\frac{1}{x^2}} = \lim_{x \rightarrow \infty} p_{k+1}(x) e^{-x^2} = 0,$$

运用导数极限定理, 我们知道 $f^{(k+1)}(0) = 0$. 由数学归纳法我们知道 $f^{(n)}(0) = 0, \forall n \in \mathbb{N}$, 这就完成了证明. \square

定理 5.4 (连续函数中间值定理)

设 $p_1, p_2, \dots, p_n \geq 0$ 且 $\sum_{j=1}^n p_j = 1$. 则对有介值性函数 $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ 和 $a \leq x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n \leq b$, 必然存在 $\theta \in [x_1, x_n]$, 使得

$$f(\theta) = \sum_{j=1}^n p_j f(x_j).$$



笔记 中间值可以通过介值定理取到是非常符合直观的. 特别的当 $p_1 = p_2 = \dots = p_n = \frac{1}{n}$, 就是所谓的平均值定理

$$f(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n f(x_j).$$

证明 设

$$M = \max_{1 \leq i \leq n} f(x_i), m = \min_{1 \leq i \leq n} f(x_i).$$

于是

$$m = m \sum_{j=1}^n p_j \leq \sum_{j=1}^n p_j f(x_j) \leq M \sum_{j=1}^n p_j = M.$$

因此由 f 的介值性知: 必然存在 $\theta \in [x_1, x_n]$, 使得 $f(\theta) = \sum_{j=1}^n p_j f(x_j)$ 成立.

**命题 5.7**

若 $f \in C[a, b] \cap D(a, b)$, 则 f' 没有第一类间断点与无穷间断点.



注 也可以利用Darboux 定理进行证明.

证明 若 f' 存在第一类间断点 $c \in [a, b]$, 则由单侧导数极限定理可知

$$f'(c^-) = f'_-(c), \quad f'(c^+) = f'_+(c).$$

又因为 f 在 $x = c$ 处可导, 所以 $f'_-(c) = f'_+(c)$. 从而

$$f'(c^-) = f'_-(c) = f'_+(c) = f'(c^+).$$

即 f 在 $x = c$ 处既左连续又右连续, 故 f 在 $x = c$ 处连续, 矛盾!

由于单侧导数极限定理同样适用于单侧导数为无穷大的情况, 因此对于无穷大的情况可同理证明.

**命题 5.8**

设 f 是一个定义在区间 $I \subset \mathbb{R}$ 上的单调函数, 并且满足 $f(I) = I'$, 其中 $I' \subset \mathbb{R}$ 是一个区间, 则 f 在区间 I 上连续, 即 $f \in C(I)$.



证明 反证, 假设 f 在某个点 $c \in I$ 处间断. 若 c 在区间 I 的内部, 则由 f 在区间 I 上单调递增, 利用单调有界定理可知 $\lim_{x \rightarrow c^+} f(x)$ 和 $\lim_{x \rightarrow c^-} f(x)$ 存在, 并且

$$\lim_{x \rightarrow c^-} f(x) \leq f(c) \leq \lim_{x \rightarrow c^+} f(x).$$

又因为 $f(x)$ 在 $x = c$ 处间断, 所以上式至少有一个严格不等号成立, 故不妨设

$$\lim_{x \rightarrow c^-} f(x) \leq f(c) < \lim_{x \rightarrow c^+} f(x).$$

对 $\forall x > c$, 固定 x , 由 f 在 I 上递增可知

$$f(x) > f(y), \quad \forall y \in (c, x).$$

令 $y \rightarrow c^+$, 得 $f(x) \geq \lim_{x \rightarrow c^+} f(x)$. 对 $\forall x < c$, 由 f 在 I 上递增可知 $f(x) \leq f(c)$. 因此 $f(I) \subset (-\infty, f(c)] \cup [\lim_{x \rightarrow c^+} f(x), +\infty)$, 故 $(f(c), \lim_{x \rightarrow c^+} f(x)) \not\subset f(I)$, 但 $(f(c), \lim_{x \rightarrow c^+} f(x)) \subset I'$. 这与 $f(I) = I'$ 矛盾!

若 c 是区间 I 的端点, 则同理可得矛盾!

□

命题 5.9

定义在区间 I 上的单调函数 f 只有第一类间断点, 特别地, 若 x_0 在区间 I 的内部, 则 x_0 要么是跳跃间断点, 要么就是连续点.

◆

证明

□

命题 5.10 (连续单射等价严格单调)

设 f 是区间 I 上的连续函数, 证明 f 在 I 上严格单调的充要条件是 f 是单射.

◆

证明 必要性是显然的, 只证充分性. 如若不然, 不妨考虑 $f(x_3) < f(x_1) < f(x_2)$, $x_1 < x_2 < x_3$ (其他情况要么类似, 要么平凡), 于是由连续函数介值定理知存在 $\theta \in [x_2, x_3]$ 使得 $f(\theta) = f(x_1)$, 这就和 f 在 I 上单射矛盾! 故 f 严格单调.

□

例题 5.2 证明不存在 \mathbb{R} 上的连续函数 f 满足方程

$$f(f(x)) = e^{-x}.$$

◆

笔记 注意积累二次复合的常用处理手法, 即运用命题 5.10.

证明 假设存在满足条件的函数 f . 设 $f(x) = f(y)$, 则

$$e^{-x} = f(f(x)) = f(f(y)) = e^{-y}.$$

由 e^{-x} 的严格单调性我们知 $x = y$, 于是 f 是单射. 由命题 5.10 知 f 严格单调. 又递增和递增复合递增, 递减和递减复合也递增, 我们知道 $f(f(x)) = e^{-x}$ 递增, 这和 e^{-x} 严格递减矛盾! 故这样的 f 不存在.

□

例题 5.3 求 $k \in \mathbb{R}$ 的范围, 使得存在 $f \in C(\mathbb{R})$ 使得 $f(f(x)) = kx^9$.

笔记 取 $f(x) = \sqrt[4]{k}x^3$ 的原因: 当 $k \geq 0$ 时, 我们可待定 $f(x) = cx^3$, 需要 $c^4 x^9 = kx^9$, 从而可取 $c = \sqrt[4]{k}$.

证明 当 $k < 0$ 时, 假设存在满足条件的函数 f . 设 $f(x) = f(y)$, 则

$$kx^9 = f(f(x)) = f(f(y)) = ky^9.$$

由 kx^9 的严格单调性我们知 $x = y$, 于是 f 是单射. 由命题 5.10 知 f 严格单调. 又递增和递增复合递增, 递减和递减复合也递增, 我们知道 $f(f(x)) = kx^9$ 递增, 这和 kx^9 严格递减矛盾! 故这样的 f 不存在.

当 $k \geq 0$ 时, 取 $f(x) = \sqrt[4]{k}x^3$, 此时 $f(x)$ 满足条件.

□

命题 5.11 ($[a, b]$ 到 $[a, b]$ 的连续函数必有不动点)

设 $f : [a, b] \rightarrow [a, b]$ 是连续函数, 证明 f 在 $[a, b]$ 上有不动点.

◆

◆

笔记 注意 $[a, b] \rightarrow [a, b]$ 表示 f 是从 $[a, b] \rightarrow [a, b]$ 的映射, 右端的 $[a, b]$ 是像集而不是值域, f 可能取不到整个 $[a, b]$.

证明 考虑 $g(x) = f(x) - x \in C[a, b]$, 注意到 $g(a) \geq 0, g(b) \leq 0$, 由连续函数的零点定理知道 f 在 $[a, b]$ 上有不动点.

□

命题 5.12 (没有极值点则严格单调)

设 $f \in C[a, b]$ 且 f 在 (a, b) 没有极值点, 证明 f 在 $[a, b]$ 严格单调.

◆

证明 因为闭区间上连续函数必然取得最值, 且在 (a, b) 的最值点必然是极值点, 因此由假设我们不妨设 f 在 $[a, b]$ 端点取得最值. 不失一般性假设

$$f(a) = \min_{x \in [a, b]} f(x), f(b) = \max_{x \in [a, b]} f(x).$$

此时若在 $[a, b]$ 上 f 严格单调, 则只能是严格单调递增. 若在 $[a, b]$ 上 f 不严格递增, 则存在 $x_2 > x_1$, 使得 $f(x_2) \leq f(x_1)$.

若 $x_1 > a$, 在 $[a, x_2]$ 上我们注意到 $f(x_1) \geq \max\{f(a), f(x_2)\}$, 又由 f 的连续性可知, f 一定能在 $[a, x_2]$ 上取到最大值. 于是 f 只能在 (a, x_2) 达到最大值, 从而 f 在 (a, x_2) 存在极大值点, 这和 f 在 (a, b) 没有极值点矛盾!

若 $x_1 = a, x_2 < b$, 则注意到 $f(x_2) \leq \min\{f(a), f(b)\}$, 同样的 f 在 (a, b) 取得极小值而矛盾.

若 $x_1 = a, x_2 = b$, 则 f 恒为常数而矛盾! 这就完成了证明.

□

命题 5.13 (函数值相同的点导数值相同就一定单调)

设 $f \in D(a, b)$ 满足 $f(x_1) = f(x_2), x_1, x_2 \in (a, b)$, 必有 $f'(x_1) = f'(x_2)$, 证明 f 在 (a, b) 是单调函数.

◆

笔记 令 $\sigma = \max\{x \in [c, \xi] : f(x) = f(d)\}$ 的原因: 设 $E = \{x \in [c, \xi] : f(x) = f(d)\}$. 实际上, 这里取 $\sigma = \sup\{x \in [c, \xi] : f(x) = f(d)\}$ 也可以, 效果类似.

(1) σ 的存在性证明: 由 f 的介值性知, 存在 $\eta \in (c, \xi)$, 使得

$$f(\xi) \leq f(\eta) = f(d) \leq f(c).$$

从而 $\eta \in E = \{x \in [c, \xi] : f(x) = f(d)\}$, 故 E 非空. 又由 E 的定义, 显然 E 有界, 故由确界存在定理可知, E 存在上确界. 于是令 $\sigma = \sup\{x \in [c, \xi] : f(x) = f(d)\} \leq \xi$. 下证 $\sigma = \sup\{x \in [c, \xi] : f(x) = f(d)\} = \max\{x \in [c, \xi] : f(x) = f(d)\}$, 即 $\sigma \in E = \{x \in [c, \xi] : f(x) = f(d)\}$.

由上确界的性质可知, 存在 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ 满足 $x_n \in E$ 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \sigma$. 从而 $f(x_n) = f(d)$. 于是由 f 的连续性可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = f\left(\lim_{n \rightarrow \infty} x_n\right) = f(\sigma) = f(d).$$

故 $\sigma \in E$. 这样就完成了证明.

(2) 取 $\sigma = \max\{x \in [c, \xi] : f(x) = f(d)\}$ 的原因: 当 $f(c) \geq f(d)$ 时, $E = \{x \in [c, \xi] : f(x) = f(d)\}$ 中的其他点 $a \in E$, 可能有 $f'(a) > 0$, 也可能有 $f'(a) \leq 0$. 而 σ 一定只满足 $f'(\sigma) \leq 0$.

证明 若 f 不在 (a, b) 是单调, 则不妨设 $a < c < d < b$, 使得 $f'(c) < 0 < f'(d)$.

由 $f'(d) = \lim_{x \rightarrow d^-} \frac{f(x) - f(d)}{x - d} > 0$ 知在 d 的左邻域内, $f(x) < f(d)$. 由 $f'(c) = \lim_{x \rightarrow c^+} \frac{f(x) - f(c)}{x - c} < 0$ 知 f 在 c 的右邻域内有 $f(x) < f(c)$, 于是 $f(c), f(d)$ 不是 f 在 $[c, d]$ 上的最小值, 又由 $f \in C[c, d]$ 可知 f 在 $[c, d]$ 上一定存在最小值. 故可以设 f 在 $[c, d]$ 最小值点为 $\xi \in (c, d)$.

当 $f(c) \geq f(d)$ 时, 令

$$\sigma = \max\{x \in [c, \xi] : f(x) = f(d)\}.$$

注意到 $\sigma < \xi$. 显然 $f'(\sigma) \leq 0$, 因为如果 $f'(\sigma) > 0$ 会导致在 σ 右邻域内有大于 $f(d)$ 的点, 由介值定理可以找到 $\xi > \sigma' > \sigma$, 使得 $f(\sigma') = f(d)$ 而和 σ 是最大值矛盾! 而函数值相同的点导数值也相同, 因此 $f'(\sigma) = f'(d) > 0$, 这与 $f'(\sigma) \leq 0$ 矛盾!

当 $f(c) \leq f(d)$ 时类似可得矛盾! 我们完成了证明.

□

命题 5.14 (一个经典初等不等式)

设 $a, b \geq 0$, 证明:

$$\begin{cases} a^p + b^p \leq (a+b)^p \leq 2^{p-1}(a^p + b^p), & p \geq 1, p \leq 0 \\ a^p + b^p \geq (a+b)^p \geq 2^{p-1}(a^p + b^p), & 0 < p < 1 \end{cases} \quad (5.2)$$

笔记 不等式左右是奇次对称的, 我们可以设 $t = \frac{a}{b} \in [0, 1]$, 于是(5.2)两边同时除以 b^p 得

$$\begin{cases} t^p + 1 \leq (t+1)^p \leq 2^{p-1}(t^p + 1), & p \geq 1, p \leq 0 \\ t^p + 1 \geq (t+1)^p \geq 2^{p-1}(t^p + 1), & 0 < p < 1 \end{cases}.$$

证明 考虑 $f(t) \triangleq \frac{(t+1)^p}{1+t^p}$, $t \in [0, 1]$, 我们有

$$f'(t) = p(t+1)^{p-1} \frac{1-t^{p-1}}{(1+t^p)^2} \begin{cases} \geq 0, & p \geq 1, p \leq 0 \\ < 0, & 0 < p < 1 \end{cases}$$

于是

$$\begin{cases} 2^{p-1} = f(1) \geq f(t) \geq f(0) = 1, & p \geq 1, p \leq 0 \\ 2^{p-1} = f(1) \leq f(t) \leq f(0) = 1, & 0 < p < 1 \end{cases}$$

这就完成了证明. □

定理 5.5 (反函数存在定理)

设 $y = f(x)$, $x \in D$ 为严格增(减)函数, 则 f 必有反函数 f^{-1} , 且 f^{-1} 在其定义域 $f(D)$ 上也是严格增(减)函数. ♡

证明 设 f 在 D 上严格增. 对任一 $y \in f(D)$, 有 $x \in D$ 使 $f(x) = y$. 下面证明这样的 x 只能有一个. 事实上, 对于 D 中任一 $x_1 \neq x$, 由 f 在 D 上的严格增性, 当 $x_1 < x$ 时, $f(x_1) < y$, 当 $x_1 > x$ 时, 有 $f(x_1) > y$, 总之 $f(x_1) \neq y$. 这就说明, 对每一个 $y \in f(D)$, 都只存在唯一的一个 $x \in D$, 使得 $f(x) = y$, 从而函数 f 存在反函数 $x = f^{-1}(y)$, $y \in f(D)$.

现证 f^{-1} 也是严格增的. 任取 $y_1, y_2 \in f(D)$, $y_1 < y_2$. 设 $x_1 = f^{-1}(y_1)$, $x_2 = f^{-1}(y_2)$, 则 $y_1 = f(x_1)$, $y_2 = f(x_2)$. 由 $y_1 < y_2$ 及 f 的严格增性, 显然有 $x_1 < x_2$, 即 $f^{-1}(y_1) < f^{-1}(y_2)$. 所以反函数 f^{-1} 是严格增的. □

定理 5.6 (反函数连续定理)

若函数 f 在 $[a, b]$ 上严格单调并连续, 则反函数 f^{-1} 在其定义域 $[f(a), f(b)]$ 或 $[f(b), f(a)]$ 上连续. ♡

证明 不妨设 f 在 $[a, b]$ 上严格增. 此时 f 的值域即反函数 f^{-1} 的定义域为 $[f(a), f(b)]$. 任取 $y_0 \in (f(a), f(b))$, 设 $x_0 = f^{-1}(y_0)$, 则 $x_0 \in (a, b)$. 于是对任给的 $\varepsilon > 0$, 可在 (a, b) 上 x_0 的两侧各取异于 x_0 的点 x_1, x_2 ($x_1 < x_0 < x_2$), 使它们与 x_0 的距离小于 ε .

设与 x_1, x_2 对应的函数值分别为 y_1, y_2 , 由 f 的严格增性知 $y_1 < y_0 < y_2$. 令

$$\delta = \min\{y_2 - y_0, y_0 - y_1\}$$

则当 $y \in U(y_0; \delta)$ 时, 对应的 $x = f^{-1}(y)$ 的值都落在 x_1 与 x_2 之间, 故有

$$|f^{-1}(y) - f^{-1}(y_0)| = |x - x_0| < \varepsilon$$

这就证明了 f^{-1} 在点 y_0 连续, 从而 f^{-1} 在 $(f(a), f(b))$ 上连续.

类似地可证 f^{-1} 在其定义区间的端点 $f(a)$ 与 $f(b)$ 分别为右连续与左连续. 所以 f^{-1} 在 $[f(a), f(b)]$ 上连续. □

定理 5.7 (反函数求导定理)

设 $y = f(x)$ 为 $x = \varphi(y)$ 的反函数, 若 $\varphi(y)$ 在点 y_0 的某邻域上连续, 严格单调且 $\varphi'(y_0) \neq 0$, 则 $f(x)$ 在点 $x_0 (x_0 = \varphi(y_0))$ 可导, 且

$$f'(x_0) = \frac{1}{\varphi'(y_0)}.$$



证明 设 $\Delta x = \varphi(y_0 + \Delta y) - \varphi(y_0), \Delta y = f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)$. 因为 φ 在 y_0 的某邻域上连续且严格单调, 故 $f = \varphi^{-1}$ 在 x_0 的某邻域上连续且严格单调. 从而当且仅当 $\Delta y = 0$ 时 $\Delta x = 0$, 并且当且仅当 $\Delta y \rightarrow 0$ 时 $\Delta x \rightarrow 0$. 由 $\varphi'(y_0) \neq 0$, 可得

$$f'(x_0) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{1}{\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta y}} = \frac{1}{\varphi'(y_0)}$$



5.2 函数方程

定义 5.1

我们称 $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 满足的方程

$$f(x+y) = f(x) + f(y).$$

为 **Cauchy 方程**.



笔记 显然 $f(x) = cx, c \in \mathbb{R}$ 为 Cauchy 方程的解, 一个自然的问题是, 满足 Cauchy 方程的函数 f 是否一定是 cx ?

命题 5.15 (Cauchy 方程基本性质)

设 $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 是 Cauchy 方程: $f(x+y) = f(x) + f(y)$ 的解, 则

$$f(rx) = rf(x), \forall r \in \mathbb{Q}.$$



证明 $\forall x \in \mathbb{R}$, 由条件可知 $f(2x) = f(x) + f(x) = 2f(x)$, 然后就有

$$f(3x) = f(2x) + f(x) = 2f(x) + f(x) = 3f(x).$$

依次下去可得

$$f(nx) = nf(x), \forall n \in \mathbb{N}. \quad (5.3)$$

现在对 $\forall r = \frac{q}{p} \in \mathbb{Q}, p \neq 0, q, p \in \mathbb{Z}$. 我们由条件可得

$$rf(x) = f(rx) \Leftrightarrow qf(x) = pf\left(\frac{q}{p}x\right). \quad (5.4)$$

利用 (5.3) 式可得

$$pf\left(\frac{q}{p}x\right) = f(qx) = qf(x).$$

故由 (5.4) 式可知, 对 $\forall x \in \mathbb{R}$, 有 $rf(x) = f(rx), \forall r \in \mathbb{Q}$ 成立.

**定理 5.8**

设 $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 满足 Cauchy 方程: $f(x+y) = f(x) + f(y)$ 且 f 在 \mathbb{R} 上连续, 则

$$f(x) = f(1)x, \forall x \in \mathbb{R}.$$



证明 由命题 5.15 可知, 对 $\forall x \in \mathbb{R}$, 有

$$rf(x) = f(rx), \forall r \in \mathbb{Q}. \quad (5.5)$$

成立. 现在对每个无理数 a , 由有理数的稠密性可知, 存在有理数列 $\{r_n\}_{n=1}^{\infty}$, 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} r_n = a$. 于是由 f 的连续性及 (5.5) 式可得

$$f(ax) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(r_n x) = \lim_{n \rightarrow \infty} r_n f(x) = af(x), \forall x \in \mathbb{R}.$$

故 $f(ax) = af(x), \forall a, x \in \mathbb{R}$. 取 $x = 1$, 则 $f(a) = f(1)a, \forall a \in \mathbb{R}$.

□

定理 5.9 (Cauchy 方程基本定理)

设 $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 是 Cauchy 方程: $f(x+y) = f(x) + f(y)$ 的解, 则满足下述条件之一:

1. f 在某点连续.
2. f 在某个区间有上界或者下界.
3. f 在某个区间上单调.
4. f 在一个正测集上有界.
5. f 可测.
6. $\{(x, f(x)) : x \in \mathbb{R}\}$ 在 \mathbb{R}^2 不稠密.

我们就有 $f(x) = f(1)x, \forall x \in \mathbb{R}$.

♡

注 不妨设 f 在包含原点的对称区间 I 上有上界原因: 假设已证 f 在 $(-a, a)$ 上有上界时, 结论成立.

如果 f 在 (c, d) 上有上界, 那么记 $x_0 = \frac{c+d}{2}, a = \frac{d-c}{2}(x_0)$ 可根据我们的期望, 待定系数得到, 具体见豌豆讲义), 则 $(c, d) = (x_0 - a, x_0 + a)$, 即 f 在 $(x_0 - a, x_0 + a)$ 上有上界. 从而令 $g(x) = f(x + x_0) - f(x_0)$, 则由条件可得

$$\begin{aligned} g(x+y) &= f(x+y+x_0) - f(x_0) = f(x+y+2x_0-x_0) - f(x_0) \\ &= f(x+x_0) + f(y+x_0-x_0) - f(x_0) = f(x+x_0) + f(y+x_0) - 2f(x_0) \\ &= g(x) + g(y). \end{aligned}$$

故 $g(x)$ 满足 Cauchy 方程且在 $(-a, a)$ 上有上界, 于是由假设可知, $g(x) = g(1)x, \forall x \in \mathbb{R}$. 又注意到

$$g(x) = f(x+x_0) - f(x_0) = f(x+x_0) + f(-x_0) = f(x).$$

故 $f(x) = g(x) = g(1)x = f(1)x, \forall x \in \mathbb{R}$. 因此不妨设合理.

证明

1. 如果 f 在 x_0 连续, 则对任何 $x' \in \mathbb{R}$, 有

$$\lim_{x \rightarrow x'} f(x) = \lim_{x \rightarrow x'} f(x - x' + x_0) + \lim_{x \rightarrow x'} f(x' - x_0) = f(x_0) + f(x' - x_0) = f(x').$$

于是我们证明了 f 在 x' 连续. 于是由定理 5.8 我们知道 $f(x) = f(1)x, \forall x \in \mathbb{R}$.

2. 不妨设 f 在包含原点的对称区间 I 上有上界. 下证 f 在原点连续. 注意到由命题 5.15 我们知道

$$f(x) = \frac{f(rx)}{r}, \forall r \in \mathbb{Q} \setminus \{0\}, x \in \mathbb{R}. \quad (5.6)$$

现在对任何 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$, 取 $r_n \in \mathbb{Q} \setminus \{0\}$ 使得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} r_n = +\infty, \lim_{n \rightarrow \infty} r_n x_n = 0. \quad (5.7)$$

注意到在(5.6)中令 $r = -1$ 知 f 是奇函数, 从而 f 在 I 上有下界. 现在由于有界和无穷小之积也为无穷小, 我们由(5.6)和(5.7)得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(r_n x_n)}{r_n} = 0.$$

由 Heine 归结原理即得 f 在 $x = 0$ 连续. 故由第一点知 $f(x) = f(1)x, \forall x \in \mathbb{R}$.

3. 在区间单调自然在子区间上有界, 用第二点即得 $f(x) = f(1)x, \forall x \in \mathbb{R}$.
4. 其依托于经典结论

结论 设勒贝格可测集 A, B 的勒贝格测度都非 0, 则 $A + B$ 包含一个区间.

上述结论可以在任何一本实变函数习题集中找到, 例如徐森林. 运用此结论假设 f 在 E 上有界, E 的勒贝格测度非 0. 则 $E + E$ 包含一个区间 I , 于是对 $z \in I$, 存在 $x, y \in E$ 使得 $z = x + y$, 然后

$$|f(z)| \leq |f(x)| + |f(y)| \leq 2 \sup_E |f|.$$

由第二点即得 $f(x) = f(1)x, \forall x \in \mathbb{R}$.

5. 由 Lusin 定理, 存在有正测度的紧集 K 和 \mathbb{R} 上的连续函数 g 使得 $f(x) = g(x), \forall x \in K$, 故 f 在 K 上有界. 现在我们就可以运用上一条知 $f(x) = f(1)x, \forall x \in \mathbb{R}$.
6. 若存在 $x_0 \in \mathbb{R}$ 使得 $f(x_0) \neq f(1)x_0$, 显然 $x_0 \neq 0, 1$. 于是

$$\begin{aligned} & (1, f(1)), (x_0, f(x_0)) \text{ 线性无关} \\ \Rightarrow & \mathbb{R}^2 = \{c_1(1, f(1)) + c_2(x_0, f(x_0)) : c_1, c_2 \in \mathbb{R}\} \\ \Rightarrow & \mathbb{R}^2 = \overline{\{c_1(1, f(1)) + c_2(x_0, f(x_0)) : c_1, c_2 \in \mathbb{Q}\}} \\ \Rightarrow & \mathbb{R}^2 = \overline{\{(c_1 + c_2 x_0, f(c_1 + c_2 x_0)) : c_1, c_2 \in \mathbb{Q}\}} \\ \Rightarrow & \mathbb{R}^2 = \overline{\{(x, f(x)) : x \in \mathbb{R}\}}, \end{aligned}$$

这就证明了 $\{(x, f(x)) : x \in \mathbb{R}\}$ 在 \mathbb{R}^2 稠密. 这是一个矛盾!

□

例题 5.4 求函数方程 $2f(2x) = f(x) + x$ 的所有 \mathbb{R} 上在 $x = 0$ 的连续解.

笔记 这里也能利用强求通项和强行裂项的想法. 具体操作如下:

$\forall x \in \mathbb{R}$, 固定 x , 则由条件可知

$$f(x) = \frac{f\left(\frac{x}{2}\right)}{2} + \frac{x}{4}.$$

从而由上式归纳可得

$$f\left(\frac{x}{2^n}\right) = \frac{f\left(\frac{x}{2^{n+1}}\right)}{2} + \frac{x}{2^{n+2}}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

于是令 $x_n = f\left(\frac{x}{2^n}\right), n = 0, 1, 2, \dots$, 则

$$x_n = \frac{x_{n+1}}{2} + \frac{x}{2^{n+2}}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

对上式进行强行裂项并强求通项得到

$$\frac{x_n}{2^{n-1}} = \frac{x_{n+1}}{2^n} + \frac{x}{2^{2n+1}}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

即

$$\frac{f\left(\frac{x}{2^n}\right)}{2^{n-1}} = \frac{f\left(\frac{x}{2^{n+1}}\right)}{2^n} + \frac{x}{2^{2n+1}}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

从而

$$2x_0 - \frac{x_{n+1}}{2^n} = \sum_{k=0}^n \left(\frac{x_k}{2^{k-1}} - \frac{x_{k+1}}{2^k} \right) = \sum_{k=0}^n \frac{x}{2^{2k+1}}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

于是

$$f(x) = x_0 = \sum_{k=0}^n \frac{x}{2^{2k+2}} + \frac{x_{n+1}}{2^{n+1}} = \sum_{k=0}^n \frac{x}{2^{2k+2}} + \frac{f\left(\frac{x}{2^{n+1}}\right)}{2^{n+1}}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

这就完成了对 x_n 的强行裂项并强求通项.

注 只有除以 2 的迭代才能与 f 在 $x = 0$ 处连续联系起来, 如果是乘 2 的迭代则不行.

证明 设 f 在 $x = 0$ 处连续, $\forall x \in \mathbb{R}$, 固定 x , 则由条件可知

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{f\left(\frac{x}{2}\right)}{2} + \frac{x}{4}, \\ 2f(0) &= f(0) \Rightarrow f(0) = 0. \end{aligned} \tag{5.8}$$

从而由 f 在 $x = 0$ 处连续可知, $f(0) = \lim_{x \rightarrow 0} f(x)$. 由 (5.8) 式归纳可得

$$f\left(\frac{x}{2^n}\right) = \frac{f\left(\frac{x}{2^{n+1}}\right)}{2} + \frac{x}{2^{n+2}}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

注意到

$$\frac{f\left(\frac{x}{2^n}\right)}{2^{n-1}} = \frac{f\left(\frac{x}{2^{n+1}}\right)}{2^n} + \frac{x}{2^{2n+1}}, \forall n \in \mathbb{N}_+.$$

于是

$$f(x) = x_0 = \sum_{k=0}^n \frac{x}{2^{2k+2}} + \frac{x_{n+1}}{2^{n+1}} = \sum_{k=0}^n \frac{x}{2^{2k+2}} + \frac{f\left(\frac{x}{2^{n+1}}\right)}{2^{n+1}}, \forall n \in \mathbb{N}_+.$$

令 $n \rightarrow \infty$, 则

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x}{2^{2k+2}} + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f\left(\frac{x}{2^{n+1}}\right)}{2^{n+1}} = \frac{\frac{1}{4}x}{1 - \frac{1}{4}} = \frac{x}{3}.$$

根据 x 的任意性, 可知 $f(x) = \frac{x}{3}, \forall x \in \mathbb{R}$ 就是原方程符合条件的一个解.

再将 $f(x) = \frac{x}{3}$ 代入原方程, 仍然成立. 故 $f(x) = \frac{x}{3}, \forall x \in \mathbb{R}$ 就是原方程符合条件的所有解.

□

命题 5.16 (\mathbb{R} 上的既凸又凹的连续函数是直线)

\mathbb{R} 上的既凸又凹的连续函数是直线.

◆



笔记 容易由证明知道任何开区间 (a, b) 上的既凸又凹的连续函数也是直线.

证明 设函数 f 在 \mathbb{R} 上既凸又凹, 则

$$f\left(\frac{x+y}{2}\right) = \frac{1}{2}f(x) + \frac{1}{2}f(y).$$

考虑 $g(x) = f(x) - f(0)$, 则运用 $f(x+y) + f(0) = 2f\left(\frac{x+y}{2}\right)$ 知 g 满足 Cauchy 方程, 于是由定理 5.8 可得

$$f(x) = f(0) + [f(1) - f(0)]x.$$

□

例题 5.5 求方程 $f(xy) = xf(y) + yf(x)$ 的全部连续解.

证明 设 $f \in C(\mathbb{R})$, 则由条件可得

$$f(0) = xf(0), \forall x \in \mathbb{R} \Rightarrow f(0) = 0.$$

$$f(x) = xf(1) + f(x), \forall x \in \mathbb{R} \Rightarrow xf(1) = 0, \forall x \in \mathbb{R} \Rightarrow f(1) = 0.$$

$$f(1) = -f(-1) - f(-1) \Rightarrow f(-1) = 0.$$

$$f(-x) = xf(-1) - f(x), \forall x \in \mathbb{R} \Rightarrow f(x) + f(-x) = xf(-1) = 0, \forall x \in \mathbb{R} \Rightarrow f \text{ 是 } \mathbb{R} \text{ 上的奇函数.}$$

于是对 $\forall x, y > 0$, 我们取 $x = e^s, y = e^t, \forall s, t \in \mathbb{R}$. 则由条件可得

$$\frac{f(e^{s+t})}{e^{s+t}} = \frac{f(e^s)}{e^s} + \frac{f(e^t)}{e^t}.$$

从而 $\frac{f(e^x)}{e^x}$ 满足 Cauchy 方程, 且 $f \in C(\mathbb{R})$, 因此由定理 5.8 可得

$$\frac{f(e^x)}{e^x} = \frac{f(e)}{e}x, \forall x \in \mathbb{R} \Rightarrow f(x) = \frac{f(e)}{e}x \ln x, \forall x > 0.$$

又因为 f 是奇函数, 所以

$$f(x) = \begin{cases} \frac{f(e)}{e}x \ln x, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ \frac{f(e)}{e}x \ln(-x), & x < 0 \end{cases}$$

最后, 将上述 $f(x)$ 代入原方程, 等式仍成立. 故上述 $f(x)$ 就是原方程的全部连续解.

□

5.3 凸函数与上半连续函数

5.3.1 凸函数

定义 5.2 (下凸函数的定义)

对集 $S \subset \mathbb{R}^n$, 我们称

1. $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ 是一个 Jensen 下凸函数, 如果对任何 $x, y \in S$, 只要

$$\{\lambda x + (1 - \lambda)y : \lambda \in [0, 1]\} \subset S,$$

就有

$$f\left(\frac{x+y}{2}\right) \leq \frac{f(x) + f(y)}{2},$$

2. $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ 是一个严格 Jensen 下凸函数, 如果对任何 $x \neq y \in S$, 只要

$$\{\lambda x + (1 - \lambda)y : \lambda \in [0, 1]\} \subset S,$$

就有

$$f\left(\frac{x+y}{2}\right) < \frac{f(x) + f(y)}{2},$$

3. 称 $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ 是一个下凸函数, 如果对任何 $x, y \in S$, 只要

$$\{\lambda x + (1 - \lambda)y : \lambda \in [0, 1]\} \subset S,$$

就有

$$f(\lambda x + (1 - \lambda)y) \leq \lambda f(x) + (1 - \lambda)f(y), \forall \lambda \in [0, 1].$$

4. 称 $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ 是一个严格下凸函数, 如果对任何 $x \neq y \in S$, 只要

$$\{\lambda x + (1 - \lambda)y : \lambda \in [0, 1]\} \subset S,$$

就有

$$f(\lambda x + (1 - \lambda)y) < \lambda f(x) + (1 - \lambda)f(y), \forall \lambda \in (0, 1).$$

♣

注 同理可以定义上凸函数.

笔记

1. 我们常用 $\{\lambda x + (1 - \lambda)y : \lambda \in [0, 1]\}$ 来表示连接 x, y 的线段.
2. 显然 f 在 S 上各种凸的充要条件都是对任何含于 S 的线段 ℓ , 都有 $f|_\ell$ 上是对应的那种一元凸函数.
3. 开集上的二阶可微函数为下凸函数等价于 Hess 矩阵半正定可以在任何一般数学分析教材上找到.
4. 显然下凸蕴含 Jensen 下凸, 实际运用中我们更偏爱下凸而不是 Jensen 下凸, 推导二者的联系是重要的命题.

命题 5.17

闭区间上的连续函数如果在开区间内是下凸函数, 则必然在闭区间上也是下凸函数.

♣

证明

□

命题 5.18 (下凸函数的基本性质)

1. 下凸函数恒在割线下方

(1) 设 I 为一区间, $f : I \rightarrow \mathbb{R}$, 则 f 在 I 上下凸的充要条件是对任何 $[s, t] \subset I$ 成立

$$f(x) \leq \frac{f(s) - f(t)}{s - t}(x - s) + f(s) = \frac{t - x}{t - s}f(s) + \frac{x - s}{t - s}f(t), \forall x \in [s, t].$$

(2) 设 I 为一区间, $f : I \rightarrow \mathbb{R}$, 则 f 在 I 上严格下凸的充要条件是对任何 $[s, t] \subset I$ 成立

$$f(x) < \frac{f(s) - f(t)}{s - t}(x - s) + f(s) = \frac{t - x}{t - s}f(s) + \frac{x - s}{t - s}f(t), \forall x \in [s, t].$$

2. 下凸函数割线斜率递增

(1) 设 I 为一区间, $f : I \rightarrow \mathbb{R}$, 则 f 在 I 上下凸的充要条件是对 $x_1 < x_2 < x_3, x_1, x_2, x_3 \in I$, 有

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}.$$

(2) 设 I 为一区间, $f : I \rightarrow \mathbb{R}$, 则 f 在 I 上严格下凸的充要条件是对 $x_1 < x_2 < x_3, x_1, x_2, x_3 \in I$, 有

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} < \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}.$$

3. 可微的下凸函数恒在切线上方

(1) 设 $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ 是可微函数, 则 f 在 (a, b) 下凸的充要条件是对任何 $x_0 \in (a, b)$, 我们都有

$$f(x) \geq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0), \forall x \in (a, b).$$

(2) 设 $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ 是可微函数, 则 f 在 (a, b) 严格下凸的充要条件是对任何 $x_0 \in (a, b)$, 我们都有

$$f(x) > f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0), \forall x \in (a, b) \setminus \{x_0\}.$$

◆

注 上述下凸函数的性质都可以通过几何作图直观地得到.

笔记 下凸函数割线斜率递增也表明: 下凸函数对 $\forall x_0 \in I$, 都有 $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 单调递增.(但是不能由这个结论推出 f 下凸)

证明

1. 函数恒在割线下方

(1) 首先证明充分性 (\Rightarrow): 对 $\forall [s, t] \subset I, \forall x \in [s, t]$, 可设 $x = \lambda s + (1 - \lambda)t$, 其中 $\lambda \in [0, 1]$. 由 f 在 I 上下凸可知, 对 $\forall x \in [s, t]$, 有

$$f(x) = f(\lambda s + (1 - \lambda)t) \leq \lambda f(s) + (1 - \lambda)f(t) = (\lambda - 1)[f(s) - f(t)] + f(s).$$

再结合 $\lambda = \frac{x - t}{s - t}$ 可得

$$f(x) \leq \left(\frac{x - t}{s - t} - 1\right)[f(s) - f(t)] + f(s) = \frac{f(s) - f(t)}{s - t}(x - s) + f(s), \quad \forall x \in [s, t].$$

接着证明必要性 (\Leftarrow): 对 $\forall s, t \in I$, 不妨设 $s < t$, 则 $[s, t] \subset I$. 对 $\forall x \in [s, t]$, 可设 $x = \lambda s + (1 - \lambda)t$, 其中 $\lambda \in [0, 1]$. 则由条件可知, 对 $\forall x \in [s, t]$, 有

$$f(x) = f(\lambda s + (1 - \lambda)t) \leq \frac{f(s) - f(t)}{s - t}(\lambda s + (1 - \lambda)t - s) + f(s) = \lambda f(s) + (1 - \lambda)f(t).$$

即 $\forall s, t \in I$, 都有 $f(\lambda s + (1 - \lambda)t) \leq \lambda f(s) + (1 - \lambda)f(t)$. 故 f 在 I 上下凸.

(2) 显然 (1) 证明中的不等号可以全部改为严格不等号.

2. 下凸函数割线斜率递增

(1) 首先证明充分性 (\Rightarrow): 对于任意的 $x_1, x_2, x_3 \in I$ 且 $x_1 < x_2 < x_3$, 取 $\lambda = \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1} \in (0, 1)$. 因为函数 f 在区间 I 上下凸, 所以有

$$f(x_2) = f(\lambda x_3 + (1 - \lambda)x_1) \leq \lambda f(x_3) + (1 - \lambda)f(x_1) = \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1}f(x_3) + \frac{x_3 - x_2}{x_3 - x_1}f(x_1).$$

即

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}.$$

接下来证明必要性 (\Leftarrow): 由已知条件可知, 对于任意的 $x_1, x_2, x_3 \in I$ 且 $x_1 < x_2 < x_3$, 都满足

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}.$$

这等价于

$$f(x_2) \leq \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1} f(x_3) + \frac{x_3 - x_2}{x_3 - x_1} f(x_1). \quad (5.9)$$

进而, 对于任意的 $x_1, x_3 \in I$ 且 $x_1 < x_3$, 以及任意的 $\lambda \in [0, 1]$, 令 $x_2 = \lambda x_1 + (1 - \lambda)x_3 \in (x_1, x_3)$, 此时 $\lambda = \frac{x_3 - x_2}{x_3 - x_1}$. 于是, 根据(5.9)式可以得到

$$f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_3) = f(x_2) \leq \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1} f(x_3) + \frac{x_3 - x_2}{x_3 - x_1} f(x_1) = \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_3).$$

所以, 函数 f 在区间 I 上下凸.

(2) 显然 (1) 证明中的不等号可以全部改为严格不等号.

3. 可微的下凸函数恒在切线上方

(1) 首先证明充分性 (\Rightarrow): 由下凸函数割线斜率递增可知, 对于任意的 $x_0 \in (a, b)$, 函数 $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 在 (a, b) 上单调递增.

对于任意的 $x \in (x_0, b)$, 取 $x' \in (x_0, x)$, 根据 $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 的递增性, 有

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \geq \frac{f(x') - f(x_0)}{x' - x_0}.$$

令 $x' \rightarrow x_0^+$, 则可得

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \geq \lim_{x' \rightarrow x_0^+} \frac{f(x') - f(x_0)}{x' - x_0} = f'(x_0), \quad \forall x \in (x_0, b).$$

同理, 对于任意的 $x \in (a, x_0)$, 取 $x'' \in (x, x_0)$, 由 $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 的递增性可知

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \geq \frac{f(x'') - f(x_0)}{x'' - x_0}.$$

令 $x'' \rightarrow x_0^-$, 则有

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \geq \lim_{x'' \rightarrow x_0^-} \frac{f(x'') - f(x_0)}{x'' - x_0} = f'(x_0), \quad \forall x \in (a, x_0).$$

因此, 对于任意的 $x_0 \in (a, b)$, 都有

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \geq f'(x_0) \Leftrightarrow f(x) \geq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0).$$

接下来证明必要性 (\Leftarrow): 由已知条件可知, 对于任意的 $x_1, x_2, x_3 \in I$ 且 $x_1 < x_2 < x_3$, 都有

$$f(x_1) \geq f'(x_2)(x_1 - x_2) + f(x_2), \quad f(x_3) \geq f'(x_2)(x_3 - x_2) + f(x_2).$$

由此可以推出

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq f'(x_2) \leq \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}.$$

所以, 由下凸函数割线斜率递增可知 f 在 I 上下凸.

(2) 首先证明充分性 (\Rightarrow): 由下凸函数割线斜率递增可知, 对于任意的 $x_0 \in (a, b)$, 函数 $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 在 (a, b) 上单调递增.

对于任意的 $x \in (x_0, b)$, 取 $x' \in \left(x_0, \frac{x+x_0}{2}\right)$, 根据 $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 的递增性, 有

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} > \frac{f\left(\frac{x+x_0}{2}\right) - f(x_0)}{\frac{x+x_0}{2} - x_0} > \frac{f(x') - f(x_0)}{x' - x_0}.$$

令 $x' \rightarrow x_0^+$, 则可得

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} > \frac{f\left(\frac{x+x_0}{2}\right) - f(x_0)}{\frac{x+x_0}{2} - x_0} \geq \lim_{x' \rightarrow x_0^+} \frac{f(x') - f(x_0)}{x' - x_0} = f'(x_0), \quad \forall x \in (x_0, b).$$

同理, 对于任意的 $x \in (a, x_0)$, 取 $x'' \in \left(x_0, \frac{x+x_0}{2}\right)$, 由 $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 的递增性可知

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} > \frac{f\left(\frac{x+x_0}{2}\right) - f(x_0)}{\frac{x+x_0}{2} - x_0} > \frac{f(x'') - f(x_0)}{x'' - x_0}.$$

令 $x'' \rightarrow x_0^-$, 则有

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} > \frac{f\left(\frac{x+x_0}{2}\right) - f(x_0)}{\frac{x+x_0}{2} - x_0} \geq \lim_{x'' \rightarrow x_0^-} \frac{f(x'') - f(x_0)}{x'' - x_0} = f'(x_0), \quad \forall x \in (a, x_0).$$

因此, 对于任意的 $x_0 \in (a, b)$, 都有

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} > f'(x_0) \Leftrightarrow f(x) > f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0).$$

接下来证明必要性 (\Leftarrow): 由已知条件可知, 对于任意的 $x_1, x_2, x_3 \in I$ 且 $x_1 < x_2 < x_3$, 都有

$$f(x_1) > f'(x_2)(x_1 - x_2) + f(x_2), \quad f(x_3) > f'(x_2)(x_3 - x_2) + f(x_2).$$

由此可以推出

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} < f'(x_2) < \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}.$$

所以, 由下凸函数割线斜率递增可知 f 在 I 上下凸.

□

例题 5.6 导数递增则割线斜率也递增 函数 f 在 (a, b) 可导, 证明:

1. f' 递增的充要条件是对 $a < x_1 < x_2 < x_3 < b$, 有

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}.$$

2. f' 严格递增的充要条件是对 $a < x_1 < x_2 < x_3 < b$, 有

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} < \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}.$$

证明

(1) 首先证明必要性 (\Rightarrow): 对于满足 $a < x_1 < x_2 < x_3 < b$ 的情况, 根据 Lagrange 中值定理以及 f' 单调递增的性质可知, 存在 $y_1 \in (x_1, x_2), y_2 \in (x_2, x_3)$, 使得

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} = f'(y_1) \leq f'(y_2) = \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}.$$

由此, 必要性得证.

接着证明充分性 (\Leftarrow): 由已知条件可知, 对于满足 $a < x_1 < x_2 < b$ 的情况, 取 $c = \frac{x_1 + x_2}{2}$, 则有

$$\begin{aligned} \frac{f(s) - f(x_1)}{s - x_1} &\leq \frac{f(c) - f(x_2)}{c - x_2}, \quad \forall s \in (a, x_1), \\ \frac{f(c) - f(x_2)}{c - x_2} &\leq \frac{f(t) - f(x_2)}{t - x_2}, \quad \forall t \in (x_2, b). \end{aligned}$$

令 $s \rightarrow x_1^-, t \rightarrow x_2^+$, 可得

$$f'(x_1) = \lim_{s \rightarrow x_1^-} \frac{f(s) - f(x_1)}{s - x_1} \leq \frac{f(c) - f(x_2)}{c - x_2}, \quad \frac{f(c) - f(x_2)}{c - x_2} \leq \lim_{t \rightarrow x_2^+} \frac{f(t) - f(x_2)}{t - x_2} = f'(x_2).$$

所以有 $f'(x_1) \leq \frac{f(c) - f(x_2)}{c - x_2} \leq f'(x_2)$. 再由 x_1, x_2 的任意性可知, f' 单调递增.

(2) 首先证明必要性 (\Rightarrow): 对于满足 $a < x_1 < x_2 < x_3 < b$ 的情况, 根据 Lagrange 中值定理以及 f' 单调递增的性质可知, 存在 $y_1 \in (x_1, x_2), y_2 \in (x_2, x_3)$, 使得

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} = f'(y_1) < f'(y_2) = \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}.$$

由此, 必要性得证.

接着证明充分性 (\Leftarrow): 由条件可知, 对于满足 $a < x_1 < x_2 < b$ 的情况, 取 $c = \frac{x_1 + x_2}{2}$, 则有

$$\begin{aligned} \frac{f(s) - f(x_1)}{s - x_1} &< \frac{f(c) - f(x_2)}{c - x_2}, \quad \forall s \in (a, x_1), \\ \frac{f(c) - f(x_2)}{c - x_2} &< \frac{f(t) - f(x_2)}{t - x_2}, \quad \forall t \in (x_2, b). \end{aligned}$$

令 $s \rightarrow x_1^-, t \rightarrow x_2^-$, 可得

$$f'(x_1) = \lim_{s \rightarrow x_1^-} \frac{f(s) - f(x_1)}{s - x_1} \leqslant \frac{f(c) - f(x_2)}{c - x_2}, \quad \frac{f(c) - f(x_2)}{c - x_2} \leqslant \lim_{t \rightarrow x_2^-} \frac{f(t) - f(x_2)}{t - x_2} = f'(x_2).$$

故 $f'(x_1) \leqslant \frac{f(c) - f(x_2)}{c - x_2} \leqslant f'(x_2)$. 若 $f'(x_1) = f'(x_2)$, 则由命题 5.3 可知, f 在 $[x_1, x_2]$ 上为线性函数. 设 $f(x) = cx + d, x \in [x_1, x_2]$, 其中 $c, d \in \mathbb{R}$. 从而

$$\frac{f\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right) - f(x_1)}{\frac{x_1+x_2}{2} - x_1} = c = \frac{f(x_2) - f\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right)}{x_2 - \frac{x_1+x_2}{2}}.$$

这与已知条件矛盾! 故 $f'(x_1) < f'(x_2), \forall x_1, x_2 \in (a, b)$ 且 $a < x_1 < x_2 < b$, 即 f' 递增.

□

命题 5.19

设 f 在 (a, b) 上的下凸函数, 则 f 在 (a, b) 有上界的充要条件是 $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x), \lim_{x \rightarrow b^-} f(x)$ 存在.

◆



笔记 由这个命题及命题 5.17 可知: 如果下凸函数 f 在 (a, b) 上有上界, 则 f 可连续延拓到 $[a, b]$ (补充定义端点的函数值等于端点的左右极限即可), 使得 f 在 $[a, b]$ 上仍是下凸函数.

证明 (\Leftarrow): 由开区间下凸函数左右导数处处存在可知, f 在 (a, b) 上连续. 又因为 $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x), \lim_{x \rightarrow b^-} f(x)$ 存在, 所以由 Cantor 定理可知, f 可以连续延拓到 $[a, b]$ 上, 故 f 在 $[a, b]$ 上有界, 从而在 (a, b) 上有界.

(\Rightarrow): 由下凸函数割线斜率递增可知, 对 $\forall x_0 \in (a, b)$, 有 $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 在 $(a, x_0) \cup (x_0, b)$ 上递增. 由 f 在 (a, b) 上有上界可知, 存在 $M > 0$, 使得

$$f(x) \leqslant M, \forall x \in (a, b). \quad (5.10)$$

由 $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 的递增性及 (5.10) 式可知

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \leqslant \frac{M - f(x_0)}{x - x_0}, \forall x \in (x_0, b). \quad (5.11)$$

又因为 $\lim_{x \rightarrow b^-} \frac{M - f(x_0)}{x - x_0} = \frac{M - f(x_0)}{b - x_0}$, 所以 $\frac{M - f(x_0)}{x - x_0}$ 在 (x_0, b) 上有界. 从而存在 $K > 0$, 使得

$$\frac{M - f(x_0)}{x - x_0} \leqslant K, \forall x \in (x_0, b). \quad (5.12)$$

于是结合 (5.11) (5.12) 式可知, $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \leqslant K, \forall x \in (x_0, b)$. 进而由单调有界定理可知 $\lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 存在. 于是

$$\lim_{x \rightarrow b^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow b^-} \left[\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \cdot (x - x_0) + f(x_0) \right] = (b - x_0) \lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} + f(x_0).$$

故 $\lim_{x \rightarrow b^-} f(x)$ 也存在. 同理可得 $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x)$ 也存在.

□

命题 5.20 (下凸函数的单调性刻画)

1. 闭区间凸函数的单调性刻画

设 f 是 $[a, b]$ 上的下凸函数, 则 f 只有下述三种情况:

- (1) f 在 $[a, b]$ 递减,

- (2) f 在 $(a, b]$ 递增,
 (3) 存在 $c \in (a, b)$, 使得 f 在 $[a, c]$ 递减, 在 $[c, b]$ 递增.

2. 开区间凸函数的单调性刻画

设 f 是 (a, b) 上的下凸函数, a 允许取 $-\infty$, b 允许取 $+\infty$, 则 f 只有下述三种情况:

- (1) f 在 (a, b) 递减;
 (2) f 在 (a, b) 递增;
 (3) 存在 $c \in (a, b)$, 使得 f 在 $(a, c]$ 递减, 在 $[c, b)$ 递增.

证明

1. 闭区间凸函数的单调性刻画

由下凸函数恒在割线下方, 我们有

$$f(x) \leq \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a) + f(a) \leq \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(b - a) + f(a), \forall x \in [a, b].$$

因此 f 在 $[a, b]$ 上有上界. 于是由命题 5.19 可知, f 可以连续延拓到 $[a, b]$, 并且仍然在 $[a, b]$ 上下凸. 记这个连续延拓函数为 \bar{f} , 则 $\bar{f} \in C[a, b]$ 且 \bar{f} 在 $[a, b]$ 上也下凸.

下证

$$f(a) \geq \tilde{f}(a), f(b) \geq \tilde{f}(b). \quad (5.13)$$

事实上, 由下凸函数割线斜率递增可知 $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 在 $(x_0, b]$ 递增, 从而

$$\begin{aligned} \tilde{f}(b) &= \lim_{x \rightarrow b^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow b^-} \left[(x - x_0) \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} + f(x_0) \right] \\ &\leq \lim_{x \rightarrow b^-} \left[(x - x_0) \frac{f(b) - f(x_0)}{b - x_0} + f(x_0) \right] = f(b), \end{aligned}$$

类似可得 $f(a) \geq \tilde{f}(a)$, 这就证明了 (5.13). 下面证明 \bar{f} 的单调性.

由上述证明可知 $\bar{f} \in C[a, b]$ 且在 $[a, b]$ 上下凸. 不妨设 \bar{f} 最小值为 0. 现在设 $c \in [a, b]$ 是 f 的最小值点. 若 $c \in (a, b)$, 则对 $b \geq x_2 > x_1 > c$, 我们有

$$\frac{\bar{f}(x_2) - \bar{f}(c)}{x_2 - c} \geq \frac{\bar{f}(x_1) - \bar{f}(c)}{x_1 - c} \Rightarrow \bar{f}(x_2) \geq \frac{x_2 - c}{x_1 - c} \bar{f}(x_1) \geq \bar{f}(x_1). \quad (5.14)$$

故 \bar{f} 在 $[c, b]$ 递增. 类似可知 \bar{f} 在 $[a, c]$ 递减. 这就证明了第三种情况. 若 $c = a$, 则不等式 (5.14) 也成立, 故 \bar{f} 在 $[a, b]$ 递增. 同样的若 $c = b$ 则 \bar{f} 在 $[a, b]$ 递减.

于是再结合 (5.13) 可知

(i) 当 \bar{f} 的最小值 $c = b$ 时, 若 $f(b) > \bar{f}(b)$, 则 f 只在 $[a, b]$ 上单调递减; 若 $f(b) = \bar{f}(b)$, 则 f 在 $[a, b]$ 上单调递减. 故此时无论如何, f 一定在 $[a, b]$ 上单调递减.

(ii) 当 \bar{f} 的最小值 $c = a$ 时, 若 $f(a) > \bar{f}(a)$, 则 f 只在 $(a, b]$ 上单调递增; 若 $f(a) = \bar{f}(a)$, 则 f 在 $[a, b]$ 上单调递增. 故此时无论如何, f 一定在 $(a, b]$ 上单调递增.

(iii) 当 \bar{f} 的最小值 $c \in (a, b)$ 时, f 的单调性与 \bar{f} 相同, 即 f 在 $[c, b]$ 递增, 在 $[a, c]$ 递减.

因此结论得证.

2. 开区间凸函数的单调性刻画

由 (1) 的证明类似, 只是不再额外需要考虑 f 的两个端点, 同理证明即可. \square

命题 5.21 (无穷区间上的有界凸函数必为常函数)

设 f 为无限区间 I 上的上凸或下凸函数, 且 f 在 I 上有界, 则 f 必是常函数.

证明 不妨设 $I = (a, +\infty)$, f 为 $(a, +\infty)$ 上的下凸函数, 否则用 $-f$ 代替 f . 反证, 假设 f 在 $(a, +\infty)$ 上不是常函数, 则

存在 $x_2 > x_1 > a$, 使得 $f(x_2) > f(x_1)$. 由下凸函数割线斜率递增知, 对 $\forall x > x_2$, 都有

$$\frac{f(x) - f(x_2)}{x - x_2} \geq \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} = k > 0.$$

故

$$f(x) \geq k(x - x_2) + f(x_2), \quad \forall x > x_2.$$

令 $x \rightarrow +\infty$ 得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$, 这与 f 有界矛盾!

□

定理 5.10 (Jensen 不等式)

对集 $S \subset \mathbb{R}^n$, 设 $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ 是一个 Jensen 下凸函数, 则对完全含于 S 内的一条线段上的点 x_1, x_2, \dots, x_m 和

$$\sum_{k=1}^m \lambda_k = 1, \lambda_k \in [0, 1] \cap \mathbb{Q},$$

我们有

$$f\left(\sum_{k=1}^m \lambda_k x_k\right) \leq \sum_{k=1}^m \lambda_k f(x_k). \quad (5.15)$$

特别的,

$$f\left(\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_k\right) \leq \sum_{k=1}^m \frac{1}{m} f(x_k). \quad (5.16)$$

♡

笔记 初等的, 如果 S 性质足够好且 f 二阶可微, 读者可以通过把 f 在 $\sum_{k=1}^m \lambda_k x_k$ Taylor 展开, 然后丢掉二阶微分那项来得到不等式 $f\left(\sum_{k=1}^m \lambda_k x_k\right) \leq \sum_{k=1}^m \lambda_k f(x_k)$. 本部分的证明尽可能追求一般性.

证明 首先不等式(5.16)的建立是经典高中数学习题, 一个参考可以见Jensen 不等式. 我们归纳证明不等式(5.15), 当 $m = 2$, 设有理数 $\frac{p}{q} \in [0, 1], q > 0$, 运用不等式(5.16), 我们有

$$f\left(\frac{p}{q}x + \left(1 - \frac{p}{q}\right)y\right) = f\left(\underbrace{\frac{x}{q} + \frac{x}{q} + \dots + \frac{x}{q}}_p + \underbrace{\frac{y}{q} + \frac{y}{q} + \dots + \frac{y}{q}}_{q-p}\right) \leq \frac{p}{q}f(x) + \left(1 - \frac{p}{q}\right)f(y).$$

这就证明了(5.15)的 $m = 2$ 的情况. 假定 m 时不等式(5.15)成立, 当 $m + 1$ 时, 我们不妨设 $\sum_{i=1}^m \lambda_i \neq 0$, 否则不等式(5.15)是平凡的. 现在

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{m+1} \lambda_j f(x_j) &= \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \sum_{j=1}^m \frac{\lambda_j}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} f(x_j) + \lambda_{m+1} f(x_{m+1}) \\ &\geq \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot f\left(\sum_{j=1}^m \frac{\lambda_j}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} x_j\right) + \lambda_{m+1} f(x_{m+1}) \\ &\geq f\left(\sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \sum_{j=1}^m \frac{\lambda_j}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} x_j + \lambda_{m+1} x_{m+1}\right) = f\left(\sum_{j=1}^{m+1} \lambda_j x_j\right), \end{aligned}$$

这里最后一个不等号来自 $m = 2$ 时的不等式. 于是就对一般的 $m \in \mathbb{N}$, 我们证明了(5.15).

□

引理 5.1

设 f 在 $x_0 \in \mathbb{R}^n$ 的邻域内是 Jensen 下凸函数, 若 $\overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f(x) < \infty$, 则 f 在 x_0 连续.



证明 要证 f 在 x_0 连续, 只须证 $f(x_0) \leq \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f(x) \leq f(x_0)$.

由条件可知

$$-\infty < f(x_0) \leq \frac{f(x_0 - x) + f(x_0 + x)}{2}, \quad \forall x \in U(0).$$

令 $x \rightarrow 0$ 并取下极限, 得到

$$-\infty < f(x_0) \leq \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 - x) + f(x_0 + x)}{2} \leq \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow 0} f(x_0 - x) + \frac{1}{2} \overline{\lim}_{x \rightarrow 0} f(x_0 + x) = \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) + \frac{1}{2} \overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f(x). \quad (5.17)$$

根据条件可得

$$f(x) \leq \frac{f(x_0) + f(2x - x_0)}{2}, \quad \forall x \in U(x_0).$$

令 $x \rightarrow x_0$ 并取上极限, 则

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f(x) \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x_0) + f(2x - x_0)}{2} \leq \frac{f(x_0)}{2} + \frac{1}{2} \overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f(2x - x_0) = \frac{f(x_0)}{2} + \frac{1}{2} \overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f(x).$$

于是 $\overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f(x) \leq f(x_0)$. 将其代入 (5.17) 式得到

$$-\infty < f(x_0) \leq \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) + \frac{1}{2} \overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f(x) \leq \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) + \frac{1}{2} f(x_0) \Rightarrow f(x_0) \leq \lim_{x \rightarrow x_0} f(x).$$

因此 $f(x_0) \leq \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f(x) \leq f(x_0)$. 即 f 在 x_0 处连续.



定理 5.11 (开区间下凸函数左右导数处处存在)

(a, b) 上的下凸函数 f 在每一点左右导数都存在, 从而 f 在 (a, b) 连续.



证明 由下凸函数割线斜率递增可知, 对 $\forall x_0 \in (a, b)$, 有 $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 在 $(a, x_0) \cup (x_0, b)$ 上递增. 从而

$$\begin{aligned} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} &\leq \frac{f\left(\frac{x_0+b}{2}\right) - f(x_0)}{\frac{x_0+b}{2} - x_0}, \quad \forall x \in (a, x_0), \\ \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} &\geq \frac{f\left(\frac{x_0+a}{2}\right) - f(x_0)}{\frac{x_0+a}{2} - x_0}, \quad \forall x \in (x_0, b). \end{aligned}$$

于是 $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 在 (a, x_0) 上有上界 $\frac{f\left(\frac{x_0+b}{2}\right) - f(x_0)}{\frac{x_0+b}{2} - x_0}$, $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 在 (x_0, b) 上有下界 $\frac{f\left(\frac{x_0+a}{2}\right) - f(x_0)}{\frac{x_0+a}{2} - x_0}$.

故由单调有界定理可知 $\lim_{x \rightarrow x_0^+} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 和 $\lim_{x \rightarrow x_0^-} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$ 都存在, 即 $f'_+(x_0)$ 和 $f'_-(x_0)$ 都存在. 进而

$$\lim_{x \rightarrow x_0^+} [f(x) - f(x_0)] = f'_+(x_0) \lim_{x \rightarrow x_0^+} (x - x_0) = 0,$$

$$\lim_{x \rightarrow x_0^-} [f(x) - f(x_0)] = f'_-(x_0) \lim_{x \rightarrow x_0^-} (x - x_0) = 0.$$

因此 $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = f(x_0)$, 即 f 在 $x = x_0$ 处连续, 再根据 x_0 的任意性可知, f 在 (a, b) 上连续.



定理 5.12 (开区间上的下凸函数内闭 Lipschitz 连续)

(a, b) 上的下凸函数 f 一定内闭 Lipschitz 连续.



证明 对 $\forall [A, B] \subset (a, b)$, 任取 $s \in (a, A), t \in (B, b)$, 固定 s, t . 则由下凸函数割线斜率递增可知

$$\frac{f(A) - f(s)}{A - s} \leq \frac{f(x) - f(y)}{x - y} \leq \frac{f(t) - f(B)}{t - B}, \quad \forall x, y \in [A, B].$$

记 $L = \max \left\{ \left| \frac{f(A) - f(s)}{A - s} \right|, \left| \frac{f(t) - f(B)}{t - B} \right| \right\}$, 则

$$\left| \frac{f(x) - f(y)}{x - y} \right| \leq L \Rightarrow |f(x) - f(y)| \leq L |x - y|, \quad \forall x, y \in [A, B].$$

故 f 在 (a, b) 上内闭 Lipschitz 连续. □

定理 5.13

设 f 在 $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^n$ 的邻域内是下凸函数, 则 f 在 \mathbf{x}_0 连续. ♡



笔记 下述证明表明: n 元下凸函数一定也关于单变量下凸.

证明 仅证明 $n = 2$ 的情形, 一般情况是类似的.

由条件可知, 当 $n = 2$ 时, 设 $\delta > 0, f$ 在 $(x_0 - \delta, y_0 - \delta) \times (x_0 + \delta, y_0 + \delta)$ 上下凸, 则对 $\forall (x_1, y_1), (x_2, y_2) \in [x_0 - \delta, y_0 - \delta] \times [x_0 + \delta, y_0 + \delta], \forall \lambda \in [0, 1]$, 有

$$f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2, \lambda y_1 + (1 - \lambda)y_2) \leq \lambda f(x_1, y_1) + (1 - \lambda)f(x_2, y_2). \quad (5.18)$$

$\forall x' \in [x_0 - \delta, x_0 + \delta]$, 固定 x' , 在 (5.18) 式中令 $x_1 = x_2 = x'$, 则对 $\forall y_1, y_2 \in [y_0 - \delta, y_0 + \delta]$, 都有

$$f(x', \lambda y_1 + (1 - \lambda)y_2) = f(\lambda x' + (1 - \lambda)x', \lambda y_1 + (1 - \lambda)y_2) \leq \lambda f(x', y_1) + (1 - \lambda)f(x', y_2).$$

故 f 关于单变量 y 在 $[y_0 - \delta, y_0 + \delta]$ 上下凸. 同理可得 f 关于单变量 x 在 $[x_0 - \delta, x_0 + \delta]$ 上下凸. 由开区间下凸函数左右导数处处存在可知 f 关于单变量 x 在 $[x_0 - \delta, x_0 + \delta]$ 上连续, 关于单变量 y 在 $[y_0 - \delta, y_0 + \delta]$ 上连续. 因此对 $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $\delta_1 \in (0, \delta)$, 使得当 $|x - x_0| \leq \delta_1$ 时, 有

$$|f(x, y_0) - f(x_0, y_0)| < \frac{\varepsilon}{2}. \quad (5.19)$$

任取 $x \in [x_0 - \delta, x_0 + \delta]$, 固定 x , 从而此时 $f(x, y)$ 是在 $[y_0 - \delta, y_0 + \delta]$ 上关于 y 的一元连续下凸函数. 于是由开区间上的下凸函数一定内闭 Lipschitz 连续可知, $f(x, y)$ 在 $(y_0 - \delta, y_0 + \delta)$ 上内闭 Lipschitz 连续. 进而存在 $\delta_2 \in (0, \delta)$, 使得对 $\forall y \in [y_0 - \delta_2, y_0 + \delta_2]$, 有

$$|f(x, y) - f(x, y_0)| \leq \max \left\{ \frac{f(x, y_0 - \delta_2) - f(x, y_0 - 2\delta_2)}{\delta_2}, \frac{f(x, y_0 + 2\delta_2) - f(x, y_0 + \delta_2)}{\delta_2} \right\} \cdot |y - y_0|. \quad (5.20)$$

由 f 关于单变量 x 在 $[x_0 - \delta, x_0 + \delta]$ 上连续可知, $f(x, y_0 - \delta_2), f(x, y_0 - 2\delta_2), f(x, y_0 + \delta_2), f(x, y_0 + 2\delta_2)$ 在 $[x_0 - \delta, x_0 + \delta]$ 上都有界, 从而我们记

$$L = \max \left\{ \sup_{x \in [x_0 - \delta, x_0 + \delta]} \frac{f(x, y_0 - \delta_2) - f(x, y_0 - 2\delta_2)}{\delta_2}, \sup_{x \in [x_0 - \delta, x_0 + \delta]} \frac{f(x, y_0 + 2\delta_2) - f(x, y_0 + \delta_2)}{\delta_2} \right\}.$$

令 $\delta' = \min\{\delta_1, \delta_2, \frac{\varepsilon}{2L}\}$, 于是由 (5.20) 式可知, 对 $\forall (x, y) \in [x_0 - \delta', x_0 + \delta'] \times [y_0 - \delta', y_0 + \delta']$, 都有

$$|f(x, y) - f(x, y_0)| \leq L |y - y_0|. \quad (5.21)$$

利用 (5.19) (5.21) 式可得, 对上述 ε, δ' , 当 $(x, y) \in [x_0 - \delta', x_0 + \delta'] \times [y_0 - \delta', y_0 + \delta']$ 时, 我们都有

$$\begin{aligned} |f(x, y) - f(x_0, y_0)| &\leq |f(x, y) - f(x, y_0)| + |f(x, y_0) - f(x_0, y_0)| \\ &< L |y - y_0| + \frac{\varepsilon}{2} \leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \end{aligned}$$

故 f 在 (x_0, y_0) 连续. □

推论 5.1 (开集上的下凸函数必连续)

开集上的下凸函数是连续函数. ♡

5.3.2 上半连续函数

定义 5.3 (半连续函数定义)

拓扑空间 X 上的一个函数 $f : X \rightarrow [-\infty, +\infty)$ 被称为上半连续的, 如果对每个 $c \in \mathbb{R}$ 都有

$$\{x \in X : f(x) < c\}$$

是 X 的开集.

注 下半连续函数同理定义.

笔记

- (1) 显然 f 连续等价于 f 上半连续且下半连续.
- (2) 上半连续等价于对 $\forall x_0 \in X$, 都有 $\overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f(x) \leq f(x_0)$.

命题 5.22 (上半连续函数基本性质)

设 X 是拓扑空间,

- (1) 若 f_α 是一族 X 上的上半连续函数, 则 $f = \inf_\alpha f_\alpha$ 也是上半连续函数.
- (2) 若 f 是 X 上的上半连续函数, 则对每一个紧集 $K \subset X$ 有 $a \in K$ 使得 $f(x) \leq f(a), \forall x \in K$.
- (3) 设 $I \subset [-\infty, +\infty)$ 是开区间, 如果 $f : X \rightarrow I$ 和 $g : I \rightarrow [-\infty, +\infty)$ 是上半连续函数且 g 递增, 则 $g \circ f$ 是上半连续函数.

注 下半连续函数同理也有相应的性质.

笔记 (2) 是说紧集上的上半连续函数一定有上界且取得最大值. 一个经典的技巧是, 很多时候如果一个命题对所有紧集成立, 则等价于这个命题局部上成立, 即对每个点, 都存在一个邻域使得在这个邻域上成立. 现在我们注意到对每个点 x , 如果其所有邻域上, 上半连续函数 f 无上界, 那么取 $x_n \rightarrow x$ 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = +\infty$, 则 f 在紧集 $\{x_n\} \cup \{x\}$ 上无上界, 这就是一个矛盾!

证明

1. 对任何 $x_0 \in X, \beta$, 由 f_α 下半连续和下确界的定义, 我们有

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} \inf_\alpha f_\alpha(x) \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f_\beta(x) \leq f_\beta(x_0).$$

两边对 β 取下确界即得

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} \inf_\alpha f_\alpha(x) \leq \inf_\beta f_\beta(x_0).$$

故 $f = \inf_\alpha f_\alpha$ 也是上半连续函数.

2. 注意到开覆盖 $K = \bigcup_c \{x \in K : f(x) < c\}$, 由 K 是紧集可知, 必有有限子覆盖

$$K = \bigcup_{i=1}^n \{x \in K : f(x) < c_i\}.$$

不妨设 c_1 是 $c_i, i = 1, 2, \dots, n$ 的最大值, 则 $f(x) < c_1, \forall x \in K$. 即上半连续函数 f 在 K 上有上界. 取 $c = \sup_K f$, 如果 f 达不到最大值, 注意到

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{c - f(x)} \leq \frac{1}{c - \overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f(x)} \leq \frac{1}{c - f(x_0)}.$$

故 $\frac{1}{c - f(x)}$ 在 K 上上半连续. 因此同理可得 $\frac{1}{c - f(x)}$ 在 K 上也有上界. 于是存在 $M > 0$, 使得

$$\frac{1}{c - f(x)} \leq M \Rightarrow f(x) \leq c - \frac{1}{M} < c.$$

这与 $c = \sup_K f$ 矛盾! 从而 f 能取到最大值, 于是一定存在 $a \in K$, 使得 $c = f(a)$, 故 $f(x) < c = f(a), \forall x \in K$.

3. 注意到 $\{x \in X : g(x) < c\} = [-\infty, \alpha_c)$, 因此

$$\{x \in X : g \circ f(x) < c\} = \{x \in X : f(x) < \alpha_c\},$$

这就证明了 $g \circ f$ 是上半连续函数.

□

定理 5.14 (半连续函数逼近定理)

设 X 是一个度量空间, f 是 X 上的上半连续函数, 则存在递减函数列 $f_n \subset C(X)$ 使得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x), \forall x \in X$$

♡

证明 如果 $f \equiv -\infty$, 取 $f_n = -n, n = 1, 2, \dots$. 现在假定 $f \not\equiv -\infty$, 然后考虑 $g = e^{-f} : X \rightarrow (0, +\infty]$ 并定义

$$g_n(x) = \inf_{z \in X} \{g(z) + nd(x, z)\}, n = 1, 2, \dots$$

显然

$$g_n(x) \leq g_{n+1}(x) \leq g(x), \forall x \in X, n = 1, 2, \dots$$

因为 $g \not\equiv +\infty$, 我们知道 $g_n, n \in \mathbb{N}$ 都是有限函数. 若对某个 $n \in \mathbb{N}$ 和 $x \in X$, 有 $g_n(x) = 0$. 则存在 $z_m \in X, m \in \mathbb{N}$ 使得

$$\lim_{m \rightarrow \infty} [g(z_m) + nd(z_m, x)] = 0,$$

即

$$\lim_{m \rightarrow \infty} d(z_m, x) = 0, \lim_{m \rightarrow \infty} f(z_m) = +\infty.$$

又由上半连续函数基本性质 (2) 和笔记知 f 局部有上界, 这就是矛盾! 因此我们证明了

$$g_n(x) > 0, \forall x \in X, n \in \mathbb{N}.$$

为了说明 $f_n = -\ln g_n, n \in \mathbb{N}$ 是我们需要的函数, 我们只需证明

$$g_n \in C(X), \lim_{n \rightarrow \infty} g_n = g.$$

事实上, 对任何 $x, y, z \in X$, 我们有

$$g_n(x) \leq g(z) + nd(z, x) \leq g(z) + nd(y, z) + nd(x, y).$$

对 z 取下确界得

$$g_n(x) \leq g_n(y) + nd(x, y),$$

对称得

$$g_n(y) \leq g_n(x) + nd(x, y),$$

即

$$|g_n(y) - g_n(x)| \leq nd(x, y).$$

故 $g_n \in C(X), \forall n \in \mathbb{N}$.

给定 $x \in X$ 和 $\varepsilon > 0$, 因为 g 下半连续, 所以存在 x 的半径为 $\delta > 0$ 的开球邻域 U , 使得

$$g(z) > g(x) - \varepsilon, \forall z \in U.$$

于是由 g_n 定义知

$$g_n(x) \geq \min\{g(x) - \varepsilon, n\delta\}.$$

当 n 充分大, 我们知道 $g(x) \geq g_n(x) \geq g(x) - \varepsilon$, 这就证明了 $\lim_{n \rightarrow \infty} g_n = g$. 我们完成了证明.

□

定理 5.15 (下凸函数的局部定义)

设开集 $V \subset \mathbb{R}^n$, f 在 V 上半连续, 如果对任何 $x \in V, y \in \mathbb{R}^n, \delta > 0$, 都存在 $h \in (0, \delta)$, 使得

$$f(x) \leq \frac{f(x+hy) + f(x-hy)}{2}. \quad (5.22)$$

证明 f 是 V 上的下凸函数.



笔记 本定理表明下凸函数是个局部的概念, 只要局部是下凸函数, 整体也是下凸函数. 从证明可以看到, 若对 $y \neq 0$, 不等式(5.22)改为严格不等号, 则 f 也是严格下凸的.

证明 对 $x \in V, y \in \mathbb{R}^n$, 满足 $x+wy \in V, \forall w \in [-1, 1]$, 考虑上半连续函数

$$g(w) = f(x+wy) - \frac{f(x+y) - f(x-y)}{2}w - \frac{f(x+y) + f(x-y)}{2},$$

现在有

$$g(1) = g(-1) = 0.$$

如果存在 $s \in (-1, 1)$, 使得 $g(s) > 0$, 那么记

$$M \triangleq \sup_{[-1, 1]} g > 0, A \triangleq \{x \in [-1, 1] : g(x) = M\}.$$

显然 A 是 $(-1, 1)$ 中的紧集, 设 A 的最大值点 w_0 , 则 $1 - w_0 > 0$, 现在运用条件不等式(5.22), 我们知道存在充分小的 $h > 0$, 使得

$$f(x + w_0 y) \leq \frac{f(x + w_0 y + hy) + f(x + w_0 y - hy)}{2}.$$

于是对这个 h , 我们有

$$\begin{aligned} g(w_0) &= f(x + w_0 y) - \frac{f(x+y) - f(x-y)}{2}w_0 - \frac{f(x+y) + f(x-y)}{2} \\ &\leq \frac{f(x + w_0 y + hy) + f(x + w_0 y - hy)}{2} - \frac{f(x+y) - f(x-y)}{2}w_0 - \frac{f(x+y) + f(x-y)}{2} \\ &= \frac{g(w_0 + h) + g(w_0 - h)}{2} < M, \end{aligned}$$

这是一个矛盾! 因此

$$g(w) \leq 0, \forall w \in [-1, 1],$$

因此

$$g(0) \leq 0 \Rightarrow f(x) \leq \frac{f(x+y) + f(x-y)}{2},$$

故 f 是 Jensen 下凸函数, 因为 f 上半连续, 所以 f 局部有上界, 所以由引理 5.1 知 f 在 V 上连续, 因此我们证明了 f 是下凸函数.

□

例题 5.7 设有限函数

$$S(x) = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^m u_n(x), u_n \in C[a, b], n \in \mathbb{N}.$$

若 $u_n, n \in \mathbb{N}$ 非负, 证明 $S(x)$ 在 $[a, b]$ 达到最小值.

证明 对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 由 $u_n \in C[a, b]$ 且非负可得

$$\begin{aligned} \liminf_{x \rightarrow x_0} S(x) &= \liminf_{x \rightarrow x_0} \lim_{m \rightarrow +\infty} \sum_{n=1}^m u_n(x) \geq \liminf_{x \rightarrow x_0} \sum_{n=1}^m u_n(x) \\ &\geq \sum_{n=1}^m \liminf_{x \rightarrow x_0} u_n(x) = \sum_{n=1}^m u_n(x_0). \end{aligned}$$

令 $m \rightarrow +\infty$, 则 $\liminf_{x \rightarrow x_0} S(x) \geq S(x_0)$, 故 $S(x)$ 在 $[a, b]$ 上下半连续. 由半连续函数的基本性质(2)可知, $S(x)$ 在 $[a, b]$ 上达到最小值.

□

例题 5.8 设 $\{g_n\}_{n=1}^{\infty}, \{h_n\}_{n=1}^{\infty} \subset C[a, b]$, 若

$$h_n \geq h_{n+1}, g_{n+1} \geq g_n, n = 1, 2, \dots, \lim_{n \rightarrow \infty} h_n = \lim_{n \rightarrow \infty} g_n \text{ 存在.}$$

证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} h_n$ 是连续函数.

证明 记 $h(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} h_n(x) = g(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} g_n(x)$, 则一方面, 对 $\forall N \in \mathbb{N}$, 由条件可知

$$h_n(x) \leq h_{n-1}(x) \leq \dots \leq h_N(x), \forall n > N.$$

令 $n \rightarrow \infty$, 得到

$$h(x) \leq h_N(x), \forall n > N.$$

$\forall x_0 \in [a, b]$, 令 $x \rightarrow x_0$, 并取上极限, 结合 $h_N \in C[a, b]$ 可得

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} h(x) \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} h_N(x) = h_N(x_0), \forall n > N.$$

令 $N \rightarrow \infty$, 得到 $\overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} h(x) \leq h(x_0)$. 故 h 在 $[a, b]$ 上上半连续.

另一方面, 对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 由条件可知

$$g_n(x) \geq g_{n-1}(x) \geq \dots \geq g_m(x), \forall n > m.$$

令 $n \rightarrow \infty$, 得到

$$g(x) \geq g_m(x), \forall n > m.$$

$\forall x_0 \in [a, b]$, 令 $x \rightarrow x_0$, 并取上极限, 结合 $g_m \in C[a, b]$ 可得

$$\underline{\lim}_{x \rightarrow x_0} g(x) \geq \underline{\lim}_{x \rightarrow x_0} g_m(x) = g_m(x_0), \forall n > m.$$

令 $m \rightarrow \infty$, 得到 $\underline{\lim}_{x \rightarrow x_0} g(x) \geq g(x_0)$. 故 g 在 $[a, b]$ 上下半连续. 因此 $h = g$ 在 $[a, b]$ 上既上半连续又下半连续, 从而 $h = g$ 在 $[a, b]$ 上连续.

□

5.4 函数的一致连续性

定理 5.16

f 在区间 I 一致连续的充要条件是对任何 $\{x'_n\}_{n=1}^{\infty}, \{x''_n\}_{n=1}^{\infty} \subset I$ 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x''_n - x'_n) = 0$ 都有 $\lim_{n \rightarrow \infty} (f(x''_n) - f(x'_n)) = 0$.

♡

定理 5.17 (Cantor 定理)

$f \in C(a, b)$ 一致连续的充要条件是 $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x), \lim_{x \rightarrow b^-} f(x)$ 存在.

♡

注 这个定理对 $f \in C(a, b]$ 和 $f \in C[a, b)$ 也成立.

推论 5.2

若 $f \in C[a, b]$, 则 f 在 $[a, b]$ 上一致连续.

♡

命题 5.23

设 $f \in C[0, +\infty)$ 且 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在. 证明: f 在 $[0, +\infty)$ 一致连续.

♦

注 这个命题反过来并不成立, 反例: $f(x) = \sqrt{x}$. 因此这个条件只是函数一致连续的充分不必要条件.

证明 $\forall \varepsilon > 0$, 由 Cauchy 收敛准则可知, 存在 $A > 0$, 对 $\forall x_1, x_2 \geq A$, 有

$$|f(x_2) - f(x_1)| < \varepsilon. \quad (5.23)$$

由 Cantor 定理可知, f 在 $[0, A+1]$ 上一致连续. 故存在 $\delta \in (0, 1)$, 使得 $\forall x_1, x_2 \in [0, A+1]$ 且 $|x_2 - x_1| \leq \delta$, 有

$$|f(x_2) - f(x_1)| < \varepsilon. \quad (5.24)$$

现在对 $\forall |x_1 - x_2| \leq \delta < 1$, 必然有 $x_1, x_2 \in [0, A+1]$ 或 $x_1, x_2 \in [A, +\infty)$, 从而由(5.23)(5.24)式可知, 此时一定有

$$|f(x_2) - f(x_1)| < \varepsilon.$$

故 f 在 $[0, +\infty)$ 上一致连续.

□

命题 5.24

设 f 在 $[0, +\infty)$ 一致连续且 $g \in C[0, +\infty)$ 满足

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) - g(x)] = 0.$$

证明: g 在 $[0, +\infty)$ 一致连续.

◆

证明 $\forall \varepsilon > 0$, 由 f 一致连续可知, 存在 $\delta \in (0, 1)$, 使得对 $\forall x, y \in [0, +\infty)$ 且 $|x - y| \leq \delta$, 有

$$|f(x) - f(y)| < \frac{\varepsilon}{3}. \quad (5.25)$$

由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) - g(x)] = 0$ 可知, 存在 $A > 0$, 使得对 $\forall x \geq A$, 有

$$|f(x) - g(x)| < \frac{\varepsilon}{3}. \quad (5.26)$$

由 Cantor 定理可知, g 在 $[0, A+1]$ 上一致连续. 故存在 $\eta \in (0, 1)$, 使得对 $\forall x, y \in [0, A+1]$ 且 $|x - y| \leq \eta$, 有

$$|g(x) - g(y)| < \frac{\varepsilon}{3}. \quad (5.27)$$

故对 $\forall x, y \geq 0$ 且 $|x - y| \leq \eta$, 要么都落在 $[0, A+1]$, 要么都落在 $[A, +\infty)$.

- (i) 若 $x, y \in [0, A+1]$, 则由(5.27)式可得 $|g(x) - g(y)| < \frac{\varepsilon}{3}$;
- (ii) 若 $x, y \in [A, +\infty)$, 则由(5.25)(5.26)式可得

$$|g(x) - g(y)| \leq |g(x) - f(x)| + |f(x) - f(y)| + |f(y) - g(y)| < \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon.$$

故 g 在 $[0, +\infty)$ 上一致连续.

□

命题 5.25 (连续周期函数必一致连续)

设 f 是周期 $T > 0$ 的 \mathbb{R} 上的连续函数, 则 f 在 \mathbb{R} 上一致连续.

◆

证明 由 Cantor 定理, f 在 $[0, 2T]$ 一致连续, 所以对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $\delta \in (0, T)$ 使得对 $|x_1 - x_2| < \delta, x_1, x_2 \in [0, 2T]$ 都有

$$|f(x_1) - f(x_2)| \leq \varepsilon.$$

现在对 $x_1, x_2 \in \mathbb{R}$ 使得 $0 < x_2 - x_1 < \delta$. 注意到

$$x_1 - \left\lfloor \frac{x_1}{T} \right\rfloor T \in [0, T), x_2 - \left\lfloor \frac{x_1}{T} \right\rfloor T \in [0, 2T), |x_1 - x_2| < \delta,$$

我们有

$$|f(x_1) - f(x_2)| = \left| f\left(x_1 - \left\lfloor \frac{x_1}{T} \right\rfloor T\right) - f\left(x_2 - \left\lfloor \frac{x_1}{T} \right\rfloor T\right) \right| \leq \varepsilon,$$

这就证明了 f 在 \mathbb{R} 上一致连续.

□

命题 5.26 (一致连续与 Lipschitz 连续的关系)

设 f 定义在区间 I 的函数. 证明 f 在区间 I 一致连续的充要条件是对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $M > 0$, 使得对任何 $x_1, x_2 \in I$, 都有

$$|f(x_2) - f(x_1)| \leq M|x_1 - x_2| + \varepsilon.$$



注 这个命题相当重要! 但是考试中不能直接使用, 需要证明.

证明 充分性: 由条件可知, $\forall \varepsilon > 0, \exists M > 0$, 取 $\delta = \frac{\varepsilon}{M}$, 则当 $|x_2 - x_1| \leq \delta$ 且 $x_1, x_2 \in I$ 时, 有

$$|f(x_1) - f(x_2)| \leq M|x_1 - x_2| + \varepsilon \leq M \cdot \frac{\varepsilon}{M} + \varepsilon = 2\varepsilon.$$

故 f 在 I 上一致连续.

必要性: 由 f 在 I 上一致连续可知, $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $\delta > 0$, 使得对 $\forall x_1, x_2 \in I$ 且 $|x_1 - x_2| \leq \delta$, 有

$$|f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon. \quad (5.28)$$

因此任取 $x, y \in I$, ①当 $|x - y| \leq \delta$ 时, 由(5.28)式可知 $|f(x) - f(y)| < \varepsilon \leq M|x - y| + \varepsilon$. 由 x, y 的任意性可知结论成立.

②当 $|x - y| > \delta$ 时, (i) 当 $|f(x) - f(y)| \leq \varepsilon$ 时, 此时结论显然成立;

(ii) 当 $|f(x) - f(y)| > \varepsilon$ 时, 不妨设 $y > x, f(y) > f(x)$ (其它情况类似), 令 $f(y) - f(x) = kt$, 其中 $k \in \mathbb{N}, t \in (\varepsilon, 2\varepsilon]$. 由介值定理可知, 存在 $x = x_0 < x_1 < \dots < x_k = y$, 使得

$$f(x) \leq f(x_j) = f(x) + jt \leq f(x) + kt = f(y), \quad j = 0, 1, 2, \dots, k.$$

于是

$$f(x_j) - f(x_{j-1}) = t > \varepsilon, \quad j = 1, 2, \dots, k.$$

此时由(5.28)式可知 $x_j - x_{j-1} > \delta, j = 1, 2, \dots, k$. 从而我们有

$$y - x = \sum_{j=1}^k (x_j - x_{j-1}) > k\delta \Rightarrow k < \frac{y - x}{\delta}. \quad (5.29)$$

取 $M = \frac{2\varepsilon}{\delta} > 0$, 于是结合(5.29)式及 $t \in (\varepsilon, 2\varepsilon]$ 就有

$$|f(y) - f(x)| = kt \leq \frac{t}{\delta}|y - x| \leq \frac{2\varepsilon}{\delta}|y - x| = M|y - x|.$$

再由 x, y 的任意性可知结论成立. □

注 这里 k, t 的存在性可以如此得到: 考虑 $(\varepsilon, +\infty) = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} (k\varepsilon, 2k\varepsilon]$ 即可, 又因为 $(k+1)\varepsilon \leq 2k\varepsilon$, 所以相邻的 $(k\varepsilon, 2k\varepsilon]$

一定相交. 于是一定存在 $k \in \mathbb{N}$, 使得 $f(y) - f(x) \in (k\varepsilon, 2k\varepsilon]$, 从而 $\frac{f(y) - f(x)}{k} \in (\varepsilon, 2\varepsilon]$. 故取 $t = \frac{f(y) - f(x)}{k} \in (\varepsilon, 2\varepsilon]$. 此时就有 $f(y) - f(x) = kt$.

推论 5.3 (一致连续函数被线性函数控制)

若 f 在 \mathbb{R} 一致连续, 证明存在 $M > 0$ 使得

$$|f(x)| \leq f(0) + 1 + M|x|, \quad \forall x \in \mathbb{R}.$$



笔记 读者应该积累大概的感觉: 一致连续函数的增长速度不超过线性函数, 这能帮助我们快速排除一些非一致连续函数.

证明 取命题 5.26 中的 $\varepsilon = 1, x_1 = x \in \mathbb{R}, x_2 = 0$, 则一定存在 $M > 0$, 使得 $|f(x)| \leq f(0) + 1 + M|x|, \forall x \in \mathbb{R}$.

具体地, 有 $\delta_0 > 0$ 使得

$$|f(x) - f(y)| \leq 1, \quad \forall 0 \leq x \leq y < x + \delta_0.$$

因此, 对于任何 $x \geq 0$,

$$\begin{aligned}|f(x)| &\leq \left| f(0) + \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{x}{\delta_0} \rfloor} [f(k\delta_0) - f((k-1)\delta_0)] + f(x) - f\left(\lfloor \frac{x}{\delta_0} \rfloor \delta_0\right) \right| \\ &\leq |f(0)| + \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{x}{\delta_0} \rfloor} |f(k\delta_0) - f((k-1)\delta_0)| + \left| f(x) - f\left(\lfloor \frac{x}{\delta_0} \rfloor \delta_0\right) \right| \\ &\leq |f(0)| + \lfloor \frac{x}{\delta_0} \rfloor + 1 \leq |f(0)| + 1 + \frac{x}{\delta_0}.\end{aligned}$$

□

推论 5.4

若 f 在 I 上一致连续, 则存在 $M, c > 0$ 使得

$$|f(x)| \leq c + M|x|, \forall x \in I.$$

♡

推论 5.5 (一致连续函数的阶的提升)

若 f 在 $[1, +\infty)$ 一致连续, 证明存在 $M > 0$ 使得

$$\left| \frac{f(x)}{x} \right| \leq M, \forall x \geq 1.$$

♡

证明 取命题 5.26 中的 $\varepsilon = 1, x_1 = x \geq 1, x_2 = 1$, 则一定存在 $C > 0$, 使得

$$|f(x) - f(1)| \leq C|x - 1| + 1, \forall x \geq 1.$$

于是

$$\left| \frac{f(x)}{x} \right| \leq \left| \frac{f(x) - f(1)}{x} \right| + \frac{|f(1)|}{x} \leq \frac{C|x - 1| + 1}{x} + |f(1)|, \forall x \geq 1.$$

上式两边同时令 $x \rightarrow +\infty$, 得到

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \left| \frac{f(x)}{x} \right| \leq C.$$

由上极限的定义可知, 存在 $X > 1$, 使得 $\sup_{x \geq X} \left| \frac{f(x)}{x} \right| \leq C$. 从而我们有

$$\left| \frac{f(x)}{x} \right| \leq C, \forall x > X. \quad (5.30)$$

又因为 f 在 $[1, +\infty)$ 上一致连续, 所以由 Cantor 定理可知 f 在 $[1, X]$ 上连续, 从而 f 在 $[1, X]$ 上有界, 即存在 $C' > 0$, 使得

$$\left| \frac{f(x)}{x} \right| \leq C', \forall x \in [1, X]. \quad (5.31)$$

于是取 $M = \max\{C, C'\}$, 则由(5.30)(5.31)式可知

$$\left| \frac{f(x)}{x} \right| \leq M, \forall x \geq 1.$$

□

命题 5.27

证明区间 I 上的函数 f 一致连续的充要条件是对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $\ell > 0$, 使得当 $x_1 \neq x_2 \in I$, 就有:

$$\left| \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \right| > \ell \Rightarrow |f(x_2) - f(x_1)| < \varepsilon.$$

◆

证明 必要性: 由命题 5.26 可知, $\forall \varepsilon > 0, \exists M > 0$, 使得

$$|f(x) - f(y)| \leq M|x - y| + \varepsilon, \forall x, y \in I.$$

取 $\ell = \frac{\varepsilon}{\delta} + M$, 任取 $x_1 \neq x_2 \in I$, 当 $\left| \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \right| > \ell$ 时, 我们有

$$\ell < \left| \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \right| \leq \frac{M|x_2 - x_1|}{|x_2 - x_1|} + \frac{\varepsilon}{|x_2 - x_1|} = M + \frac{\varepsilon}{|x_2 - x_1|}.$$

从而

$$|x_2 - x_1| < \frac{\varepsilon}{\ell - M} = \delta. \quad (5.32)$$

又由 f 在 I 上一致连续可知

$$|f(x') - f(x'')| < \varepsilon, \forall x', x'' \in I \text{ 且 } |x' - x''| < \delta. \quad (5.33)$$

因此结合(5.32)(5.33)式可得 $|f(x_2) - f(x_1)| < \varepsilon$. 故必要性得证.

充分性: 已知对 $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $\ell > 0$, 使得 $\forall x_1 \neq x_2 \in I$, 有

$$\left| \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \right| > \ell \Rightarrow |f(x_2) - f(x_1)| < \varepsilon. \quad (5.34)$$

取 $\delta \in \left(0, \frac{\varepsilon}{\ell}\right)$, 若 $|f(x_2) - f(x_1)| \geq \varepsilon$ 但 $|x_2 - x_1| \leq \delta$, 则我们有

$$\left| \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \right| \geq \frac{\varepsilon}{\delta} > \ell.$$

而由(5.34)式可得, 此时 $|f(x_2) - f(x_1)| < \varepsilon$ 矛盾! 故 f 在 I 上一致连续.

□

命题 5.28 (一致连续函数的拼接)

设 $f \in C[0, +\infty)$, 若存在 $\delta > 0$ 使得 f 在 $[\delta, +\infty)$ 一致连续, 则 f 在 $[0, +\infty)$ 一致连续.

◆

笔记 证明的想法比结论本身重要, 在和本命题叙述形式不同的时候需要快速准确判断出来 f 在 $[0, +\infty)$ 一致连续.

证明 $\forall \varepsilon > 0$, 由 Cantor 定理可知, f 在 $[0, \delta + 1]$ 上一致连续. 故存在 $\eta \in (0, 1)$, 使得 $\forall x, y \in [0, \delta + 1]$ 且 $|x - y| \leq \eta$, 都有

$$|f(x) - f(y)| < \varepsilon. \quad (5.35)$$

由 f 在 $[\delta, +\infty)$ 上一致连续可知, 对 $\forall x, y \in [\delta, +\infty)$ 且 $|x - y| \leq \eta$, 都有

$$|f(x) - f(y)| < \varepsilon. \quad (5.36)$$

现在对 $\forall x, y \in [0, +\infty)$, 都有 $|x - y| \leq \eta$.

(i) 若 $x, y \in [0, \delta + 1]$ 或 $[\delta, +\infty)$, 则由(5.35)(5.36)式可直接得到 $|f(x) - f(y)| < \varepsilon$;

(ii) 若 $x \in [0, \delta], y \in [\delta + 1, +\infty)$, 则 $|x - y| \geq 1 > \eta$, 这是不可能的.

故原命题得证.

□

例题 5.9 设 f 在 $[1, +\infty)$ 一致连续. 证明: $\frac{f(x)}{x}$ 也在 $[1, +\infty)$ 一致连续.

证明 由 f 在 $[1, +\infty)$ 上一致连续可知, $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $\delta > 0$, 使得对 $\forall x, y \geq 1$ 且 $|x - y| \leq \delta$, 有

$$|f(x) - f(y)| < \frac{\varepsilon}{2}. \quad (5.37)$$

由推论 5.5 可知, $\left| \frac{f(x)}{x} \right|$ 有界. 故可设 $M \triangleq \sup_{x \geq 1} \left| \frac{f(x)}{x} \right| < +\infty$. 取 $\delta' = \min \left\{ \delta, \frac{\varepsilon}{2M} \right\}$, 则对 $\forall x, y \geq 1$ 且 $|x - y| \leq \delta'$,

由(5.37)式可得

$$\begin{aligned} \left| \frac{f(x)}{x} - \frac{f(y)}{y} \right| &= \frac{|yf(x) - xf(y)|}{xy} \leq \frac{|yf(x) - yf(y)| + |y - x||f(y)|}{xy} \\ &= \frac{|f(x) - f(y)|}{x} + \frac{|y - x|}{xy} |f(y)| \leq |f(x) - f(y)| + M |y - x| \\ &< \frac{\varepsilon}{2} + M \cdot \frac{\varepsilon}{2M} = \varepsilon. \end{aligned}$$

故 $\frac{f(x)}{x}$ 也在 $[1, +\infty)$ 一致连续.

□

命题 5.29 (函数爆炸一定不一致连续)

设 f 在 $[a, +\infty)$ 可微且 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = +\infty$, 证明: f 在 $[a, +\infty)$ 不一致连续.

◆

证明 证法一: 假设 f 在 $[a, +\infty)$ 上一致连续, 则由推论 5.4 可知, 存在 $c, d > 0$, 使得

$$|f(x)| \leq c|x| + d, \forall x \in [a, +\infty). \quad (5.38)$$

从而

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \left| \frac{f(x)}{x} \right| \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \left| \frac{f(x)}{x} \right| < +\infty. \quad (5.39)$$

由上下极限 L'Hospital 法则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} \geq \lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = +\infty.$$

这与(5.39)式矛盾. 故 f 在 $[a, +\infty)$ 不一致连续.

证法二: 假设 f 在 $[a, +\infty)$ 上一致连续, 则由推论 5.4 可知, 存在 $c, d > 0$, 使得

$$|f(x)| \leq c|x| + d, \forall x \in [a, +\infty). \quad (5.40)$$

由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = +\infty$ 可知, 存在 $X > 0$, 使得对 $\forall x \geq X$, 有

$$f'(x) \geq c + 1 \Leftrightarrow f'(x) - c + 1 \geq 0.$$

从而 $f(x) - (c + 1)x$ 在 $[X, +\infty)$ 上单调递增, 于是就有

$$f(x) - (c + 1)x \geq f(X) - (c + 1)X \triangleq D, \forall x \geq X.$$

故 $f(x) \geq (c + 1)x + D, \forall x \geq X$. 再结合(5.40)式可得

$$(c + 1)x + D \leq f(x) \leq cx + d, \forall x \geq X > 0.$$

即 $x \leq d - D, \forall x \geq X > 0$. 令 $x \rightarrow +\infty$, 则

$$+\infty = \lim_{x \rightarrow +\infty} x \leq d - D.$$

矛盾. 故 f 在 $[a, +\infty)$ 不一致连续.

□

例题 5.10 判断下述函数的一致连续性:

- (1) $f(x) = \ln x, x \in (0, 1]$;
- (2) $f(x) = e^x \cos \frac{1}{x}, x \in (0, 1]$;
- (3) $f(x) = \frac{\sin x}{x}, x \in (0, +\infty)$;
- (4) $f(x) = \sin^2 x, x \in \mathbb{R}$;
- (5) $f(x) = e^x, x \in \mathbb{R}$;
- (6) $f(x) = \sin x^2, x \in [0, +\infty)$;
- (7) $f(x) = \sin(x \sin x), x \in [0, +\infty)$;
- (8) $f(x) = x \cos x, x \in [0, +\infty)$;
- (9) 设 $a > 0$, $f(x) = \frac{x+2}{x+1} \sin \frac{1}{x}$, $x \in (0, a)$ 和 $x \in (a, +\infty)$;

 **笔记** 关于三角函数找数列的问题, 一般 \sin, \cos 函数就多凑一个 $2n\pi$ 或 $2n\pi + \frac{\pi}{2}$.

注 (6) 中找这两个数列 $x'_n = \sqrt{2n\pi}, x''_n = \sqrt{2n\pi} + \frac{\pi}{\sqrt{n}}$ 的方式: 待定 c_n , 令 $x'_n = \sqrt{2n\pi} + c_n, x''_n = \sqrt{2n\pi} + c_n$, 我们希望

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (x''_n - x'_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} c_n = 0,$$

并且

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [f(x_n'') - f(x_n')] = \lim_{n \rightarrow \infty} \sin(2n\pi + c_n^2 + 2c_n\sqrt{2n\pi}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sin(c_n^2 + 2c_n\sqrt{2n\pi}) \neq 0.$$

再结合 $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = 0$ 可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sin(c_n^2 + 2c_n\sqrt{2n\pi}) = \lim_{n \rightarrow \infty} (\sin c_n^2 \cos 2c_n\sqrt{2n\pi} + \cos c_n^2 \sin 2c_n\sqrt{2n\pi}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sin 2c_n\sqrt{2n\pi}.$$

故我们希望 $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = 0$ 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sin 2c_n\sqrt{2n\pi} \neq 0$. 从而令 $c_n = \frac{1}{\sqrt{n}}$ 即可.

(7)(8) 找数列的方式与 (6) 类似.

解

(1) 不一致连续. 由 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \ln x = +\infty$ 及 Cantor 定理可得.

(2) 不一致连续. 由 $\lim_{x \rightarrow 0^+} e^x \cos \frac{1}{x}$ 不存在及 Cantor 定理可得.

(3) 一致连续. 由 $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x)$ 存在 (连续性), $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\sin x}{x} = 1$ 及 Cantor 定理可知, f 在 $(0, 1]$ 上一致连续. 又因为 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\sin x}{x} = 0$, 所以由命题 5.23 可知, f 在 $[1, +\infty)$ 上一致连续. 再根据一致连续函数的拼接可知, f 在 $(0, +\infty)$ 上一致连续.

(4) 一致连续. 由 $(\sin^2 x)' = 2 \sin x \cos x \leq 2$ 及由 Lagrange 中值定理, 易知 $f(x)$ 是 Lipschitz 连续的, 从而一致连续.

(5) 不一致连续. 由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} e^x = +\infty$ 及命题 5.29 可得.

(6) 不一致连续. 令 $x_n' = \sqrt{2n\pi}$, $x_n'' = \sqrt{2n\pi} + \frac{1}{\sqrt{n}}$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n' - x_n'') = 0$. 但是

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} (f(x_n'') - f(x_n')) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sin \left(2n\pi + \frac{1}{n} + 2\sqrt{2\pi} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sin \left(\frac{1}{n} + 2\sqrt{2\pi} \right) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\sin 2\sqrt{2\pi} \cos \frac{1}{n} + \cos 2\sqrt{2\pi} \sin \frac{1}{n} \right] = \sin 2\sqrt{2\pi} \neq 0. \end{aligned}$$

故根据定理 5.16 可知 f 不一致连续.

(7) 不一致连续. 令 $x_n' = 2n\pi$, $x_n'' = 2n\pi + \frac{\pi}{2n}$, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n' - x_n'') = 0.$$

但是

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} (f(x_n'') - f(x_n')) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sin \left[\left(2n\pi + \frac{\pi}{2n} \right) \sin \left(2n\pi + \frac{\pi}{2n} \right) \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \sin \left[\left(2n\pi + \frac{\pi}{2n} \right) \sin \frac{\pi}{2n} \right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\left(2n\pi + \frac{\pi}{2n} \right) \sin \frac{\pi}{2n} \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \sin \left[\left(2n\pi + \frac{\pi}{2n} \right) \left(\frac{\pi}{2n} + o\left(\frac{1}{n}\right) \right) \right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sin \left[\pi^2 + o\left(\frac{1}{n^2}\right) \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\sin \pi^2 x \cos o\left(\frac{1}{n^2}\right) + \cos \pi^2 \sin o\left(\frac{1}{n^2}\right) \right] \\ &= \sin \pi^2 \neq 0. \end{aligned}$$

故根据定理 5.16 可知 f 不一致连续.

(8) 不一致连续. 令 $x_n' = 2n\pi + \frac{\pi}{2}$, $x_n'' = 2n\pi + \frac{\pi}{2} + \frac{1}{n}$, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n' - x_n'') = 0.$$

但是

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (f(x_n'') - f(x_n')) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(2n\pi + \frac{\pi}{2} + \frac{1}{n} \right) \cos \left(2n\pi + \frac{\pi}{2} + \frac{1}{n} \right) = - \lim_{n \rightarrow \infty} \left(2n\pi + \frac{\pi}{2} + \frac{1}{n} \right) \sin \frac{1}{n} = -2\pi.$$

故根据定理 5.16 可知 f 不一致连续.

(9) 在 $(0, a)$ 上不一致连续, 在 $(a, +\infty)$ 上一致连续. 由 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x+2}{x+1} \sin \frac{1}{x}$ 不存在, $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x+2}{x+1} \sin \frac{1}{x} = 0$ 及 Cantor 定理可得.

□

命题 5.30 (一个重要不等式)

对 $\alpha \in (0, 1)$, 证明

$$|x^\alpha - y^\alpha| \leq |x - y|^\alpha, \forall x, y \in [0, +\infty).$$



证明 不妨设 $y \geq x \geq 0$, 则只须证 $y^\alpha - x^\alpha \leq (y - x)^\alpha$. 则只须证 $\left(\frac{y}{x}\right)^\alpha - 1 \leq \left(\frac{y}{x} - 1\right)^\alpha$. 故只须证 $t^\alpha - 1 \leq (t - 1)^\alpha, \forall t \geq 1$.

令 $g(t) = t^\alpha - 1 - (t - 1)^\alpha$, 则 $g'(t) = \alpha t^{\alpha-1} - \alpha(t-1)^{\alpha-1} \leq 0$. 从而 $g(t) \leq g(1) = 0, \forall t \geq 1$. 故 $t^\alpha - 1 \leq (t - 1)^\alpha, \forall t \geq 1$. \square

例题 5.11 证明: $f(x) = x^\alpha \ln x$ 在 $(0, +\infty)$ 一致连续的充要条件是 $\alpha \in (0, 1)$.

证明 当 $\alpha \geq 1$ 时, f 不被线性函数控制, 故由一致连续函数被线性函数控制可知 f 不一致连续.

当 $\alpha \leq 0$ 时, $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x)$ 不存在, 由 Cantor 定理可知, f 在 $(0, 2)$ 上不一致连续. 故此时 f 在 $(0, +\infty)$ 上不一致连续.

当 $\alpha \in (0, 1)$ 时, 有 $f'(x) = x^{\alpha-1}(\alpha \ln x - 1)$. 因此 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 0$, 于是 $f'(x)$ 在 $[2, +\infty)$ 上有界, 从而由 Lagrange 中值定理易得 f 在 $[1, +\infty)$ 上 Lipschitz 连续, 故 f 在 $[2, +\infty)$ 上一致连续. 此时, 注意到 $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = 0$, 故由 Cantor 定理可知, f 在 $(0, 2]$ 上一致连续. 于是由一致连续的拼接可得, f 在 $(0, +\infty)$ 上一致连续. \square

例题 5.12 设 $f(x) = \begin{cases} x^\alpha \cos \frac{1}{x}, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$. 求 α 的范围使得 f 在 $[0, +\infty)$ 一致连续.

笔记 找这两个数列 $x'_n = kn\pi, x''_n = kn\pi + n^{1-\alpha}$ 的方法: 当 $\alpha > 1$ 时, 待定 c_n , 令 $x'_n = 2n\pi, x''_n = 2n\pi + c_n$. 我们希望 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x''_n - x'_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} c_n = 0$, 并且 $\lim_{n \rightarrow \infty} [f(x''_n) - f(x'_n)] \neq 0$. 注意到

$$\begin{aligned} f(x''_n) - f(x'_n) &= (2n\pi + c_n)^\alpha \cos \frac{1}{2n\pi + c_n} - (2n\pi)^\alpha \cos \frac{1}{2n\pi} \\ &= (2n\pi)^\alpha \left(1 + \frac{c_n}{2n\pi}\right)^\alpha \cos \frac{1}{2n\pi + c_n} - (2n\pi)^\alpha \cos \frac{1}{2n\pi} \\ &= (2n\pi)^\alpha \left(1 + \frac{c_n}{2n\pi}\right)^\alpha \left[1 + O\left(\frac{1}{(2n\pi + c_n)^2}\right)\right] - (2n\pi)^\alpha \left[1 + O\left(\frac{1}{n^2}\right)\right] \\ &= (2n\pi)^\alpha \left(1 + \frac{c_n}{2n\pi}\right)^\alpha \left[1 + O\left(\frac{1}{n^2}\right)\right] - (2n\pi)^\alpha \left[1 + O\left(\frac{1}{n^2}\right)\right] \\ &= (2n\pi)^\alpha \left[\left(1 + \frac{c_n}{2n\pi}\right)^\alpha - 1\right] \left[1 + O\left(\frac{1}{n^2}\right)\right] \\ &= (2n\pi)^\alpha \left[\frac{\alpha c_n}{2n\pi} + O\left(\frac{c_n}{n^2}\right)\right] \left[1 + O\left(\frac{1}{n^2}\right)\right] \\ &= (2n\pi)^\alpha \left[\frac{\alpha c_n}{2n\pi} + O\left(\frac{c_n}{n^2}\right)\right], \quad n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

于是取 $c_n = n^{1-\alpha}$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = 0$, 并且由上式可得

$$\begin{aligned} f(x''_n) - f(x'_n) &= (2n\pi)^\alpha \left[\frac{\alpha n^{-\alpha}}{2\pi} + O(n^{-\alpha-1})\right] \\ &= \alpha(2\pi)^{\alpha-1} + O\left(\frac{1}{n}\right) \rightarrow \alpha(2\pi)^{\alpha-1} \neq 0, \quad n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

故我们可取 $x'_n = 2n\pi, x''_n = 2n\pi + n^{1-\alpha}$.

证明 当 $\alpha \leq 0$ 时, $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x)$ 不存在, 由 Cantor 定理可知, f 在 $(0, 1)$ 上不一致连续. 故此时 f 在 $(0, +\infty)$ 上不一致连续.

当 $\alpha \in (0, 1]$ 时, 由条件可知, 对 $\forall x \geq 1$, 都有

$$|f'(x)| = \left| \left(x^\alpha \cos \frac{1}{x} \right)' \right| = \left| \alpha x^{\alpha-1} \cos \frac{1}{x} - x^{\alpha-2} \sin \frac{1}{x} \right| \leq \left| \alpha x^{\alpha-1} \cos \frac{1}{x} \right| + \left| x^{\alpha-2} \sin \frac{1}{x} \right| \leq \alpha + 1.$$

因此 $f'(x)$ 在 $[1, +\infty)$ 上有界. 从而由 Lagrange 中值定理易得 f 在 $[1, +\infty)$ 上 Lipschitz 连续, 故 f 在 $[1, +\infty)$ 上一致连续. 此时, 注意到 $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = 0$, 故由 Cantor 定理可知, f 在 $(0, 1]$ 上一致连续. 于是由一致连续的拼接可得, f 在 $(0, +\infty)$ 上一致连续.

当 $\alpha > 1$ 时, 令 $x'_n = 2n\pi, x''_n = 2n\pi + n^{1-\alpha}$, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (x''_n - x'_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} n^{1-\alpha} = 0.$$

此时我们有

$$\begin{aligned} f(x''_n) - f(x'_n) &= (2n\pi + n^{1-\alpha})^\alpha \cos \frac{1}{2n\pi + n^{1-\alpha}} - (2n\pi)^\alpha \cos \frac{1}{2n\pi} \\ &= (2n\pi)^\alpha \left(1 + \frac{n^{-\alpha}}{2\pi}\right)^\alpha \cos \frac{1}{2n\pi + n^{1-\alpha}} - (2n\pi)^\alpha \cos \frac{1}{2n\pi} \\ &= (2n\pi)^\alpha \left(1 + \frac{n^{-\alpha}}{2\pi}\right)^\alpha \left[1 + O\left(\frac{1}{(2n\pi + n^{1-\alpha})^2}\right)\right] - (2n\pi)^\alpha \left[1 + O\left(\frac{1}{n^2}\right)\right] \\ &= (2n\pi)^\alpha \left(1 + \frac{n^{-\alpha}}{2\pi}\right)^\alpha \left[1 + O\left(\frac{1}{n^2}\right)\right] - (2n\pi)^\alpha \left[1 + O\left(\frac{1}{n^2}\right)\right] \\ &= (2n\pi)^\alpha \left[\left(1 + \frac{n^{-\alpha}}{2\pi}\right)^\alpha - 1\right] \left[1 + O\left(\frac{1}{n^2}\right)\right] \\ &= (2n\pi)^\alpha \left[\frac{\alpha n^{-\alpha}}{2\pi} + O(n^{-\alpha-1})\right] \left[1 + O\left(\frac{1}{n^2}\right)\right] \\ &= (2n\pi)^\alpha \left[\frac{\alpha n^{-\alpha}}{2\pi} + O(n^{-\alpha-1})\right] \\ &= \alpha (2\pi)^{\alpha-1} + O\left(\frac{1}{n}\right) \rightarrow \alpha (2\pi)^{\alpha-1} \neq 0, \quad n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

故根据定理 5.16 可知 f 在 $[0, +\infty)$ 上不一致连续.

□

例题 5.13 设 $f_n : (0, +\infty) \rightarrow \mathbb{R}, n = 1, 2, \dots$ 是一致连续函数且 $f_n \rightarrow f$, 证明: f 在 $(0, +\infty)$ 一致连续.

证明 $\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}$, 使得当 $n \geq N$ 时, 有

$$|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon, \quad \forall x \in (0, +\infty). \quad (5.41)$$

由 f_N 一致连续, 可知 $\exists \delta > 0$, 使得 $\forall x, y \in (0, +\infty)$ 且 $|x - y| \leq \delta$, 有

$$|f_N(x) - f_N(y)| < \varepsilon. \quad (5.42)$$

于是对 $\forall x, y \in (0, +\infty)$ 且 $|x - y| \leq \delta$, 结合 (5.41) 和 (5.42) 式, 我们有

$$|f(x) - f(y)| \leq |f(x) - f_N(x)| + |f_N(x) - f_N(y)| + |f_N(y) - f(y)| < 3\varepsilon.$$

故 f 在 $(0, +\infty)$ 一致连续.

□

例题 5.14 设 f 在 $[0, +\infty)$ 一致连续且对任何 $x \geq 0$ 都有 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x + n) = 0$, 证明 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$. 并说明如果去掉一致连续则结论不对.

笔记 证明的想法即把点拉回到 $[0, 1]$ 并用一致连续来解决. 反例可积累

$$f(x) = \frac{x \sin(\pi x)}{1 + x^2 \sin^2(\pi x)}.$$

核心想法: 分段放缩、取整平移、一致连续.

证明 由 f 在 $[0, +\infty)$ 上一致连续可知, $\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0$, 使得当 $x, y \in [0, +\infty)$ 且 $|x - y| \leq \delta$ 时, 有

$$|f(x) - f(y)| < \varepsilon. \quad (5.43)$$

把 $[0, 1]$ 做 N 等分, 其中 $N = \frac{1}{\delta}$. 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} f\left(\frac{i}{N} + n\right) = 0, i = 0, 1, \dots, N$ 可知, 存在 $N' \in \mathbb{N}$, 使得 $\forall n \geq N'$, 有

$$\left|f\left(\frac{i}{N} + n\right)\right| < \varepsilon, \quad i = 0, 1, \dots, N. \quad (5.44)$$

从而对 $\forall x \geq 1 + N'$, 一定存在 $i \in \{0, 1, \dots, N-1\}, n \in \mathbb{N} \cap [N', +\infty)$, 使得 $x \in \left[\frac{i}{N} + n, \frac{i+1}{N} + n\right]$. 注意到此时

$$\left|x - \left(\frac{i}{N} + n\right)\right| \leq \left|\left(\frac{i+1}{N} + n\right) - \left(\frac{i}{N} + n\right)\right| = \frac{1}{N} = \delta.$$

于是结合 (5.43) 和 (5.44) 式我们就有

$$|f(x)| \leq \left|f(x) - f\left(\frac{i}{N} + n\right)\right| + \left|f\left(\frac{i}{N} + n\right)\right| < 2\epsilon.$$

故 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$.

□

例题 5.15 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(\sqrt{n})$ 存在且 f 在 $[0, +\infty)$ 一致连续. 证明: $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在.

证明 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(\sqrt{n}) = a$, 则对 $\forall \epsilon > 0$, 存在 $N \in \mathbb{N}$,

$$|f(\sqrt{n}) - a| < \epsilon, \quad \forall n > N. \quad (5.45)$$

由 f 在 $[0, +\infty)$ 上一致连续知, 存在 $\delta > 0$, 使得

$$|f(x) - f(y)| < \epsilon, \quad \forall x, y \geq 0 \text{ 且 } |x - y| < \delta. \quad (5.46)$$

对 $\forall x \geq 0$, 取 $n_x = [x^2]$. 注意到

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} (x - \sqrt{n_x}) = \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^2 - [x^2]}{x + \sqrt{[x^2]}} \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x + \sqrt{[x^2]}} = 0.$$

故存在 $X > N$, 使得

$$|x - \sqrt{n_x}| < \delta, \quad \forall x > X.$$

此时 $\sqrt{n_x} > X > N$. 于是由(5.45)和(5.46)式可得, 对 $\forall x > X$, 有

$$|f(x) - a| \leq |f(\sqrt{n_x}) - a| + |f(\sqrt{n_x}) - f(x)| \leq 2\epsilon.$$

故 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = a$.

□

例题 5.16 设 $\{f_n(x)\}$ 是定义在 $[a, b]$ 上的无穷次可微的函数序列且逐点收敛, 并在 $[a, b]$ 上满足 $|f'_n(x)| \leq M$.

- (1) 证明 $\{f_n(x)\}$ 在 $[a, b]$ 上一致收敛;
- (2) 设 $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$, 问 $f(x)$ 是否一定在 $[a, b]$ 上处处可导, 为什么?

证明

- (1) 由 $\{f_n\}$ 在 $[a, b]$ 上逐点收敛知, 对 $\forall \epsilon > 0$, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得对 $\forall n > m > N$, 都有

$$|f_n(x) - f_m(x)| < \epsilon, \quad \forall x \in [a, b]. \quad (5.47)$$

取 $[a, b]$ 的一个分划

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b,$$

满足 $x_i - x_{i-1} < \epsilon, i = 1, 2, \dots, n$. 于是当 $\forall n > m > N$ 时, 对 $\forall x \in [a, b]$, 都存在 $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, 使得 $x \in [x_{i-1}, x_i]$. 再利用(5.47)和 Lagrange 中值定理可得

$$\begin{aligned} |f_n(x) - f_m(x)| &\leq |f_n(x) - f_n(x_i)| + |f_n(x_i) - f_m(x_i)| + |f_m(x_i) - f_m(x)| \\ &< |f'_n(\xi_n)| \cdot |x_i - x| + \epsilon + |f'_m(\xi_m)| \cdot |x_i - x| \\ &\leq (2M + 1)\epsilon. \end{aligned}$$

故 $\{f_n(x)\}$ 在 $[a, b]$ 上一致收敛.

- (2) 不一定, 反例: $f_n(x) = \sqrt{x^2 + \frac{1}{n}}$ 在 $x = 0$ 处不可导.

□

5.5 Dini 定理

定理 5.18 (Dini 定理)

若 $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset C([a, b])$, $f \in C([a, b])$ 且对每一个 $x \in [a, b]$, 都有 $f_n(x)$ 关于 n 单调并成立

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x).$$

证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$ 关于 $x \in [a, b]$ 一致. 即 $f_n(x)$ 一致收敛到 $f(x)$.



注 不妨设 $f(x) = 0$ 的原因: 假设当 $f(x) = 0$ 时结论已经成立, 则当 $f(x) \neq 0$ 时, 令 $g_n(x) = f_n(x) - f(x)$, 此时 $\{g_n\}_{n \in \mathbb{N}} \in C[a, b]$, 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} g_n(x) = 0$. 因为对任意 $x \in [a, b]$, 都有 $f_n(x)$ 关于 n 单调, 所以对任意 $x \in [a, b]$, 也有 $g_n(x)$ 关于 n 单调. 于是由假设可知, $g_n(x)$ 一致收敛到 0. 因此 $f_n(x)$ 一致收敛到 $f(x)$. 故不妨设成立.

证明 不妨设 $f(x) = 0$, 不妨设对 $\forall x \in [a, b]$, 都有 $f_n(x)$ 关于 n 单调递减, 则由 $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = 0$ 可知, 对 $\forall x \in [a, b]$, 都有

$$f_n(x) \geq 0, \forall n \in \mathbb{N}_1.$$

对 $\forall \varepsilon > 0$, 考虑 $U_n \triangleq \{x \in [a, b] | f_n(x) < \varepsilon\}$, 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = 0$ 可得

$$[a, b] \subset \bigcup_{n=1}^{+\infty} U_n.$$

因为 $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}} \in C[a, b]$, 又注意 $f_n^{-1}(-\varepsilon, \varepsilon) = U_n$, 所以 U_n 是开集. 又由于对 $\forall x \in [a, b]$, 都有 $f_n(x)$ 关于 n 单调递减, 因此 $U_n \subset U_{n+1}, \forall n \in \mathbb{N}_1$. 这是因为对 $\forall x \in U_n$, 都有 $f_{n+1}(x) \leq f_n(x) < \varepsilon$, 于是 $x \in U_{n+1}$. 从而由有限覆盖定理可知, 存在 $n_1, n_2, \dots, n_m \in \mathbb{N}_1$, 使得

$$[a, b] \subset \bigcup_{k=1}^m U_{n_k}.$$

取 $N \triangleq \max\{n_1, n_2, \dots, n_m\}$, 则此时 $[a, b] \subset U_N$. 故对 $\forall n \geq N$, 由 $U_n \subset U_{n+1}, \forall n \in \mathbb{N}_1$ 可知, $[a, b] \subset U_N \subset U_n$, 即对 $\forall n \geq N$, 都有 $f_n(x) < \varepsilon, \forall x \in [a, b]$. 因此 $f_n(x)$ 一致收敛到 0. 故原定理得证.



定理 5.19 (Dini 定理函数单调版本)

设 $\{f_n(x)\}, n = 1, 2, \dots$ 都是关于 x 的单调函数. 若

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x) \in C[a, b].$$

则 $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$ 是一致的. 即 $f_n(x)$ 一致收敛到 $f(x)$.



注 条件里的单调性可以对不同的 n 有不同的单调性.

证明 由 Cantor 定理可知, f 在 $[a, b]$ 上一致连续. 从而对 $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $\delta > 0$, 使得

$$|f(y) - f(x)| < \varepsilon, \forall |y - x| \leq \delta. \quad (5.48)$$

设 $a = x_0 < x_1 < \dots < x_m = b$, 使得 $x_i - x_{i+1} \leq \delta, i = 0, 1, 2, \dots, m$. 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$ 可知, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得当 $n \geq N$ 时, 有

$$|f_n(x_i) - f(x_i)| < \varepsilon, \forall i \in \{0, 1, 2, \dots, m\}. \quad (5.49)$$

对 $\forall x \in [a, b]$, 当 $n \geq N$ 时, 一定存在 $i \in \{1, 2, \dots, m\}$, 使得 $x \in [x_{i-1}, x_i]$. 从而当 $n \geq N$ 时, 利用(5.48)和(5.49)式以及 f_n 的单调性可得

$$\begin{aligned} |f_n(x) - f(x)| &\leq |f_n(x) - f_n(x_i)| + |f_n(x_i) - f(x_i)| + |f(x_i) - f(x)| < |f_n(x_{i+1}) - f_n(x_i)| + \varepsilon + \varepsilon \\ &\leq |f_n(x_{i+1}) - f(x_{i+1})| + |f(x_{i+1}) - f(x_i)| + |f(x_i) - f_n(x_i)| + 2\varepsilon \\ &< \varepsilon + \varepsilon + \varepsilon + 2\varepsilon = 5\varepsilon. \end{aligned}$$

故 $f_n(x)$ 一致收敛到 $f(x)$.

□

5.6 更弱定义的导数

定理 5.20 (最弱递增条件)

1. 设 $f \in C[a, b]$ 满足对任何 $x_0 \in (a, b)$ 都有

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow x_0^+} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \geq 0,$$

则 f 在 $[a, b]$ 递增.

2. 设 $f \in C[a, b]$ 满足对任何 $x_0 \in (a, b)$ 都有

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow x_0^+} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} > 0, \quad (5.50)$$

则 f 在 $[a, b]$ 严格递增.

3. 设 $f \in C(a, b)$ 满足对任何 $x \in (a, b)$, 都有

$$\lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{f(x+h) - f(x-h)}{h} > 0.$$

证明 f 在 (a, b) 严格递增.

4. 设 $f \in C(a, b)$ 满足对任何 $x \in (a, b)$, 都有

$$\lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{f(x+h) - f(x-h)}{h} \geq 0.$$

证明 f 在 (a, b) 递增.

♡

注 只需证明 $f(b) \geq f(a)$ 或 $f(b) > f(a)$ 的原因: 假设 $f(b) \geq f(a)$ 或 $f(b) > f(a)$ 已经成立. 任取 $c, d \in (a, b)$ 或 $[a, b]$, 则我们考虑 (c, d) 或 $[c, d]$ 这个区间, 并且已知 f 在 (c, d) 或 $[c, d]$ 上连续且满足上述条件, 于是由假设可知 $f(d) \geq f(c)$ 或 $f(d) > f(c)$. 故我们只需证明 $f(b) \geq f(a)$ 或 $f(b) > f(a)$ 即可.

证明

1. 只需证明 $f(b) \geq f(a)$. 由 f 的连续性和极限保号性, 我们只需证明对充分小的 $\varepsilon > 0$, 有 $f(b) \geq f(a + \varepsilon)$. 考虑

$$F(x) = f(x) - f(a + \varepsilon) - \frac{f(b) - f(a + \varepsilon)}{b - a - \varepsilon}(x - a - \varepsilon).$$

则 $F(b) = F(a + \varepsilon) = 0$, $\overline{\lim}_{x \rightarrow x_0^+} \frac{F(x) - F(x_0)}{x - x_0} = \overline{\lim}_{x \rightarrow x_0^+} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} - \frac{f(b) - f(a + \varepsilon)}{b - a - \varepsilon}$, $\forall x_0 \in [a + \varepsilon, b)$. 于是设 F

在 $[a + \varepsilon, b]$ 最大值点为 c ,

(i) 当 $c \in [a + \varepsilon, b)$ 时, 则

$$0 \geq \overline{\lim}_{x \rightarrow c^+} \frac{F(x) - F(c)}{x - c} = \overline{\lim}_{x \rightarrow c^+} \frac{f(x) - f(c)}{x - c} - \frac{f(b) - f(a + \varepsilon)}{b - a - \varepsilon} \geq -\frac{f(b) - f(a + \varepsilon)}{b - a - \varepsilon}$$

故 $f(b) \geq f(a + \varepsilon)$.

(ii) 当 $c = b$ 时, 则对 $\forall x \in [a + \varepsilon, b]$, 都有 $0 = F(b) = F(c) \geq F(x)$. 从而

$$\begin{aligned} F(x) &= f(x) - f(a + \varepsilon) - \frac{f(b) - f(a + \varepsilon)}{b - a - \varepsilon}(x - a - \varepsilon) \leq 0 \\ \Rightarrow \frac{f(x) - f(a + \varepsilon)}{x - a - \varepsilon} &\leq \frac{f(b) - f(a + \varepsilon)}{b - a - \varepsilon} \\ \Rightarrow \frac{f(b) - f(a + \varepsilon)}{b - a - \varepsilon} &\geq \overline{\lim}_{x \rightarrow (a+\varepsilon)^+} \frac{f(x) - f(a + \varepsilon)}{x - a - \varepsilon} > 0 \\ \Rightarrow f(b) &> f(a + \varepsilon) \end{aligned}$$

证毕.

2. 若 f 在 $[a, b]$ 不严格增, 则存在 $[c, d] \subset [a, b]$ 使得 $f(d) = f(c)$, 注意到由第 1 问可知 f 在 $[c, d]$ 递增, 从而只能为常数, 于是 $f(x) \equiv f(c)$. 不妨设 $[c, d] \subset (a, b)$, 否则任取 $[a, b]$ 一个子区间即可. 因此

$$\varlimsup_{x \rightarrow c^+} \frac{f(x) - f(c)}{x - c} = 0.$$

这显然和(5.50)矛盾! 故我们证明了 f 在 $[a, b]$ 严格递增.

3. 对 $[c, d] \subset (a, b)$, 我们断言存在 $x_1 \in (c, d)$ 使得

$$\frac{f(d) - f(c)}{d - c} \geq \varlimsup_{h \rightarrow 0^+} \frac{f(x_1 + h) - f(x_1 - h)}{2h} \quad (5.51)$$

现在我们用 $g(x) = \frac{f(d) - f(c)}{d - c}(x - c) + f(c) - f(x)$ 代替 f . 于是考虑 $g \in C^1[c, d]$, $g(d) = g(c) = 0$, 此时要证明(5.51), 就只需证明存在 $x_1 \in (c, d)$ 使得

$$\varlimsup_{h \rightarrow 0^+} \frac{g(x_1 + h) - g(x_1 - h)}{2h} \geq 0 \quad (5.52)$$

若 $g \equiv 0$, 已经得到了不等式(5.52).

若 $t \in (a, b)$ 是 g 的最大值点使得 $g(t) > 0$. 取 $k \in (0, g(t))$, 则构造非空有界集

$$U = \{x \in [c, t] : g(x) > k\}.$$

记 $x_1 = \inf U$, 则存在 $t_n \in U, n \in \mathbb{N}$ 使得

$$t_n \geq x_1, \lim_{n \rightarrow \infty} t_n = x_1.$$

注意 $x_1 \neq c$, 若 $g(x_1) > k$, 则且由函数连续性知 x_1 左侧仍有 $g > k$, 这和 x_1 是 \inf 矛盾! 故我们只有 $x_1 \notin U$ 且 $g(x_1) = k$. 注意到

$$\frac{g(x_1 + t_n - x_1) - g(x_1 - (t_n - x_1))}{2(t_n - x_1)} \geq \frac{k - k}{2(t_n - x_1)} = 0$$

这就给出了(5.52).

若 f 有负的最小值 $g(t) < 0$. 取 $k \in (g(c), 0)$, 构造非空有界集

$$V = \{x \in [t, d] : g(x) < k\}.$$

并取 $x_1 = \sup V$, 同样的 $g(x_1) = k$ 且 $x_1 \neq d$. 存在 $s_n \in V$ 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = x_1$. 于是由

$$\frac{g(x_1 + x_1 - s_n) - g(x_1 - (x_1 - s_n))}{2(x_1 - s_n)} \geq \frac{k - k}{2(x_1 - s_n)} = 0$$

知(5.52)成立.

现在由不等式(5.51)和题目条件就证明了 $f(d) > f(c)$, 从而 f 严格递增.

4. 注意到 $f(x) + \varepsilon x, \varepsilon > 0$ 满足第 3 问要求, 因此

$$f(y) + \varepsilon y > f(x) + \varepsilon x, \forall b > y > x > a, \varepsilon > 0.$$

让 $\varepsilon \rightarrow 0^+$, 我们有 $f(y) \geq f(x)$, 这就证明了 f 在 (a, b) 递增.

□

推论 5.6 (右可导函数非负则递增)

设 f 是闭区间 $[a, b]$ 上的连续函数且在开区间 (a, b) 右可导. 若 $f'_+(x) \geq 0, \forall x \in (a, b)$, 证明 f 在 $[a, b]$ 递增.

♡

定理 5.21 (右导数的 Lagrange 中值定理)

设 f 在 (a, b) 右可导且在 $[a, b]$ 上连续, 证明存在 $x_1, x_2 \in (a, b)$ 使得

$$f'_+(x_2) \geq \frac{f(b) - f(a)}{b - a} \geq f'_+(x_1). \quad (5.53)$$

♡



笔记 类似的, 我们有左导数的版本.

证明 不妨设 $f(b) = f(a) = 0$, 否则用 $f(x) - f(a) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a)$ 代替 f 即可. 如果结论不对, 假设 $f'_+(x) \geq 0$ 恒成立. 于是由推论 5.6 我们知道 f 递增, 又 $f(a) = f(b) = 0$, 故 $f \equiv 0$, 因此此时仍然有(5.53)成立, 矛盾! 这就完

成了证明.

□

命题 5.31 (右导数连续则原函数可导)

设 f 在 (a, b) 右可导且 f'_+ 在 (a, b) 连续, 证明 f 在 (a, b) 可导且 $f'(x) = f'_+(x), \forall x \in (a, b)$.

◆



笔记 类似的, 我们有左导数的版本.

证明 由右导数的 Lagrange 中值定理, 我们知道对 $\forall x_1, x_2 \in [a, b]$, 都存在 θ_1, θ_2 在 x_1, x_2 之间, 使得

$$f^S(\theta_2) \geq \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \geq f^S(\theta_1),$$

让 $x_2 \rightarrow x_1$, 由右导数的连续性和夹逼准则即可得

$$f'(x_1) = f^S(x_1).$$

这就完成了证明.

□

5.6.1 Schwarz 导数

定义 5.4 (Schwarz 导数)

设 $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$, 我们称 f 在 $x_0 \in (a, b)$ Schwarz 可导, 如果存在极限

$$f^S(x_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0 - h)}{2h}. \quad (5.54)$$

如果 f 在 (a, b) 处处 Schwarz 可导, 则称 f 在 (a, b) Schwarz 可导.

♣

笔记 显然 f 在 x_0 可导则必然在 x_0 Schwarz 可导且 $f'(x_0) = f^S(x_0)$, 但反之不一定成立.

定理 5.22 (Schwarz 导数的 Lagrange 中值定理)

设 f 在 $[a, b]$ 连续且在 (a, b) Schwarz 可导, 证明存在 $x_1, x_2 \in (a, b)$, 使得

$$f^S(x_1) \geq \frac{f(b) - f(a)}{b - a} \geq f^S(x_2). \quad (5.55)$$

♡



笔记 本定理是此类问题的核心定理. 其余结果都是本定理的平凡推论.

证明 和证明 Lagrange 中值定理一样, 我们只需证明 Rolle 中值定理的情况即可. 即不妨设 $f(a) = f(b) = 0$, 否则用 $f(x) - f(a) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a)$ 代替 f 即可.

若 $f \equiv 0$, 则结论是显然的. 若 f 有正的最大值, 则设 $c \in (a, b)$ 是 f 的最大值点使得 $f(c) > 0$, 取 $k \in (0, f(c))$, 构造非空有界集

$$U = \{x \in [a, c] : f(x) > k\}.$$

于是记 $x_1 = \inf U$, 就有 $t_n \in U$, 使得

$$t_n \geq x_1, \lim_{n \rightarrow \infty} t_n = x_1.$$

注意 $x_1 \neq a$ 且若 $f(x_1) > k$, 则且由函数连续性知 x_1 左侧仍有 $f > k$, 这和 x_1 是 $\inf U$ 矛盾! 故我们只有 $x_1 \notin U$ 且 $f(x_1) = k$. 现在

$$f^S(x_1) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_1 + h) - f(x_1 - h)}{2h} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(x_1 + t_n - x_1) - f(x_1 - (t_n - x_1))}{2(t_n - x_1)} \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{k - k}{2(t_n - x_1)} = 0.$$

若 f 有负的最小值 $f(c) < 0$. 取 $k \in (f(c), 0)$, 构造非空有界集

$$V = \{x \in [c, b] : f(x) < k\}.$$

并取 $x_1 = \sup V$, 同样的 $f(x_1) = k$ 且 $x_1 \neq b$. 存在 $s_n \in V$ 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = x_1$. 于是

$$f^S(x_1) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_1 + h) - f(x_1 - h)}{2h} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(x_1 + x_1 - s_n) - f(x_1 - (x_1 - s_n))}{2(x_1 - s_n)} \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{k - k}{2(x_1 - s_n)} = 0.$$

考虑 $f(a + b - x)$ 可得 $f^S(x_2) \leq 0$, 这就完成了定理的证明. \square

命题 5.32

设 f 在 $[a, b]$ 连续且在 (a, b) Schwarz 可导, 若 $f^S(x) \geq 0, \forall x \in (a, b)$, 则 f 在 $[a, b]$ 递增.

证明 对 $\forall [c, d] \subset [a, b]$, 由 Schwarz 导数的 Lagrange 中值定理知存在 $\theta \in (c, d)$ 使得

$$\frac{f(d) - f(c)}{d - c} \geq f^S(\theta) \geq 0,$$

故

$$f(d) \geq f(c).$$

这就完成了证明. \square

命题 5.33

若 f 在 $[a, b]$ 连续且在 (a, b) 有连续的 Schwarz 导数, 则 f 在 (a, b) 可微且

$$f'(x) = f^S(x), \forall x \in (a, b).$$

证明 由 Schwarz 导数的 Lagrange 中值定理, 我们知道对 $\forall x_1, x_2 \in [a, b]$, 都存在 θ_1, θ_2 在 x_1, x_2 之间, 使得

$$f^S(\theta_2) \geq \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \geq f^S(\theta_1),$$

让 $x_2 \rightarrow x_1$, 由 Schwarz 导数连续性和夹逼准则即可得

$$f'(x_1) = f^S(x_1).$$

这就完成了证明. \square

例题 5.17 设 $f \in C(a, b)$ 且存在极限:

$$f^{[2]}(x) = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{f(x + 2h) - 2f(x) + f(x - 2h)}{4h^2}. \quad (5.56)$$

1. 若 f 在 $x_0 \in (a, b)$ 二阶可导, 则 $f''(x_0) = f^{[2]}(x_0)$.
2. 若 $f^{[2]}(x) < 0, \forall x \in (a, b)$, 证明 f 为 (a, b) 上的严格上凸函数.
3. 若 $f^{[2]}(x) < 0, \forall x \in (a, b)$ 且 f 在 (a, b) 是有下界函数, 证明 $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x)$ 存在.
4. 若 $f^{[2]}(x) = 0, \forall x \in (a, b)$, 则 $f(x)$ 为线性函数.

证明

1. 因为 f 在 $x_0 \in (a, b)$ 二阶可导, 所以 f 在 x_0 邻域一阶可导, 所以

$$\begin{aligned} & \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{f(x_0 + 2h) - 2f(x_0) + f(x_0 - 2h)}{4h^2} \xrightarrow{\text{L'Hospital}} \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{2f'(x_0 + 2h) - 2f'(x_0 - 2h)}{8h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{2f'(x_0 + 2h) - 2f'(x_0)}{8h} + \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{2f'(x_0) - 2f'(x_0 - 2h)}{8h} \\ &= \frac{f''(x_0)}{2} + \frac{f''(x_0)}{2} = f''(x_0). \end{aligned}$$

2. 对任何 $x \in (a, b)$, 存在充分小的 $\eta > 0$, 只要 $h \in (0, \eta)$, 就有

$$f(x + 2h) - 2f(x) + f(x - 2h) < 0,$$

即

$$\frac{f(x + 2h) + f(x - 2h)}{2} < f(x).$$

现在对 $x \in (a, b), y \in \mathbb{R} \setminus \{0\}, \delta > 0$, 取 $0 < h < \min \left\{ \delta, \frac{2\delta}{|y|} \right\}$, 就有

$$f(x) > \frac{f(x+hy) + f(x-hy)}{2}.$$

由定理 5.15 知 f 是 (a, b) 上的严格上凸函数.

3. 由命题 5.19 和第二问我们知道 $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x)$ 存在.

4. **Method 1** 由第二问我们知道 f 在 (a, b) 即凹又凸. 则由命题 5.16 知 f 是线性函数.

Method 2 标准的摄动法, 保持二阶导且不破坏边界条件的最好的振动函数是 $-(x-a)(x-b)$.

不妨先一般性, 假设 $f \in C[a, b]$, 否则用内闭考虑即可. 我们用 $f(x) - f(a) - \frac{f(b) - f(a)}{b-a}(x-a)$ 代替 f , 从而不妨设 $f(a) = f(b) = 0$. 若某个 $x_0 \in (a, b)$ 有 $f(x_0) > 0$, 考虑

$$f_\varepsilon(x) = f(x) + \varepsilon(x-a)(x-b),$$

这里 $\varepsilon > 0$, 使得

$$f(x_0) + \varepsilon(x_0-a)(x_0-b) > 0.$$

不妨设 x_0 是 f_ε 的最大值点, 现在

$$f_\varepsilon(a) = f_\varepsilon(b) = 0, f_\varepsilon(x_0) = \max_{x \in [a, b]} f_\varepsilon(x),$$

$$\begin{aligned} f_\varepsilon^{[2]}(x_0) &= \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{f_\varepsilon(x_0 + 2h) - 2f_\varepsilon(x_0) + f_\varepsilon(x_0 - 2h)}{4h^2} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{f(x_0 + 2h) - 2f(x_0) + f(x_0 - 2h) + 8\varepsilon h^2}{4h^2} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{8\varepsilon h^2}{4h^2} = 2\varepsilon > 0. \end{aligned}$$

但是

$$f_\varepsilon^{[2]}(x_0) = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{f_\varepsilon(x_0 + 2h) - 2f_\varepsilon(x_0) + f_\varepsilon(x_0 - 2h)}{4h^2} \leq 0.$$

这就是一个矛盾! 于是我们证明了 $f \leq 0$. 考虑 $-f$ 可得 $f \equiv 0$. 证毕!

□

命题 5.34 (数列内插)

给定实数列 $\{x_n\}_{n=1}^\infty$, 设

$$\sup_{n \geq 0} |x_n| = M, \sup_{n \geq 0} |x_{n+2} - 2x_{n+1} + x_n| = K,$$

我们断言

$$|x_{n+1} - x_n| \leq 2\sqrt{MK}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

◆

证明 事实上当 M 或者 K 为 0 时命题显然成立 ($K = 0$ 意味着 x_n 是有界的等差数列, 必然常数列), 因此不妨假设 $M, K > 0$. 注意到对 $\forall n \geq 2$, 我们有

$$\begin{aligned} M &\geq x_n = x_0 + \sum_{k=1}^n (x_k - x_{k-1}) = x_0 + (x_1 - x_0) + \sum_{k=2}^n (x_k - x_{k-1}) \\ &= x_0 + (x_1 - x_0) + \sum_{k=2}^n \left[(x_1 - x_0) + \sum_{j=1}^{k-1} (x_{j+1} - x_j) - (x_j - x_{j-1}) \right] \\ &= x_0 + (x_1 - x_0)n + \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} (x_{j+1} - 2x_j + x_{j-1}) \\ &\geq -M + (x_1 - x_0)n - \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} K \end{aligned}$$

$$= -M + (x_1 - x_0)n - \frac{(n-1)n}{2}K,$$

因此容易看见

$$x_1 - x_0 \leq \frac{2M}{n} + \frac{n-1}{2}K, \forall n \geq 1.$$

另外一方面对 $n \geq 2$, 我们有

$$\begin{aligned} -M &\leq x_n = x_0 + \sum_{k=1}^n (x_k - x_{k-1}) = x_0 + (x_1 - x_0) + \sum_{k=2}^n (x_k - x_{k-1}) \\ &= x_0 + (x_1 - x_0) + \sum_{k=2}^n \left[(x_1 - x_0) + \sum_{j=1}^{k-1} (x_{j+1} - x_j) - (x_j - x_{j-1}) \right] \\ &= x_0 + (x_1 - x_0)n + \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} (x_{j+1} - 2x_j + x_{j-1}) \\ &\leq M + (x_1 - x_0)n + \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} K = M + (x_1 - x_0)n + \frac{n(n-1)}{2}K, \end{aligned}$$

因此

$$-\frac{2M}{n} - \frac{n-1}{2}K \leq x_1 - x_0, \forall n \geq 1.$$

所以

$$|x_1 - x_0| \leq \frac{2M}{n} + \frac{n-1}{2}K, \forall n \geq 1.$$

注意到

$$\frac{2M}{n} + \frac{n-1}{2}K - 2\sqrt{MK} = \frac{Kn^2 - (4\sqrt{KM} + K)n + 4M}{2n}. \quad (5.57)$$

记

$$f(x) \triangleq Kx^2 - (4\sqrt{KM} + K)x + 4M,$$

则 $f(0) = 4M > 0$, $f(x)$ 的对称轴为 $\frac{4\sqrt{MK} + K}{2K} = 2\sqrt{\frac{M}{K}} + \frac{1}{2} > 0$. 并且 $f(x)$ 的两个零点之差的绝对值为

$$\frac{2\sqrt{\Delta}}{2K} = \frac{\sqrt{K^2 + 8\sqrt{KM}}}{K} = \sqrt{1 + 8\sqrt{\frac{M}{K}}} > 1.$$

故必存在 $n \in \mathbb{N}$, 使得 $f(n) \leq 0$. 由(5.57)式知

$$f(n) \leq 0 \iff \frac{2M}{n} + \frac{n-1}{2}K - 2\sqrt{MK} \leq 0 \iff \frac{2M}{n} + \frac{n-1}{2}K \leq 2\sqrt{MK}.$$

因此

$$|x_1 - x_0| \leq \frac{2M}{n} + \frac{n-1}{2}K \leq 2\sqrt{MK}.$$

类似可证

$$|x_{n+1} - x_n| \leq 2\sqrt{MK}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

□

例题 5.18 若有界函数 f 满足

$$\limsup_{h \rightarrow 0} \sup_{x \in \mathbb{R}} |f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)| = 0,$$

证明 f 一致连续.

证明 由条件知, 对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $\delta > 0$, 使得

$$|f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)| \leq \varepsilon, \forall x \in \mathbb{R}, h \in [-\delta, \delta].$$

现在对固定的 $h \in [-\delta, \delta]$, 考虑 $\{f(x + nh)\}_{n=0}^{\infty}$, 我们有

$$\sup_{n \geq 0} |f(x + nh)| \leq \sup |f|, \quad \sup_{n \geq 0} |f(x + (n+2)h) - 2f(x + (n+1)h) + f(x + nh)| \leq \varepsilon.$$

由前面的数列内插, 我们有

$$|f(x + h) - f(x)| \leq 2\sqrt{\varepsilon \cdot \sup |f|}, \forall x \in \mathbb{R}, h \in [-\delta, \delta],$$

这就证明了 f 在 \mathbb{R} 上一致连续.

□

例题 5.19 设 $f \in C(a, b)$ 且

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^3} \left\{ \int_0^h [f(x+u) + f(x-u) - 2f(x)] du \right\} = 0, \forall x \in (a, b),$$

证明: f 是线性函数.

笔记 还可以不妨设 $a = 0, b = 1$, 否则用 $f(a(1-x) + bx) = f((b-a)x + a)$ 代替 f 即可. 这样就可以直接不妨设 $f \in C[0, 1]$ 且 $f(0) = f(1) = 0$.

不妨设 $a = 0, b = 1$ 的原因: 令 $g(x) \triangleq f((b-a)x + a)$, 则对 $\forall x \in (0, 1)$, 记 $y = (b-a)x + a \in [a, b]$, 则

$$\begin{aligned} & \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^3} \left\{ \int_0^h [g(x+u) + g(x-u) - 2g(x)] du \right\} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^3} \left\{ \int_0^h [f(y + (b-a)u) + f(y - (b-a)u) - 2f(y)] du \right\} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{(b-a)h^3} \left\{ \int_0^{(b-a)h} [f(y+u) + f(y-u) - 2f(y)] du \right\} \\ &= (b-a)^2 \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{(b-a)^3 h^3} \left\{ \int_0^{(b-a)h} [f(y+u) + f(y-u) - 2f(y)] du \right\} \\ &= (b-a)^2 \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^3} \left\{ \int_0^h [f(y+u) + f(y-u) - 2f(y)] du \right\} = 0. \end{aligned}$$

因此 g 仍然满足题目条件. 若已证 $g \equiv 0$, 就有

$$f((b-a)x + a) = 0, \forall x \in [0, 1] \iff f(x) = 0, \forall x \in [a, b].$$

故可以不妨设 $a = 0, b = 1$.

证明 不妨设 $f \in C[a, b]$, 否则内闭的考虑或修改 f 在端点的值即可. 用 $f(x) - \frac{f(b) - f(a)}{b-a}(x-a) - f(a)$ 代替 f 可以不妨设 $f(a) = f(b) = 0$. 此时只需证 $f \equiv 0$ 即可.

若

$$f(x_0) = \max_{x \in [a, b]} f(x) > 0,$$

则 $x_0 \in (a, b)$. 取 $\varepsilon > 0$ 使得

$$f(x_0) + \varepsilon(x_0 - a)(x_0 - b) > 0.$$

考虑

$$f_\varepsilon(x) \triangleq f(x) + \varepsilon(x-a)(x-b),$$

则存在 $x_1 \in (a, b)$, 使得

$$f_\varepsilon(x_1) = \max_{x \in [a, b]} f_\varepsilon(x) \geq f_\varepsilon(x_0) > 0.$$

现在

$$\begin{aligned} 0 &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^3} \left\{ \int_0^h [f_\varepsilon(x_1) + f_\varepsilon(x_1) - 2f_\varepsilon(x_1)] du \right\} \\ &\geq \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^3} \left\{ \int_0^h [f_\varepsilon(x_1+u) + f_\varepsilon(x_1-u) - 2f_\varepsilon(x_1)] du \right\} \end{aligned}$$

$$= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\int_0^h 2\varepsilon u^2 du}{h^3} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{2}{3}\varepsilon h^3}{h^3} = \frac{2}{3}\varepsilon > 0,$$

这就是一个矛盾! 因此我们有

$$\max_{x \in [a, b]} f(x) \leq 0 \implies f(x) \leq 0, \forall x \in [a, b].$$

考虑 $-f$, 令 $-f_\varepsilon(x) = -f(x) - \varepsilon(x-a)(x-b)$, 同理可得

$$\max_{x \in [a, b]} (-f(x)) \leq 0 \implies -f(x) \leq 0, \forall x \in [a, b] \implies f(x) \geq 0, \forall x \in [a, b].$$

现在就有

$$f(x) = 0, \forall x \in [a, b],$$

即所求函数 f 为线性函数.

□

5.7 逼近方法

5.7.1 Bernstein 多项式

Bernstein 多项式都能定义在 $[a, b]$ 上, 因为只差一个换元法, 因此我们不妨设 $[a, b] = [0, 1]$.

定义 5.5 (一维 Bernstein 多项式)

设 $f \in C[0, 1]$, $n \in \mathbb{N}_0$, 定义 f 的 Bernstein 多项式为

$$B_n(f, x) \triangleq \sum_{k=0}^n f\left(\frac{k}{n}\right) C_n^k x^k (1-x)^{n-k}.$$

设 $f \in C[a, b]$, $n \in \mathbb{N}_0$, 定义 f 的 Bernstein 多项式为

$$B_n(f, x) \triangleq \sum_{k=0}^n f\left((b-a)\frac{k}{n} + a\right) C_n^k \frac{(x-a)^k (b-x)^{n-k}}{(b-a)^n}.$$

♣

注 $[a, b]$ 区间上的 Bernstein 多项式可由 $[0, 1]$ 区间上的 Bernstein 多项式换元得到.

设 $f \in C[a, b]$, $n \in \mathbb{N}_0$, 令 $x = (b-a)y + a, \forall x \in [a, b]$, 则 $y \in [0, 1]$, 并且

$$y = \frac{x-a}{b-a}, 1-y = \frac{b-x}{b-a}.$$

再令 $g(y) = f((b-a)y + a)$, 则由 $f \in C[a, b]$ 可知 $g \in C[0, 1]$. 于是 g 在 $[0, 1]$ 区间上的 Bernstein 多项式为

$$B_n(g, y) \triangleq \sum_{k=0}^n g\left(\frac{k}{n}\right) C_n^k y^k (1-y)^{n-k}.$$

故 $[a, b]$ 区间上 f 的 Bernstein 多项式可定义为

$$B_n(f, x) \triangleq \sum_{k=0}^n f\left((b-a)\frac{k}{n} + a\right) C_n^k \frac{(x-a)^k (b-x)^{n-k}}{(b-a)^n}.$$

引理 5.2

1. $B_n(C, x) = C \sum_{k=0}^n C_n^k x^k (1-x)^{n-k} = C$.
2. $B_n(x, x) = \sum_{k=0}^n \frac{k}{n} C_n^k x^k (1-x)^{n-k} = x$.
3. $\sum_{k=0}^n \left(\frac{k}{n} - x\right) C_n^k x^k (1-x)^{n-k} = 0$.

4. $\sum_{k=0}^n \left(\frac{k}{n} - x\right)^2 C_n^k x^k (1-x)^{n-k} = \frac{x(1-x)}{n}.$



证明

1. 由二项式定理可得 $B_n(C, x) = C \sum_{k=0}^n C_n^k x^k (1-x)^{n-k} = C (x+1-x)^n = C.$

2. $B_n(x, x) = \sum_{k=0}^n \frac{k}{n} C_n^k x^k (1-x)^{n-k} = \frac{(1-x)^n}{n} \sum_{k=0}^n k C_n^k \left(\frac{x}{1-x}\right)^k.$ 由幂级数可逐项求导得

$$\sum_{k=0}^n k C_n^k y^{k-1} = \left(\sum_{k=0}^n C_n^k y^k \right)' = [(1+y)^n]' = n(1+y)^{n-1}.$$

因此

$$\sum_{k=0}^n k C_n^k y^k = ny(1+y)^{n-1}.$$

故

$$\begin{aligned} B_n(x, x) &= \frac{(1-x)^n}{n} \sum_{k=0}^n k C_n^k \left(\frac{x}{1-x}\right)^k = \frac{(1-x)^n}{n} \frac{nx}{1-x} \left(1 + \frac{x}{1-x}\right)^{n-1} \\ &= \frac{(1-x)^n}{n} \frac{nx}{1-x} \left(\frac{1}{1-x}\right)^{n-1} = x. \end{aligned}$$

3. 由 2 的结论可直接得到.

4. 首先, 展开得到

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n \left(\frac{k}{n} - x\right)^2 C_n^k x^k (1-x)^{n-k} &= (1-x)^n \sum_{k=0}^n \left(x^2 - \frac{2xk}{n} + \frac{k^2}{n^2}\right) C_n^k \left(\frac{x}{1-x}\right) \\ &= x^2 \sum_{k=0}^n C_n^k x^k (1-x)^{n-k} - \frac{2x(1-x)^n}{n} \sum_{k=0}^n k C_n^k \left(\frac{x}{1-x}\right)^k + \frac{(1-x)^n}{n^2} \sum_{k=0}^n k^2 C_n^k \left(\frac{x}{1-x}\right)^k \\ &= x^2 - \frac{2x(1-x)^n}{n} \sum_{k=0}^n k C_n^k \left(\frac{x}{1-x}\right)^k + \frac{(1-x)^n}{n^2} \sum_{k=0}^n k^2 C_n^k \left(\frac{x}{1-x}\right)^k. \end{aligned} \quad (5.58)$$

接着, 计算 $\sum_{k=0}^n k C_n^k y^k$ 和 $\sum_{k=0}^n k^2 C_n^k y^k$. 由幂级数可逐项求导得

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n k C_n^k y^{k-1} &= \left(\sum_{k=0}^n C_n^k y^k \right)' = [(1+y)^n]' = n(1+y)^{n-1}. \\ \sum_{k=0}^n k^2 C_n^k y^k &= y \left[\left(\sum_{k=0}^n k C_n^k y^k \right)' \right] = y \left[\left(y \left(\sum_{k=0}^n C_n^k y^k \right)' \right)' \right] \\ &= y [(y((1+y)^n)')] = y [(ny(1+y)^{n-1})'] \\ &= y [n(1+y)^{n-1} + n(n-1)y(1+y)^{n-2}] \\ &= ny(1+y)^{n-2} [(1+y) + (n-1)y] \\ &= ny(1+y)^{n-2} (ny + 1). \end{aligned}$$

令 $y = \frac{x}{1-x}$, 则由上式可得

$$\sum_{k=0}^n k C_n^k \left(\frac{x}{1-x}\right)^k = n \left(\frac{x}{1-x}\right) \left(1 + \frac{x}{1-x}\right)^{n-1} = \frac{nx}{1-x} \left(\frac{1}{1-x}\right)^{n-1} = \frac{nx}{(1-x)^n}.$$

$$\sum_{k=0}^n k^2 C_n^k \left(\frac{x}{1-x}\right)^k = n \left(\frac{x}{1-x}\right) \left(1 + \frac{x}{1-x}\right)^{n-2} \left(\frac{nx}{1-x} + 1\right) = \frac{nx}{1-x} \left(\frac{1}{1-x}\right)^{n-2} \frac{(n-1)x+1}{1-x} = \frac{nx[(n-1)x+1]}{(1-x)^n}.$$

将上式代入(5.58)可得

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n \left(\frac{k}{n} - x\right)^2 C_n^k x^k (1-x)^{n-k} &= x^2 - \frac{2x(1-x)^n}{n} \sum_{k=0}^n k C_n^k \left(\frac{x}{1-x}\right)^k + \frac{(1-x)^n}{n^2} \sum_{k=0}^n k^2 C_n^k \left(\frac{x}{1-x}\right)^k \\ &= x^2 - \frac{2x(1-x)^n}{n} \cdot \frac{nx}{(1-x)^n} + \frac{(1-x)^n}{n^2} \cdot \frac{nx[(n-1)x+1]}{(1-x)^n} \\ &= x^2 - 2x^2 + \frac{(n-1)x^2+x}{n} = \frac{x(1-x)}{n}. \end{aligned}$$

□

定理 5.23 (Bernstein 多项式的性质)

(1) 设 $\varphi(x) = n \left[f\left(\frac{n-1}{n}x + \frac{1}{n}\right) - f\left(\frac{n-1}{n}x\right) \right]$, $n = 1, 2, 3, \dots$, 则有

$$B'_n(f, x) = B_{n-1}(\varphi, x), n \in \mathbb{N}. \quad (5.59)$$

(2) 若 f 递增或者递减, 则 $B_n(f, x), n \in \mathbb{N}_0$ 也递增或者递减.

(3) 若 f 是 $[0, 1]$ 的凸或者凹函数, 则对每个 $n \in \mathbb{N}_0$ 都有 $B_n(f, x)$ 是 $[0, 1]$ 的凸或者凹函数.

(4) 设 $f \in C^k[0, 1], k \in \mathbb{N}_0$, 则关于 $x \in [0, 1]$, 一致的有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} B_n(f, x) = f(x), \lim_{n \rightarrow \infty} B'_n(f, x) = f'(x), \dots, \lim_{n \rightarrow \infty} B_n^{(k)}(f, x) = f^{(k)}(x). \quad (5.60)$$

♡

注 性质(4)对任意光滑的情况并不成立!

即当 $f \in C^\infty[0, 1]$ 时, 对 $\forall k \in \mathbb{N}$, 都有 $\lim_{n \rightarrow \infty} B_n^{(k)}(f, x) = f^{(k)}(x)$ 不成立!

也即当 $f \in C^\infty[0, 1]$ 时, 对 $\forall k \in \mathbb{N}$, 存在一个 N (与 k 无关, 公共的 N), 使得 $\forall n > N$, 都有 $B_n^{(k)}(f, x) \not\rightarrow f^{(k)}(x)$

不成立!

证明

(1) 对 $n \geq 1$, 直接计算得

$$\begin{aligned} B'_n(f, x) &= \left[\sum_{k=0}^n f\left(\frac{k}{n}\right) C_n^k x^k (1-x)^{n-k} \right]' \\ &= \sum_{k=1}^n k f\left(\frac{k}{n}\right) C_n^k x^{k-1} (1-x)^{n-k} - \sum_{k=0}^{n-1} (n-k) f\left(\frac{k}{n}\right) C_n^k x^k (1-x)^{n-k-1} \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} (k+1) f\left(\frac{k+1}{n}\right) C_n^{k+1} x^k (1-x)^{n-k-1} - \sum_{k=0}^{n-1} (n-k) f\left(\frac{k}{n}\right) C_n^k x^k (1-x)^{n-k-1} \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \left[(k+1) f\left(\frac{k+1}{n}\right) C_n^{k+1} - (n-k) f\left(\frac{k}{n}\right) C_n^k \right] x^k (1-x)^{n-k-1} \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \left[(k+1) f\left(\frac{k+1}{n}\right) \frac{n!}{(k+1)!(n-k-1)!} - (n-k) f\left(\frac{k}{n}\right) \frac{n!}{k!(n-k)!} \right] x^k (1-x)^{n-k-1} \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \left[n f\left(\frac{k+1}{n}\right) \frac{(n-1)!}{k!(n-k-1)!} - n f\left(\frac{k}{n}\right) \frac{(n-1)!}{k!(n-k-1)!} \right] x^k (1-x)^{n-k-1} \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} n \left[f\left(\frac{k+1}{n}\right) - f\left(\frac{k}{n}\right) \right] C_{n-1}^k x^k (1-x)^{n-k-1} \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \varphi\left(\frac{k}{n-1}\right) C_{n-1}^k x^k (1-x)^{n-k-1} \\ &= B_{n-1}(\varphi, x), \end{aligned}$$

这就给出了式(5.59).

- (2) 如果 f 递增, 那么就有 $\varphi \geq 0$, 则由(5.59)知 $B'_n(f, x) = B_{n-1}(\varphi, x) \geq 0$, 故 $B_n(f, x)$ 递增. 类似可得递减.
(3) 如果 f 下凸, 对 $n=1$ 的情况是否符合条件都可以单独验证, 我们略去过程, 下设 $n \geq 2$. 注意继续由(5.59)知

$$B''_n(f, x) = B'_{n-1}(\varphi, x) = B_{n-2}(\psi, x), \psi(x) = (n-1) \left[\varphi \left(\frac{n-2}{n-1}x + \frac{1}{n-1} \right) - \varphi \left(\frac{n-2}{n-1}x \right) \right],$$

从而由 f 的下凸性可得

$$\begin{aligned} B_{n-2}(\psi, x) &= \sum_{j=0}^{n-2} \psi \left(\frac{j}{n-2} \right) C_{n-2}^j (1-x)^{n-2-j} x^j \\ &= \sum_{j=0}^{n-2} \left[\varphi \left(\frac{j+1}{n-1} \right) - \varphi \left(\frac{j}{n-1} \right) \right] \frac{(n-1)!}{j!(n-2-j)!} (1-x)^{n-2-j} x^j \\ &= n \sum_{j=0}^{n-2} \left[f \left(\frac{j+2}{n} \right) - f \left(\frac{j+1}{n} \right) - f \left(\frac{j+1}{n} \right) + f \left(\frac{j}{n} \right) \right] \frac{(n-1)!}{j!(n-2-j)!} (1-x)^{n-2-j} x^j \\ &= 2n \sum_{j=0}^{n-2} \left[\frac{f \left(\frac{j+2}{n} \right) + f \left(\frac{j}{n} \right)}{2} - f \left(\frac{j+1}{n} \right) \right] \frac{(n-1)!}{j!(n-2-j)!} (1-x)^{n-2-j} x^j \\ &= 2n \sum_{j=0}^{n-2} \left[\frac{f \left(\frac{j+2}{n} \right) + f \left(\frac{j}{n} \right)}{2} - f \left(\frac{j+2+j}{2n} \right) \right] \frac{(n-1)!}{j!(n-2-j)!} (1-x)^{n-2-j} x^j \\ &\geq 0, \end{aligned}$$

这就证明了 $B_n(f, x)$ 下凸. 类似的可讨论上凸情况.

- (4) Step 4 我们证明 $k=0$ 时命题成立. 对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $\delta > 0$, 使得只要 $|x-y| \leq \delta$, 就有

$$|f(x) - f(y)| \leq \varepsilon.$$

注意到

$$\begin{aligned} |B_n(f, x) - f(x)| &= \left| \sum_{k=0}^n \left[f \left(\frac{k}{n} \right) - f(x) \right] C_n^k x^k (1-x)^{n-k} \right| \\ &\leq \sum_{|\frac{k}{n}-x| \leq \delta} \left| \left[f \left(\frac{k}{n} \right) - f(x) \right] C_n^k x^k (1-x)^{n-k} \right| + \sum_{|\frac{k}{n}-x| > \delta} \left| \left[f \left(\frac{k}{n} \right) - f(x) \right] C_n^k x^k (1-x)^{n-k} \right| \\ &\leq \varepsilon \sum_{|\frac{k}{n}-x| \leq \delta} \left| C_n^k x^k (1-x)^{n-k} \right| + 2 \sup |f| \sum_{|\frac{k}{n}-x| > \delta} \left| C_n^k x^k (1-x)^{n-k} \right| \\ &\stackrel{\text{类似 Chebyshev 不等式的证明}}{\leq} \varepsilon \sum_{k=0}^n C_n^k x^k (1-x)^{n-k} + \frac{2 \sup |f|}{\delta^2} \sum_{|\frac{k}{n}-x| > \delta} \left(\frac{k}{n} - x \right)^2 C_n^k x^k (1-x)^{n-k} \\ &\leq \varepsilon + \frac{2 \sup |f|}{\delta^2} \sum_{k=0}^n \left(\frac{k}{n} - x \right)^2 C_n^k x^k (1-x)^{n-k} \\ &\stackrel{\text{引理 5.2}}{=} \varepsilon + \frac{2 \sup |f|}{n \delta^2} x(1-x), \end{aligned}$$

于是从上式立得

$$\sup_{x \in [0, 1]} |B_n(f, x) - f(x)| \leq \varepsilon + \frac{\sup |f|}{2n \delta^2}.$$

令 $n \rightarrow \infty$, 得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in [0, 1]} |B_n(f, x) - f(x)| \leq \varepsilon.$$

再由 ε 的任意性可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in [0, 1]} |B_n(f, x) - f(x)| = 0.$$

故我们得到了 $k = 0$ 时, 式(5.60)成立.

Step 2 (*) 我们定义

$$T_n f(x) = n \left[f\left(\frac{n-1}{n}x + \frac{1}{n}\right) - f\left(\frac{n-1}{n}x\right) \right], n \in \mathbb{N}.$$

$$B'_n(f, x) = B_{n-1}(T_n f, x), \forall n \in \mathbb{N}.$$

归纳证明

$$T_{n-j+1} \cdots T_n f(x) = (n-j+1) \cdots (n-1) n \sum_{k=0}^j (-1)^{k+j} C_j^k f\left(\frac{n-j}{n}x + \frac{k}{n}\right), \forall j \in \mathbb{N}.$$

事实上, 当 $j = 1$, 由(5.59)可知命题显然成立, 假设命题对 $j \in \mathbb{N}$ 成立, 则

$$\begin{aligned} & T_{n-j} \cdots T_n f(x) \\ &= T_{n-j} \left((n-j+1) \cdots (n-1) n \sum_{k=0}^j (-1)^{k+j} C_j^k f\left(\frac{n-j}{n}x + \frac{k}{n}\right) \right) \\ &= \frac{n!}{(n-j)!} \sum_{k=0}^j (-1)^{k+j} C_j^k T_{n-j} \left(f\left(\frac{n-j}{n}x + \frac{k}{n}\right) \right) \\ &= \frac{n!(n-j)}{(n-j)!} \sum_{k=0}^j (-1)^{k+j} C_j^k \left[f\left(\frac{n-j-1}{n}x + \frac{k+1}{n}\right) - f\left(\frac{n-j-1}{n}x + \frac{k}{n}\right) \right] \\ &= \frac{n!(-1)^j \left[f\left(\frac{n-j-1}{n}x + \frac{1}{n}\right) - f\left(\frac{n-j-1}{n}x\right) \right]}{(n-j-1)!} \\ &+ \frac{n!}{(n-j-1)!} \sum_{k=1}^j (-1)^{k+j} C_j^k f\left(\frac{n-j-1}{n}x + \frac{k+1}{n}\right) \\ &- \frac{n!}{(n-j-1)!} \sum_{k=1}^j (-1)^{k-1+j} C_j^{k-1} f\left(\frac{n-j-1}{n}x + \frac{k}{n}\right) \\ &+ \frac{n!}{(n-j-1)!} \sum_{k=1}^j (-1)^{k-1+j} C_j^{k-1} f\left(\frac{n-j-1}{n}x + \frac{k}{n}\right) \\ &- \frac{n!}{(n-j-1)!} \sum_{k=1}^j (-1)^{k+j} C_j^k f\left(\frac{n-j-1}{n}x + \frac{k}{n}\right) \\ &= \frac{n!(-1)^j \left[f\left(\frac{n-j-1}{n}x + \frac{1}{n}\right) - f\left(\frac{n-j-1}{n}x\right) \right]}{(n-j-1)!} \\ &+ \frac{n!}{(n-j-1)!} f\left(\frac{n-j-1}{n}x + \frac{j+1}{n}\right) - \frac{n!}{(n-j-1)!} (-1)^j f\left(\frac{n-j-1}{n}x + \frac{1}{n}\right) \\ &+ \frac{n!}{(n-j-1)!} \sum_{k=1}^j (-1)^{k+1+j} (C_j^{k-1} + C_j^k) f\left(\frac{n-j-1}{n}x + \frac{k}{n}\right) \\ &= \frac{n!}{(n-j-1)!} \sum_{k=0}^{j+1} (-1)^{k+1+j} C_{j+1}^k f\left(\frac{n-j-1}{n}x + \frac{k}{n}\right). \end{aligned}$$

因此我们证明了对 $j+1$, 结论也成立, 因此由数学归纳法, 对所有 $j \in \mathbb{N}$, 命题都成立.

Step 3 (*) 我们证明一个中值定理的结果. 由Hermite 插值定理, 对 $x \in [0, 1]$, 存在 $\theta \in [0, 1]$, 我们有

$$f(x) = \sum_{k=1}^j \prod_{s \neq k} \frac{\left(x - \frac{s+i}{n}\right)}{\left(\frac{k+i}{n} - \frac{s+i}{n}\right)} f\left(\frac{k+i}{n}\right) + \frac{f^{(j)}(\theta)}{j!} \prod_{s=1}^j \left(x - \frac{s+i}{n}\right).$$

特别的存在 $\theta \in [\frac{i}{n}, \frac{i+j}{n}]$, 使得

$$\begin{aligned}
f\left(\frac{i}{n}\right) &= \sum_{k=1}^j \prod_{s \neq k} \frac{\left(\frac{i}{n} - \frac{s+i}{n}\right)}{\left(\frac{k+i}{n} - \frac{s+i}{n}\right)} \cdot f\left(\frac{k+i}{n}\right) + \frac{f^{(j)}(\theta)}{j!} \prod_{s=1}^j \left(\frac{i}{n} - \frac{s+i}{n}\right) \\
&= \sum_{k=1}^j \prod_{s \neq k} \frac{\left(-\frac{s}{n}\right)}{\left(\frac{k-s}{n}\right)} \cdot f\left(\frac{k+i}{n}\right) + \frac{(-1)^j f^{(j)}(\theta)}{n^j} \\
&= \sum_{k=1}^j \prod_{s \neq k} \frac{s}{s-k} \cdot f\left(\frac{k+i}{n}\right) + \frac{(-1)^j f^{(j)}(\theta)}{n^j} \\
&= \sum_{k=1}^j \frac{j!}{k(j-k)!(k-1)!} (-1)^{k-1} f\left(\frac{k+i}{n}\right) + \frac{(-1)^j f^{(j)}(\theta)}{n^j} \\
&= \sum_{k=1}^j (-1)^{k-1} C_j^k f\left(\frac{k+i}{n}\right) + \frac{(-1)^j f^{(j)}(\theta)}{n^j},
\end{aligned}$$

从而

$$\sum_{k=0}^j (-1)^k C_j^k f\left(\frac{k+i}{n}\right) = \frac{(-1)^j f^{(j)}(\theta)}{n^j}.$$

Step 4 (*) 注意到

$$B_n^{(j)}(f, x) = B_{n-j}(T_{n-j+1} \cdots T_{n-1} T_n f, x), 1 \leq j \leq k, n > k.$$

于是运用 **Step 3**, 我们有

$$\begin{aligned}
|B_n^{(j)}(f, x) - f^{(j)}(x)| &\leq |B_{n-j}(f^{(j)}, x) - f^{(j)}(x)| + |B_{n-j}(f^{(j)}, x) - B_{n-j}(T_{n-j+1} \cdots T_{n-1} T_n f, x)| \\
&\leq |B_{n-j}(f^{(j)}, x) - f^{(j)}(x)| + \sum_{i=0}^{n-j} |f^{(j)}\left(\frac{i}{n-j}\right) - T_{n-j+1} \cdots T_{n-1} T_n f\left(\frac{i}{n-j}\right)| C_{n-j}^i x^i (1-x)^{n-j-i} \\
&= |B_{n-j}(f^{(j)}, x) - f^{(j)}(x)| + \sum_{i=0}^{n-j} |f^{(j)}\left(\frac{i}{n-j}\right) - \frac{n!}{(n-j)!} \sum_{k=0}^j (-1)^{k+j} C_j^k f\left(\frac{k+i}{n}\right)| C_{n-j}^i x^i (1-x)^{n-j-i} \\
&= |B_{n-j}(f^{(j)}, x) - f^{(j)}(x)| + \sum_{i=0}^{n-j} |f^{(j)}\left(\frac{i}{n-j}\right) - \frac{n! f^{(j)}(\theta)}{(n-j)! n^j} |C_{n-j}^i x^i (1-x)^{n-j-i} \\
&\leq |B_{n-j}(f^{(j)}, x) - f^{(j)}(x)| + \sum_{i=0}^{n-j} |f^{(j)}\left(\frac{i}{n-j}\right) - f^{(j)}(\theta)| C_{n-j}^i x^i (1-x)^{n-j-i} \\
&\quad + \sum_{i=0}^{n-j} \left|1 - \frac{n!}{(n-j)! n^j}\right| \cdot |f^{(j)}(\theta)| C_{n-j}^i x^i (1-x)^{n-j-i}.
\end{aligned}$$

Step 4 (*) **Step 3** 告诉我们关于 $x \in [0, 1]$, 一致的有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} B_n(f^{(j)}, x) = f^{(j)}(x), j = 0, 1, 2, \dots, k.$$

同时注意到

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{n!}{(n-j)! n^j}\right) = 0,$$

以及

$$\left|\frac{i}{n} - \frac{i}{n-j}\right| = \frac{ji}{n(n-j)} \leq \frac{j}{n}, \left|\frac{i+j}{n} - \frac{i}{n-j}\right| \leq \frac{2j}{n}, \forall n > j.$$

我们同时假设

$$M_j \triangleq \sup_{x \in [0, 1]} |f^{(j)}(x)|, j = 0, 1, 2, \dots, k.$$

并注意到 $f^{(j)}$ 是一致连续的. 现在对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $N \in \mathbb{N}$ 和 $\delta > 0$, 使得

$$\left| B_{n-j}(f^{(j)}, x) - f^{(j)}(x) \right| < \frac{\varepsilon}{3}, \forall x \in [0, 1],$$

$$\left| 1 - \frac{n!}{(n-j)!n^j} \right| < \frac{\varepsilon}{3M_j}, \forall n > N,$$

$$\left| f^{(j)}(x) - f^{(j)}(y) \right| < \frac{\varepsilon}{3}, \forall |x - y| < \delta, x, y \in [0, 1].$$

因此当正整数 $n > \max \left\{ \frac{2j}{\delta}, j, N \right\}$, 利用 **Step 2**, 我们有

$$\left| B_n^{(j)}(f, x) - f^{(j)}(x) \right| < \varepsilon, \forall x \in [a, b],$$

这就完成了证明.

□

命题 5.35

设 $f \in C[0, 1]$ 使得

$$\int_0^1 f(x)x^n dx = 0, \forall n = 0, 1, 2, \dots.$$

证明

$$f(x) = 0, \forall x \in [0, 1].$$

◆

注 $p_n(x)$ 的良定义性可由 **Bernstein 多项式的性质 (4)** 得到. 实际上, 我们这里取的 $p_n(x)$ 就是 g 的 Bernstein 多项式 $B_n(g, x)$.

证明 由条件可知, 对任意实系数多项式 $p(x)$, 都有

$$\int_0^1 f(x)p(x) dx = 0, \forall p(x) \in \mathbb{R}[x].$$

对 $\forall g \in C[0, 1]$, 取 $p_n(x) \in \mathbb{R}[x]$, 使得 $p_n(x) \rightrightarrows g(x)$, 则

$$\int_0^1 f(x)g(x) dx = \int_0^1 \lim_{n \rightarrow \infty} f(x)p_n(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^1 f(x)p_n(x) dx = 0.$$

于是

$$\int_0^1 f(x)g(x) dx = 0, \forall g \in C[0, 1].$$

再取 $g = f$, 则由上式可得

$$\int_0^1 f^2(x) dx = 0 \Rightarrow f(x) \equiv 0.$$

□

例题 5.20 设 $f \in C[0, \pi]$ 满足: 对 $n = 0, 1, 2, \dots$, 有 $\int_0^\pi f(x) \cos nx dx = 0$. 求证: $f(x) \equiv 0$.

证明 由 **定理 A.13** 可知, $\cos^n x$ 可表示为 $1, \cos x, \cos 2x, \dots, \cos nx$ 的线性组合. 于是由条件, 对于 $n = 0, 1, 2, \dots$, 有

$$\int_0^\pi f(x) (\cos^n x - \cos^{n+2} x) dx = 0.$$

作变换 $x = \arccos t$ 得

$$\int_{-1}^1 f(\arccos t) \sqrt{1-t^2} t^n dt = 0, \quad n = 0, 1, \dots.$$

根据 **命题 5.35** 可知 $f(\arccos t) \sqrt{1-t^2} \equiv 0$ ($t \in [-1, 1]$). 因而 $f(x) \equiv 0$.

□

注 这里在积分中考虑 $(\cos^n x - \cos^{n+2} x)$ 是为了防止变换后分母上出现 $\sqrt{1-t^2}$, 从而避免讨论无界函数的积分.

定理 5.24

设 $f(x) \in C^k[a, b]$, 这里 $a < b, a, b \in \mathbb{R}, k \in \mathbb{N}_0$, 那么对任意 $\varepsilon > 0$, 存在多项式 $p(x)$, 使得

$$|f^{(s)}(x) - p^{(s)}(x)| \leq \varepsilon, \forall x \in [a, b], s = 0, 1, 2, \dots, k.$$



注 $q(x)$ 的良定义性可由 $f^{(k)}$ 的连续性和 Bernstein 多项式的性质 (4) 直接得到. 实际上, $q(x) = B(f^{(k)}, x)$.

证明 由带积分型余项的 Taylor 公式可知

$$f(x) = \sum_{j=0}^{k-1} \frac{f^{(j)}(a)}{j!} (x-a)^j + \frac{1}{(k-1)!} \int_a^x (x-t)^{k-1} f^{(k)}(t) dt.$$

对 $\forall \varepsilon > 0$, 取 $q \in \mathbb{R}[x]$, 使得

$$|q(x) - f^{(k)}(x)| \leq \varepsilon, \forall x \in [a, b]. \quad (5.61)$$

设

$$p(x) = \sum_{j=0}^{k-1} \frac{f^{(j)}(a)}{j!} (x-a)^j + \frac{1}{(k-1)!} \int_a^x (x-t)^{k-1} q(t) dt,$$

则对 p 求导可得, 对 $\forall s \in \mathbb{N}$, 我们有

$$p^{(s)}(x) = \sum_{j=0}^{k-s-1} \frac{f^{(j+s)}(a)}{j!} (x-a)^j + \frac{1}{(k-s-1)!} \int_a^x (x-t)^{k-s-1} q(t) dt. \quad (5.62)$$

由带积分型余项的 Taylor 公式可知, 对 $\forall s \in \mathbb{N}$, 我们有

$$f^{(s)}(x) = \sum_{j=0}^{k-s-1} \frac{f^{(j+s)}(a)}{j!} (x-a)^j + \frac{1}{(k-s-1)!} \int_a^x (x-t)^{k-s-1} f^{(k)}(t) dt. \quad (5.63)$$

于是利用(5.61)(5.62)(5.63)式可得, 对 $\forall s \in \mathbb{N}$, 我们有

$$|f^{(s)}(x) - p^{(s)}(x)| = \left| \frac{1}{(k-s-1)!} \int_a^x (x-t)^{k-s-1} [f^{(k)}(t) - q(t)] dt \right| \leq \frac{\varepsilon(b-a)^{k-s}}{(k-s)!}, \forall x \in [a, b].$$

故结论得证. □

例题 5.21 设多项式列 $p_n, n = 1, 2, \dots$ 在 \mathbb{R} 一致收敛到 f , 证明 f 为多项式.

证明 由条件可知, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得

$$|p_m(x) - p_n(x)| \leq 1, \forall m > n \geq N, x \in \mathbb{R}.$$

由于有界的多项式函数一定是常值函数, 因此 $p_m(x) - p_n(x) = C, \forall m > n \geq N, x \in \mathbb{R}$. 其中 C 是一个常数. 故

$$p_n(x) = p_N(x) + c_n, \forall n \geq N, x \in \mathbb{R}. \quad (5.64)$$

其中 $\{c_n\}$ 是一个常数列. 从而任取 $x_0 \in \mathbb{R}$, 结合 $\lim_{n \rightarrow \infty} p_n(x) = f(x)$ 可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = \lim_{n \rightarrow \infty} [p_n(x_0) - p_N(x_0)] = f(x_0) - p_N(x_0).$$

故 $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = c$ 存在. 于是由 x_0 的任意性可得

$$c = \lim_{n \rightarrow \infty} c_n = f(x) - p_N(x), x \in \mathbb{R}.$$

即 $f(x) = p_N(x) + c, \forall x \in \mathbb{R}$. 因此结论得证. 或者对(5.64)式两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 也能得到

$$f(x) = p_N(x) + c, \forall x \in \mathbb{R}. \quad \square$$

5.7.2 可积函数的逼近

定理 5.25 (可积被连续函数逼近)

(1) 设 $f \in R[a, b]$, 则对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $g \in C[a, b]$, 使得

$$\int_a^b |f(x) - g(x)| dx < \varepsilon.$$

(2) 设 $f \in R[a, b]$, 则对任何 $\varepsilon > 0$, 存在多项式 $P(x)$, 使得

$$\int_a^b |f(x) - P(x)| dx < \varepsilon.$$

(3) 设 $f \in R[a, b]$, 则对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $g \in C_c(a, b)$, 使得

$$\int_a^b |f(x) - g(x)| dx < \varepsilon.$$

这里 $g \in C_c(a, b)$ 表示 g 是有含于 (a, b) 的紧支撑的连续函数.

(4) 设 $p \geq 1$ 且反常积分 $\int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|^p dx < \infty$, 则对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $g \in C_c(\mathbb{R})$, 使得

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(x) - g(x)|^p dx < \varepsilon.$$

这里 $g \in C_c(\mathbb{R})$ 表示 g 是有含于 \mathbb{R} 的紧支撑的连续函数.



笔记 证明的想法即分段线性连接. 紧支撑逼近也叫紧化方法. 第三问对勒贝格积分也是对的.

证明

(1) 对任何 $\varepsilon > 0$, 因为 $f \in R[a, b]$, 所以存在一个划分 $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ 使得

$$\sum_{i=1}^n w_i(f)(x_i - x_{i-1}) \leq \varepsilon, w_i(f) \text{ 表示 } f \text{ 在 } [x_{i-1}, x_i], i = 1, 2, \dots, n \text{ 的振幅.}$$

构造 $[a, b]$ 上的连续函数 (分段线性函数) g 使得它的图像就是连接各点 $(x_{i-1}, f(x_{i-1}))$ 的折线, 即

$$g(x) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}}(x - x_{i-1}) + f(x_{i-1}) = \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}f(x_i) + \frac{x_i - x}{x_i - x_{i-1}}f(x_{i-1}), \quad x \in [x_{i-1}, x_i],$$

不难发现 $\sup_{x \in [a, b]} |g| \leq \sup_{x \in [a, b]} |f|$, 则

$$\begin{aligned} \int_a^b |f(x) - g(x)| dx &= \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} |f(x) - g(x)| dx \\ &\leq \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} |f(x) - f(x_{i-1})| dx + \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} |g(x) - f(x_{i-1})| dx \\ &\leq \sum_{i=1}^n w_i(f)(x_i - x_{i-1}) + \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} \left| \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}}(x - x_{i-1}) \right| dx \\ &\leq \sum_{i=1}^n w_i(f)(x_i - x_{i-1}) + \sum_{i=1}^n w_i(f) \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} dx \\ &= \sum_{i=1}^n w_i(f)(x_i - x_{i-1}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_i(f)(x_i - x_{i-1}) \leq \frac{3}{2} \varepsilon, \end{aligned}$$

这就完成了证明.

(2) 根据第 1 问可知, 存在 $g \in C[a, b]$, 使得

$$\int_a^b |f(x) - g(x)| dx < \frac{\varepsilon}{2}.$$

由定理 5.24 可知, 存在多项式 $P(x)$ 使得

$$\max_{a \leq x \leq b} |g(x) - P(x)| < \frac{\varepsilon}{2(b - a)}.$$

由此可得

$$\begin{aligned}\int_a^b |f(x) - P(x)| dx &\leq \int_a^b |f(x) - g(x)| dx + \int_a^b |g(x) - P(x)| dx \\ &\leq \frac{\varepsilon}{2} + \int_a^b \frac{\varepsilon}{2(b-a)} dx = \varepsilon.\end{aligned}$$

(3) 对任何 $\varepsilon \in (0, 1)$, 由第 1 问可知, 存在 $g \in C[a, b]$ 使得

$$\int_a^b |f(x) - g(x)| dx < \frac{\varepsilon}{4}.$$

取充分小的 $\delta > 0$, 使得

$$\int_a^{a+\delta} |f(x)| dx < \frac{\varepsilon}{4}, \int_{b-\delta}^b |f(x)| dx < \frac{\varepsilon}{4}, \int_{a+\delta}^{a+2\delta} |g(x)| dx < \frac{\varepsilon}{16}, \int_{b-2\delta}^{b-\delta} |g(x)| dx < \frac{\varepsilon}{16}.$$

再取 $h \in C^\infty(\mathbb{R})$ 使得

- (a): $0 \leq h(x) \leq 1, \forall x \in \mathbb{R}$;
- (b): $h(x) = 0, \forall x \in (-\infty, a+\delta) \cup (b-\delta, +\infty)$;
- (c): $h(x) = 1, \forall x \in [a+2\delta, b-2\delta]$.

于是取 $g_1(x) = h(x)g(x) \in C_c(a, b)$, 由第 1 问可知 $\sup_{x \in [a, b]} |g| \leq \sup_{x \in [a, b]} |f|$, 从而 $\sup_{x \in [a, b]} |g_1| \leq \sup_{x \in [a, b]} |f|$. 从而

$$\begin{aligned}\int_a^b |f(x) - g_1(x)| dx &= \int_a^b |f(x) - g(x)h(x)| dx \\ &\leq \int_a^{a+\delta} |f(x)| dx + \int_{b-\delta}^b |f(x)| dx + \int_{a+\delta}^{b-\delta} |f(x) - h(x)g(x)| dx \\ &\leq \int_a^{a+\delta} |f(x)| dx + \int_{b-\delta}^b |f(x)| dx + \int_{a+\delta}^{a+2\delta} |f(x) - g(x)| dx + \int_{a+\delta}^{b-\delta} |g(x) - h(x)g(x)| dx \\ &\leq \int_a^{a+\delta} |f(x)| dx + \int_{b-\delta}^b |f(x)| dx + \int_a^b |f(x) - g(x)| dx + \int_{a+\delta}^{b-\delta} |g(x) - h(x)g(x)| dx \\ &\leq \frac{3\varepsilon}{4} + \int_{a+\delta}^{a+2\delta} |g(x) - h(x)g(x)| dx + \int_{b-2\delta}^{b-\delta} |g(x) - h(x)g(x)| dx \\ &\leq \frac{3\varepsilon}{4} + 2 \int_{a+\delta}^{a+2\delta} |g(x)| dx + 2 \int_{b-2\delta}^{b-\delta} |g(x)| dx \\ &\leq \varepsilon.\end{aligned}$$

这就完成了证明.

(4) 证明的想法和第 3 问类似. 由条件可知, 对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $X > 0$, 使得

$$\int_{|x| \geq X} |f(x)|^p dx = \int_X^\infty |f(x)|^p dx + \int_{-\infty}^{-X} |f(x)|^p dx < \varepsilon.$$

因为 f 在 $[-X, X]$ 黎曼可积, 所以由第 2 问, 存在 $g \in C_c(-X, X)$ 使得

$$\int_{-X}^X |f(x) - g(x)| dx < \frac{\varepsilon}{1 + \sup_{[-X, X]} |2f|^{p-1}}.$$

从前两问的构造可以看到

$$\sup_{[-X, X]} |g| \leq \sup_{[-X, X]} |f|,$$

于是

$$\begin{aligned}\int_{-\infty}^\infty |f(x) - g(x)|^p dx &= \int_{|x| \geq X} |f(x)|^p dx + \int_{-X}^X |f(x) - g(x)|^p dx \\ &\leq \varepsilon + \sup_{[-X, X]} |f - g|^{p-1} \int_{-X}^X |f(x) - g(x)| dx \\ &\leq \varepsilon + \sup_{[-X, X]} (2|f|)^{p-1} \int_{-X}^X |f(x) - g(x)| dx\end{aligned}$$

$$< \varepsilon + \varepsilon,$$

这就完成了证明. □

例题 5.22 设 f 在区间 $[0, 1]$ 上 Riemann 可积, $0 \leq f \leq 1$. 求证: 对任何 $\varepsilon > 0$, 存在只取值为 0 和 1 的分段 (段数有限) 常值函数 $g(x)$, 使得 $\forall [\alpha, \beta] \subseteq [0, 1]$,

$$\left| \int_{\alpha}^{\beta} (f(x) - g(x)) dx \right| < \varepsilon.$$

证明 对 $\forall \varepsilon > 0$, 由可积函数可被分段线性函数逼近知, 存在一个划分

$$0 = x_0 < x_1 < \cdots < x_n = 1, \quad \Delta x_i = x_i - x_{i-1} < \frac{\varepsilon}{8}, \quad (5.65)$$

使得

$$\int_0^1 |f(x) - h(x)| dx < \frac{\varepsilon}{2}. \quad (5.66)$$

其中 $h(x)$ 为分段线性函数, 定义为

$$h(x) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} (x - x_{i-1}) + f(x_{i-1}), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

记

$$x'_i = x_i - \frac{f(x_i) + f(x_{i-1})}{2} (x_i - x_{i-1}), \quad (5.67)$$

并取

$$g(x) \triangleq \begin{cases} 0, & x \in [x_{i-1}, x'_i], \\ 1, & x \in [x'_i, x_i]. \end{cases}$$

显然 $g \in R[0, 1]$, 从而对 $\forall [\alpha, \beta] \subseteq [0, 1]$, 都存在 $n_1, n_2 \in [1, n-1] \cap \mathbb{N}$, 使得

$$\alpha \in [x_{n_1-1}, x_{n_1}], \quad \beta \in [x_{n_2}, x_{n_2+1}].$$

于是利用 (5.65)(5.67) 式可得

$$\begin{aligned} \left| \int_{\alpha}^{\beta} [h(x) - g(x)] dx \right| &= \left| \int_{\alpha}^{\beta} h(x) dx - \int_{\alpha}^{\beta} g(x) dx \right| \\ &= \left| \int_{\alpha}^{x_{n_1}} h(x) dx - \int_{\alpha}^{x_{n_1}} g(x) dx + \int_{x_{n_2}}^{\beta} h(x) dx - \int_{x_{n_2}}^{\beta} g(x) dx + \sum_{i=n_1}^{n_2} \left[\int_{x_{i-1}}^{x_i} h(x) dx - \int_{x_{i-1}}^{x_i} g(x) dx \right] \right| \\ &\leq \left| 2(x_{n_1} - \alpha) + 2(\beta - x_{n_2}) + \sum_{i=1}^n \left[\frac{f(x_i) + f(x_{i-1})}{2} (x_i - x_{i-1}) - (x_i - x'_i) \right] \right| \\ &\leq 2(x_{n_1} - x_{n_1-1}) + 2(x_{n_2+1} - x_{n_2}) < \frac{\varepsilon}{2}. \end{aligned}$$

故再由 (5.66) 式可得

$$\left| \int_{\alpha}^{\beta} [f(x) - g(x)] dx \right| \leq \int_0^1 |f(x) - h(x)| dx + \left| \int_{\alpha}^{\beta} [h(x) - g(x)] dx \right| < \varepsilon.$$

□

例题 5.23 设 $f(x)$ 是 $[0, 1]$ 上的凹函数, 且 $f(1) = 1$. 求证:

(1)

$$\int_0^1 f^2(x) dx \geq \frac{1}{4}, \quad (5.68)$$

(2)

$$\int_0^1 f^2(x) dx \geq \frac{2}{3} \int_0^1 f(x) dx. \quad (5.69)$$

注 若取 $f(x) = x$, 则式 (5.69) 成为等式, 因而 (5.69) 式中的系数 $\frac{2}{3}$ 是最佳的.

注 (5.70) 式实际上就是凹函数的割线放缩, 用凹函数的定义表示了而已.

笔记 构造 f_δ 的想法就是将端点与其邻域内一点连接 (线性连接既凹又凸从而保持凸性), 其余点的值不变, 使得 $f_\delta \in C[0, 1]$. 但后续分部积分需要 f_δ 二阶连续可微, 于是再用 Bernstein 多项式 $B(f_\delta, n)$ 逼近 f_δ , 从而 $B(f_\delta, n) \rightrightarrows f_\delta$, 并且 Bernstein 多项式 $B(f_\delta, n)$ 任意阶连续可微, 端点值不变. 但是注意此时不一定有 $B^k(f_\delta, n) \rightrightarrows f_\delta^k$, 因为 f_δ 不可导!

证明 (1) 由定理 5.11 知, 凹函数在定义域内部是连续的, 且在两个端点的单边极限存在, 修改 f 在 0 的值为 $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x)$, 这不改变积分的值, 此时 f 在 0 处连续, 故可不妨设 $f \in C[0, 1]$. 对于给定的 $\delta \in (0, 1)$ 以及 $x \in (\delta, 1)$, 有

$$x = \frac{1-x}{1-\delta}\delta + \left(1 - \frac{1-x}{1-\delta}\right) \cdot 1.$$

因为 f 是凹函数, 有

$$f(x) \geq \frac{1-x}{1-\delta}f(\delta) + \left(1 - \frac{1-x}{1-\delta}\right)f(1). \quad (5.70)$$

由上式和条件 $f(1) = 1$, 得 $\lim_{x \rightarrow 1^-} f(x) \geq 1$. 若 f 在 1 处不连续, 则 $\lim_{x \rightarrow 1^-} f(x) > 1$. 可取 δ 充分靠近 1, 使得在 $(\delta, 1)$ 上 $f(x) > 1$. 令

$$f_\delta(x) = \begin{cases} f(x), & 0 \leq x \leq \delta, \\ \frac{x-\delta}{1-\delta} \cdot 1 + \frac{1-x}{1-\delta}f(\delta), & \delta < x \leq 1, \end{cases}$$

则 f_δ 是 $[0, 1]$ 上连续的凹函数且 $f_\delta(1) = 1$, $f_\delta(x) \leq f(x)$. 由此可知, 只需对连续的凹函数证明式 (5.68). 又由于连续函数的 Bernstein 多项式在两个端点插值、保持凸性且一致收敛到该连续函数, 只需对有二阶连续导数的凹函数来证明式 (5.68). 因此, 不妨设 $f \in C^2[0, 1]$.

解法一: 设 a, b 是两个待定常数, 有

$$\begin{aligned} 0 &\leq \int_0^1 (f(x) - ax - b)^2 dx = \int_0^1 f^2(x) dx - 2 \int_0^1 (ax + b)f(x) dx + \int_0^1 (ax + b)^2 dx \\ &= \int_0^1 f^2(x) dx - 2 \int_0^1 (ax + b)f(x) dx + \frac{a^2}{2} + ab + b^2, \end{aligned} \quad (5.71)$$

$$\begin{aligned} \int_0^1 (ax + b)f(x) dx &= \left[\left(\frac{1}{2}ax^2 + bx \right) f(x) \right]_0^1 - \int_0^1 \left(\frac{1}{2}ax^2 + bx \right) f'(x) dx = \frac{1}{2}a + b - \int_0^1 \left(\frac{1}{2}ax^2 + bx \right) f'(x) dx \\ &= \frac{1}{2}a + b - \left[\left(\frac{ax^3}{6} + \frac{bx^2}{2} \right) f'(x) \right]_0^1 + \int_0^1 \left(\frac{ax^3}{6} + \frac{bx^2}{2} \right) f''(x) dx. \end{aligned}$$

取 $a = \frac{3}{2}$, $b = -\frac{1}{2}$, 则有

$$\int_0^1 \left(\frac{3}{2}x - \frac{1}{2} \right) f(x) dx = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \int_0^1 (x-1)x^2 f''(x) dx.$$

由于 f 是凹函数, 有 $f''(x) \leq 0$. 因而

$$\int_0^1 \left(\frac{3}{2}x - \frac{1}{2} \right) f(x) dx \geq \frac{1}{4}.$$

将此代入式 (5.71), 可得式 (5.68).

解法二: 设 a, b 是两个待定常数, 由 Cauchy 不等式可得

$$\begin{aligned} \int_0^1 (ax + b)^2 dx \int_0^1 f^2(x) dx &\geq \left(\int_0^1 (ax + b)f(x) dx \right)^2 \\ \iff \left(\frac{a}{2} + ab + b^2 \right) \int_0^1 f^2(x) dx &\geq \left(\int_0^1 (ax + b)f(x) dx \right)^2. \end{aligned} \quad (5.72)$$

利用分部积分可得

$$\int_0^1 (ax + b)f(x) dx = \frac{a}{2} + b - \int_0^1 \left(\frac{ax^2}{2} + bx \right) f'(x) dx$$

$$= \frac{a}{2} + b - \left(\frac{a}{6} + \frac{b}{2} \right) f'(1) + \frac{1}{6} \int_0^1 x^2 (ax + 3b) f''(x) dx.$$

由 $\begin{cases} \frac{a}{6} + \frac{b}{2} = 0 \\ \frac{a}{2} + b = \frac{1}{4} \end{cases}$ 解得 $a = \frac{3}{2}$, $b = -\frac{1}{2}$. 于是取 $a = \frac{3}{2}$, $b = -\frac{1}{2}$, 代入上式得

$$\int_0^1 (ax + b) f(x) dx = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \int_0^1 x^2 (x - 1) f''(x) dx.$$

由 f 是 $[0, 1]$ 上的凹函数可知, $f''(x) \leq 0$. 从而

$$\int_0^1 (ax + b) f(x) dx = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \int_0^1 x^2 (x - 1) f''(x) dx \geq \frac{1}{4}.$$

再代入(5.72)即得

$$\frac{1}{4} \int_0^1 f^2(x) dx \geq \left(\frac{1}{4} \right)^2 \Rightarrow \int_0^1 f^2(x) dx \geq \frac{1}{4}.$$

(2) 设 $c \in (0, 1)$ 是待定系数, 则 $g(x) = \frac{f(x) - c}{1 - c}$ 仍是 $[0, 1]$ 上的凹函数且 $g(1) = 1$. 由式(5.68)有

$$\int_0^1 g^2(x) dx \geq \frac{1}{4},$$

即

$$\int_0^1 f^2(x) dx - 2c \int_0^1 f(x) dx + c^2 \geq \frac{1}{4}(1 - c)^2.$$

取 $c = \frac{1}{3}$, 则 $c^2 = \frac{1}{4}(1 - c)^2$. 于是

$$\int_0^1 f^2(x) dx \geq \frac{2}{3} \int_0^1 f(x) dx.$$

□

定义 5.6 (Green 函数)

定义在 $[a, b] \times [a, b]$ 上的二元函数

$$k(x, y) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}(y-b), & b \geq y \geq x \geq a, \\ \frac{b-x}{b-a}(a-y), & b \geq x \geq y \geq a. \end{cases}$$

称为 Green 函数.

♣

定理 5.26 (Green 函数的性质)

设 $k(x, y)$ 为定义在 $[a, b] \times [a, b]$ 上的 Green 函数.

(1) $|k(x, y)| \leq |k(x, x)|$.

(2) 设 $f \in C^2[a, b]$, 若还有 $f(a) = f(b) = 0$, 则有

$$f(x) = \int_a^b f''(y) k(x, y) dy.$$

(3) 若 $a = 0, b = 1$, 则对 $\forall p \in \mathbb{Z}$, 都有

$$\int_0^1 k^p(x, y) dx = \frac{y^p (y-1)^p}{p+1}, \quad \int_0^1 k^p(x, y) dy = \frac{x^p (x-1)^p}{p+1}.$$

♥

笔记 分部积分计算验证即可.

证明

□

定理 5.27 (Favard 不等式)

若 f 是区间 $[0, 1]$ 上的非负凹 (上凸) 函数, 则有对 $p \geq 1$,

$$\int_0^1 f^p(x) dx \leq \frac{2^p}{p+1} \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^p.$$



注 不妨设的原因: 由定理 5.11 知, 凹函数在内点是连续的, 且在两个端点的单边极限存在, 修改 f 在 0 的值为 $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x)$, 在 1 的值为 $\lim_{x \rightarrow 1^-} f(x)$ 这不改变积分的值, 此时 f 在 $0, 1$ 处连续, 故可不妨设 $f \in C[0, 1]$. 选充分小的 $\delta > 0$, 并修改 f 在 $[0, \delta]$ 和 $[1 - \delta, 1]$ 上的值, 使得修改后的函数是在 $[0, 1]$ 的连续凹函数, 且在 $0, 1$ 取零值:

$$f_\delta(x) = \begin{cases} \frac{f(\delta)}{\delta}x, & x \in [0, \delta], \\ f(x), & x \in [\delta, 1 - \delta], \\ \frac{f(1 - \delta)}{\delta}(1 - x), & x \in [1 - \delta, 1]. \end{cases}$$

易知

$$\int_0^1 f_\delta(x) dx = \frac{\delta[f(\delta) + f(1 - \delta)]}{2} + \int_\delta^{1-\delta} f(x) dx.$$

因而

$$\lim_{\delta \rightarrow 0^+} \int_0^1 f_\delta(x) dx = \int_0^1 f(x) dx.$$

因此只需对 $[0, 1]$ 上满足 $f(0) = f(1) = 0$ 的连续凹函数证明. 又因为 f 的 Bernstein 多项式

$$B_n(f; x) = \sum_{k=0}^n f\left(\frac{k}{n}\right) \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k}, \quad n = 1, 2, \dots$$

在 $[0, 1]$ 上一致收敛于 f , 且 $B_n(f; x)$ 仍是在两个端点取零值的凹函数. 因此只需对有二阶连续导数的函数证明.

证明 不妨设 $f \in C^2[0, 1]$ 且 $f(0) = f(1) = 0$. 由 Green 函数的性质可知

$$f(x) = \int_0^1 k(x, t) f''(t) dt,$$

其中二元函数 $k(x, t)$ 定义为

$$k(x, t) = \begin{cases} t(x-1), & 0 \leq t \leq x \leq 1 \\ x(t-1), & 0 \leq x \leq t \leq 1. \end{cases}$$

由 f 是凹函数可知 $f'' \leq 0$. 于是由 Minkowski 不等式可得

$$\begin{aligned} \left(\int_0^1 f^p(x) dx \right)^{\frac{1}{p}} &= \left(\int_0^1 \left(\int_0^1 k(x, t) f''(t) dt \right)^p dx \right)^{\frac{1}{p}} \leq \int_0^1 \left(\int_0^1 k^p(x, t) (f''(t))^p dt \right)^{\frac{1}{p}} dx \\ &\stackrel{\text{Green 函数的性质}}{=} \frac{1}{(p+1)^{\frac{1}{p}}} \int_0^1 |t(t-1)| |f''(t)| dt = \frac{1}{(p+1)^{\frac{1}{p}}} \int_0^1 t(t-1) f''(t) dt \\ &\stackrel{\text{分部积分}}{=} -\frac{2}{(p+1)^{\frac{1}{p}}} \int_0^1 t f'(t) dt \stackrel{\text{分部积分}}{=} \frac{2}{(p+1)^{\frac{1}{p}}} \int_0^1 f(t) dt. \end{aligned}$$

因此

$$\int_0^1 f^p(x) dx \leq \frac{2^p}{p+1} \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^p.$$

**引理 5.3**

证明: 若 $A, B, C \in \mathbb{R}$, 则存在 $C_p > 0$, 使得

$$|A + B + C|^p \leq C_p (|A|^p + |B|^p + |C|^p).$$



笔记 利用齐次化方法证明齐次不等式的应用.

证明 令

$$S \triangleq \{(A, B, C) \mid |A|^p + |B|^p + |C|^p = 1\},$$

则 S 是 \mathbb{R}^3 上的有界闭集, 从而 S 是紧集. 于是 $|A + B + C|^p$ 可以看作紧集 S 上关于 (A, B, C) 的连续函数, 故一定存在 $C_p > 0$, 使得

$$|A + B + C|^p \leq C_p, \forall (A, B, C) \in S. \quad (5.73)$$

对 $\forall (A, B, C) \in \mathbb{R}^3$, 固定 A, B, C , 不妨设 A, B, C 不全为零, 否则不等式显然成立. 令

$$L = \frac{1}{\sqrt[p]{|A|^p + |B|^p + |C|^p}},$$

考虑 (LA, LB, LC) , 则此时

$$|LA|^p + |LB|^p + |LC|^p = 1.$$

因此 $(LA, LB, LC) \in S$. 从而由(5.73)式可知

$$|LA + LB + LC|^p \leq C_p.$$

于是

$$|A + B + C|^p \leq \frac{C_p}{L^p} = C_p(|A|^p + |B|^p + |C|^p).$$

故结论得证. □

定理 5.28 (积分的绝对连续性)

设 $p \geq 1$ 且反常积分 $\int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|^p dx < \infty$, 证明

$$\lim_{h \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{\infty} |f(x+h) - f(x)|^p dx = 0. \quad (5.74)$$

笔记 本结果对勒贝格积分也是正确的, 但我们证明只对黎曼积分进行.

证明 Step 1: 当 $f \in C_c(\mathbb{R})$ 时, 则存在 $X > 0$, 使得

$$f(x) = 0, \forall |x| \geq X.$$

从而当 $h \in (-1, 1)$ 时, 就有

$$f(x) = 0, \forall |x| \geq X + 1.$$

又因为 $f \in C[-X-1, X+1]$, 所以由 Cantor 定理可知 f 在 $[-X-1, X+1]$ 上一致连续. 于是

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x+h) - f(x)|^p dx &= \lim_{h \rightarrow 0} \int_{|x| \leq X+1} |f(x+h) - f(x)|^p dx \\ &= \int_{|x| \leq X+1} \lim_{h \rightarrow 0} |f(x+h) - f(x)|^p dx = 0. \end{aligned}$$

Step 2: 对一般的 f , 满足 $\int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|^p dx < \infty$. 对 $\forall \varepsilon > 0$, 由定理 5.25(3) 可知, 存在 $g \in C_c(\mathbb{R})$, 使得

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x) - g(x)|^p dx < \varepsilon.$$

从而

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x+h) - f(x)|^p dx \leq \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x+h) - g(x+h) + g(x+h) - g(x) + g(x) - f(x)|^p dx$$

利用齐次化方法得到引理 5.3, 从而可知若 $A, B, C \in \mathbb{R}$, 则存在 $C_p > 0$, 使得

$$|A + B + C|^p \leq C_p(|A|^p + |B|^p + |C|^p).$$

故

$$\begin{aligned}
\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x+h) - f(x)|^p dx &\leq C_p \left(\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x+h) - g(x+h)|^p dx + \int_{-\infty}^{+\infty} |g(x+h) - g(x)|^p dx + \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x) - g(x)|^p dx \right) \\
&\stackrel{y=x+h}{=} 2C_p \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x) - g(x)|^p dx + C_p \int_{-\infty}^{+\infty} |g(x+h) - g(x)|^p dx \\
&\leq 2\varepsilon C_p + C_p \int_{-\infty}^{+\infty} |g(x+h) - g(x)|^p dx.
\end{aligned} \tag{5.75}$$

由 $g \in C_c(\mathbb{R})$, 结合 Step 4 可知

$$\lim_{h \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{+\infty} |g(x+h) - g(x)|^p dx = 0. \tag{5.76}$$

于是由(5.75)(5.76) 式可得

$$\overline{\lim}_{h \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x+h) - f(x)|^p dx \leq 2\varepsilon C_p.$$

再由 ε 的任意性得证. □

5.8 微分不等式问题

5.8.1 一阶/二阶构造类

命题 5.36 (Gronwall 不等式)

设 $\alpha, \beta, \mu \in C[a, b]$ 且 β 非负, 若还有

$$\mu(t) \leq \alpha(t) + \int_a^t \beta(s)\mu(s)ds, \forall t \in [a, b]. \tag{5.77}$$

证明:

$$\mu(t) \leq \alpha(t) + \int_a^t \beta(s)\alpha(s)e^{\int_s^t \beta(u)du}ds, \forall t \in [a, b].$$

若还有 α 递增, 我们有

$$\mu(t) \leq \alpha(t)e^{\int_a^t \beta(s)ds}, \forall t \in [a, b].$$

 **笔记** 解微分方程即得构造函数. 参考单中值点问题. 考虑 $F(t) = \int_a^t \beta(s)\mu(s)ds$, 则

$$F'(t) = \beta(t)\mu(t) \leq \beta(t)\alpha(t) + \beta(t)F(t).$$

于是考虑微分方程

$$y' = \beta(t)\alpha(t) + \beta(t)y \Rightarrow y = ce^{\int_a^t \beta(s)ds} + \int_a^t \beta(s)\alpha(s)e^{\int_s^t \beta(u)du}ds.$$

故得到构造函数

$$c(t) = \frac{F(t) - \int_a^t \beta(s)\alpha(s)e^{\int_s^t \beta(u)du}ds}{e^{\int_a^t \beta(s)ds}} = F(t)e^{-\int_a^t \beta(s)ds} - \int_a^t \beta(s)\alpha(s)e^{\int_s^a \beta(u)du}ds, t \in [a, b].$$

证明 令

$$c(t) = F(t)e^{-\int_a^t \beta(s)ds} - \int_a^t \beta(s)\alpha(s)e^{\int_s^a \beta(u)du}ds, t \in [a, b], \tag{5.78}$$

这里 $F(t) = \int_a^t \beta(s)\mu(s)ds$. 由不等式(5.77)知

$$F'(t) \leq \alpha(t)\beta(t) + F(t)\beta(t), \forall t \in [a, b]. \tag{5.79}$$

于是由(5.78)和(5.79)可知

$$c'(t) = [F'(t) - \alpha(t)\beta(t) - \beta(t)F(t)]e^{\int_a^t \beta(s)ds} \leq 0,$$

因此 $c(t)$ 在 $[a, b]$ 上单调递减, 从而

$$c(t) \leq c(a) = 0,$$

这就得到了

$$F(t)e^{-\int_a^t \beta(s)ds} \leq \int_a^t \beta(s)\alpha(s)e^{\int_s^a \beta(u)du}ds.$$

再用一次不等式(5.77), 即得

$$\mu(t) \leq \alpha(t) + F(t) \leq \alpha(t) + \int_a^t \beta(s)\alpha(s)e^{\int_s^t \beta(u)du}ds, \forall t \in [a, b].$$

特别的, 当 α 递增, 对 $\forall t \in [a, b]$, 固定 t , 记 $G(s) = \int_s^t \beta(u)du$, 我们有不等式

$$\begin{aligned} \mu(t) &\leq \alpha(t) + \alpha(t) \int_a^t \beta(s)e^{\int_s^t \beta(u)du}ds = \alpha(t) + \alpha(t) \int_a^t -G'(s)e^{G(s)}ds \\ &= \alpha(t) - \alpha(t) \int_a^t e^{G(s)}dG(s) = \alpha(t) + \alpha(t) [e^{G(a)} - 1] = \alpha(t)e^{\int_a^t \beta(s)ds}. \end{aligned}$$

□

例题 5.24 设

$$E \triangleq \left\{ u \in C[0, 1] : u^2(t) \leq 1 + 4 \int_0^t s|u(s)| ds, \forall t \in [0, 1] \right\},$$

计算

$$\max_{u \in E} \int_0^1 [u^2(s) - u(s)] ds.$$



笔记 $g(x)$ 的构造思路: 解微分方程常数变易法. 具体如下

$$F'(x) \leq 4x\sqrt{F(x)} \implies \frac{F'(x)}{2\sqrt{F(x)}} \leq 2x,$$

两边同时积分得

$$\sqrt{F(x)} \leq x^2 + C \implies C \geq \sqrt{F(x)} - x^2.$$

故取 $g(x) \triangleq \sqrt{F(x)} - x^2$.

证明 记 $F(x) = 1 + 4 \int_0^x s|u(s)| ds$, 则

$$F'(x) = 4x|u(x)| \implies |u(x)| = \frac{F'(x)}{4x}.$$

由条件可得, 当 $u(x) \in E$ 时, 对 $\forall x \in [0, 1]$, 有

$$u^2(x) \leq F(x) \iff |u(x)| \leq \sqrt{F(x)} \iff \frac{F'(x)}{4x} \leq \sqrt{F(x)} \iff F'(x) \leq 4x\sqrt{F(x)}.$$

令 $g(x) \triangleq \sqrt{F(x)} - x^2$, 则

$$g'(x) = \frac{F'(x) - 4x\sqrt{F(x)}}{2\sqrt{F(x)}} \leq 0, \quad \forall x \in [0, 1].$$

故对 $\forall x \in [0, 1]$, 有

$$g(x) \leq g(0) = 1 \implies \sqrt{F(x)} \leq 1 + x^2.$$

因此利用 $|u(x)| \leq \sqrt{F(x)}$ 和上式可得

$$\begin{aligned} \int_0^1 [u^2(x) - u(x)] dx &\leq \int_0^1 u(x) [u(x) - 1] dx \leq \int_0^1 |u(x)| (|u(x)| + 1) dx \\ &\leq \int_0^1 \sqrt{F(x)} (\sqrt{F(x)} + 1) dx \leq \int_0^1 (1 + x^2) (2 + x^2) dx = \frac{16}{5}. \end{aligned}$$

当且仅当 $u(x) = -1 - x^2$ 等号成立. 故

$$\max_{u \in E} \int_0^1 [u^2(x) - u(x)] dx = \frac{16}{5}.$$

□

例题 5.25 设 f 在 $[0, +\infty)$ 二阶可微且

$$f(0), f'(0) \geq 0, f''(x) \geq f(x), \forall x \geq 0. \quad (5.80)$$

证明:

$$f(x) \geq f(0) + f'(0)x, \forall x \geq 0. \quad (5.81)$$

 **笔记** 通过 $f'' - f' = f - f'$ 视为一阶构造类来构造函数. (也可以尝试考虑 $f''f' = ff'$, 但是这样得到的构造函数处理本题可能不太方便) 注意双曲三角函数和三角函数有着类似的不等式关系.

证明 令 $h(x) = [f'(x) - f(x)]e^x$, 由(5.80)知

$$h'(x) = (f''(x) - f'(x) + f'(x) - f(x))e^x = (f''(x) - f(x))e^x \geq 0.$$

故

$$h(x) \geq h(0) = f'(0) - f(0) \Rightarrow [f'(x) - f(x)]e^x \geq f'(0) - f(0) = h(0).$$

继视为一阶构造类可得

$$c(x) = \frac{f(x) + \frac{1}{2}e^{-x}h(0)}{e^x}, c'(x) = \frac{[f'(x) - f(x)]e^x - h(0)}{e^{3x}} \geq 0.$$

于是

$$\frac{f(x) + \frac{1}{2}e^{-x}h(0)}{e^x} \geq f(0) + \frac{1}{2}h(0) = \frac{f'(0) + f(0)}{2}.$$

继续利用(5.80)即得

$$f(x) \geq \frac{e^x + e^{-x}}{2}f(0) + \frac{e^x - e^{-x}}{2}f'(0) \geq f(0) + f'(0)x,$$

这里

$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \geq 1, \sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \geq x.$$

可以分别利用均值不等式和求导进行证明.

□

例题 5.26 设 $f \in C^1[0, +\infty) \cap D^2(0, +\infty)$ 且满足

$$f''(x) - 5f'(x) + 6f(x) \geq 0, f(0) = 1, f'(0) = 0. \quad (5.82)$$

证明:

$$f(x) \geq 3e^{2x} - 2e^{3x}, \forall x \geq 0. \quad (5.83)$$

 **笔记** 显然如果把式(5.82)得不等号改为等号, 则微分方程的解为 $3e^{2x} - 2e^{3x}$. 现在对于不等号, 自然应该期望有不等式(5.83)成立. 我们一阶一阶的视为一阶微分不等式来证明即可. 注意到 2,3 是微分方程的特征值根来改写命题. 本结果可以视为微分方程比较定理.

证明 把不等式(5.82)改写为

$$f''(x) - 2f'(x) \geq 3(f'(x) - 2f(x)).$$

考虑 $g_1(x) = f'(x) - 2f(x)$, 则上式可化为

$$g_1'(x) \geq 3g_1(x).$$

视为一阶构造类来构造函数, 解得构造函数为 $g_2(x) = \frac{g_1(x)}{e^{3x}}$. 于是有

$$g_2'(x) \geq 0 \Rightarrow g_2(x) \geq g_2(0) = -2 \Rightarrow f'(x) - 2f(x) \geq -2e^{3x}.$$

进一步视为一阶构造类来构造函数, 解得构造函数:

$$g_3(x) = \frac{f(x)}{e^{2x}} + 2e^x, g'_3(x) = \frac{f'(x) - 2f(x) + 2e^{3x}}{e^{2x}} \geq 0,$$

于是

$$g_3(x) \geq g_3(0) = 3 \Rightarrow f(x) \geq 3e^{2x} - 2e^{3x}.$$

我们完成了证明. □

例题 5.27 设 f 在 \mathbb{R} 上二阶可导且满足等式

$$f(x) + f''(x) = -xg(x)f'(x), g(x) \geq 0. \quad (5.84)$$

证明 f 在 \mathbb{R} 上有界.

笔记 $f + f''$ 的出现暗示我们构造 $|f(x)|^2 + |f'(x)|^2$, 这已是频繁出现的事实. 因为等式右边有一个未知函数 $g(x)$, 所以我们考虑局部的微分方程, 即只考虑等式左边, 以此来得到构造函数. 考虑 $f + f'' = 0 \Leftrightarrow ff' = -f''f'$, 两边同时积分得到 $\frac{1}{2}f^2 = -\frac{1}{2}(f')^2 + C$. 由此得到构造函数 $C(x) = |f(x)|^2 + |f'(x)|^2$.

证明 构造 $h(x) = |f(x)|^2 + |f'(x)|^2$, 则由(5.84)知

$$h'(x) = 2f'(x)[f(x) + f''(x)] = -2xg(x)[f'(x)]^2.$$

于是 h 在 $(-\infty, 0]$ 递增, $[0, +\infty)$ 递减. 现在我们有

$$h(x) \leq h(0) \Rightarrow |f(x)|^2 \leq |f(x)|^2 + |f'(x)|^2 \leq h(0),$$

即 f 有界. □

例题 5.28 设 $f \in C^2[0, +\infty), g \in C^1[0, +\infty)$ 且存在 $\lambda > 0$ 使得 $g(x) \geq \lambda, \forall x \geq 0$. 若 g' 至多只有有限个零点且

$$f''(x) + g(x)f(x) = 0, \quad \forall x \geq 0,$$

证明: f 在 $[0, +\infty)$ 有界.

笔记 形式计算分析需要的构造函数: 由条件解微分方程可得

$$\begin{aligned} y'y'' = -gyy' \Rightarrow \frac{(y')^2}{2} &= -\int gyy'dx = -\frac{1}{2}\int gdy^2 = -\frac{1}{2}gy^2 + \frac{1}{2}\int y^2dg \Rightarrow (y')^2 + gy^2 = \int y^2dg; \\ y'y'' = -gyy' \Rightarrow \frac{y'y''}{g} &= -yy' \Rightarrow \int \frac{y'y''}{g}dx = -\int yy'dx \Rightarrow \int \frac{1}{2g}d(y')^2 = -\frac{1}{2}y^2 \\ &\Rightarrow \frac{(y')^2}{2g} - \frac{1}{2}\int (y')^2 \left(\frac{1}{g}\right)'dx &= -\frac{1}{2}y^2 \Rightarrow \frac{(y')^2}{g} + y^2 = \int (y')^2 \left(\frac{1}{g}\right)'dx. \end{aligned}$$

于是考虑构造函数 $F_1(x) \triangleq \frac{|f'(x)|^2}{g(x)} + f^2(x), F_2(x) \triangleq |f'(x)|^2 + g(x)f^2(x)$.

证明 因为 g' 至多只有有限个零点, 所以存在 $X > 0$, 使得 $g'(x) \neq 0, \forall x \geq X$. 从而由导数介值性可知, g' 在 $[X, +\infty)$ 上要么恒大于 0, 要么恒小于 0. 令 $F_1(x) \triangleq \frac{|f'(x)|^2}{g(x)} + f^2(x), x \geq X$, 则结合条件 $f'' = -gf$ 可得

$$F'_1(x) = \frac{2f'f''g - g'(f')^2 + 2ff'g^2}{g^2} = \frac{-2f'fg^2 - g'(f')^2 + 2ff'g^2}{g^2} = -\frac{g'(f')^2}{g^2}. \quad (5.85)$$

(i) 若 $g'(x) > 0, \forall x \geq X$, 则由(5.85)式可知 $F'(x) \leq 0$, 即 $F(x)$ 在 $[X, +\infty)$ 上递减. 于是再结合 $g(x) > \lambda > 0, \forall x > 0$ 可知, 存在 $C > 0$, 使得

$$f^2(x) \leq F_1(x) \leq C, \quad \forall x \geq X.$$

故 $f(x)$ 在 $[X, +\infty)$ 上有界. 又 $f \in C[0, +\infty)$, 故 f 在 $[0, X]$ 上必有界. 因此 f 在 $[0, +\infty)$ 上有界.

(ii) 若 $g'(x) < 0, \forall x \geq X$, 令 $F_2(x) \triangleq |f'(x)|^2 + g(x)f^2(x)$, 则结合条件 $f'' = -gf$ 可得

$$F'_2(x) = 2f'f'' + g'f^2 + 2gff' = -2f'fg + g'f^2 + 2gff' = g'f^2 \leq 0. \quad (5.86)$$

从而 $F_2(x)$ 在 $[X, +\infty)$ 上递减, 于是存在 $C' > 0$, 使得

$$g(x)f^2(x) \leq F_2(x) \leq C, \quad \forall x \geq X.$$

进而由 $g(x) > \lambda > 0, \forall x > 0$ 可得

$$f^2(x) \leq \frac{C}{g(x)} \leq \frac{C}{\lambda}, \quad \forall x \geq X.$$

故 $f(x)$ 在 $[X, +\infty)$ 上有界. 又 $f \in C[0, +\infty)$, 故 f 在 $[0, X]$ 上必有界. 因此 f 在 $[0, +\infty)$ 上有界. \square

例题 5.29 设 $f \in C^2(\mathbb{R})$ 且 f, f', f'' 都是正值函数. 若存在 $a, b > 0$ 使得

$$f''(x) \leq af(x) + bf'(x), \quad \forall x \in \mathbb{R}.$$

求 $f'(x) \leq cf(x)$ 恒成立的最小的 c .

注 若存在 $c < x_1$, 使得 $f'(x) \leq cf(x), \forall x \in \mathbb{R}$, 则

$$f'(x) \leq cf(x) < x_1f(x), \quad \forall x \in \mathbb{R}.$$

但是取当 $f(x) = e^{x_1x}$ 时, 从而 $f'(x) = cf(x) = x_1f(x)$, 于是 $c = x_1$ 矛盾! 故 $c_{\min} = x_1$.

证明 考虑微分方程 $y'' = ay + by'$, 其特征方程为

$$x^2 - bx - a = 0 \Rightarrow x_1 = \frac{b + \sqrt{b^2 + 4a}}{2} > 0, \quad x_2 = \frac{b - \sqrt{b^2 + 4a}}{2} < 0.$$

于是

$$f''(x) \leq af(x) + bf'(x) \iff f''(x) - x_1f'(x) \leq x_2[f'(x) - x_1f(x)].$$

令 $g(x) \triangleq f'(x) - x_1f(x)$, 则 $g'(x) \leq x_2g(x)$. 再令 $c(x) \triangleq \frac{g(x)}{e^{x_2x}}$, 则

$$c'(x) = \frac{g'(x) - x_2g(x)}{e^{x_2x}} \leq 0 \Rightarrow c(x) \leq \lim_{x \rightarrow -\infty} c(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f'(x) - x_1f(x)}{e^{x_2x}}, \quad \forall x \in \mathbb{R}.$$

由 $f'', f', f > 0$ 可知 f, f' 递增有下界. 故 $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x)$ 和 $\lim_{x \rightarrow -\infty} f'(x)$ 都存在. 从而 $\lim_{x \rightarrow -\infty} f'(x) = 0$, 否则由**命题 5.5** 知 $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = -\infty$ 矛盾! 再结合 $x_1, f > 0, x_2 < 0$ 可得

$$c(x) \leq \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f'(x) - x_1f(x)}{e^{x_2x}} \leq \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f'(x)}{e^{x_2x}} = 0, \quad \forall x \in \mathbb{R}.$$

即

$$f'(x) \leq x_1f(x), \quad \forall x \in \mathbb{R}.$$

取 $f(x) = e^{x_1x}$, 此时等号成立. 故 $c_{\min} = x_1 = \frac{b + \sqrt{b^2 + 4a}}{2}$. \square

例题 5.30 设 $f \in C[0, +\infty) \cap D^1(0, +\infty)$ 满足

$$f(0) \geq 0, f'(x) \geq f^3(x), \forall x > 0.$$

证明:

$$f(x) = 0, \forall x \geq 0.$$

笔记 $y' = y^3$ 这个微分方程有三种解法得到三个不同的构造函数, 即分别考虑 $\frac{y'}{y^3} = 1$, $\frac{y'}{y^2} = y$, $\frac{y'}{y} = y^2$ 得到

$$\int \frac{dy}{y^3} = \int dx \implies -\frac{1}{2y^2} = x + C_1 \implies C = x + \frac{1}{2y^2};$$

$$\int \frac{y'}{y^2} dx = \int y dx \implies \int \frac{1}{y^2} dy = \int y dx \implies C - \frac{1}{y} = \int y dx \implies C = \frac{1}{y} + \int y dx;$$

$$\int \frac{y'}{y} dx = \int y^2 dx \implies \ln y = \int y^2 dx \implies y = C e^{\int y^2 dx} \implies C = \frac{y}{e^{\int y^2 dx}}.$$

第二个构造函数实际上在本题中没发挥作用.

证明 由条件可知

$$\left[\frac{f(x)}{e^{\int_0^x f^2(y) dy}} \right]' = \frac{f'(x) - f^3(x)}{e^{\int_0^x f^2(y) dy}} \geq 0.$$

从而

$$\frac{f(x)}{e^{\int_0^x f^2(y) dy}} \geq \frac{f(0)}{1} \geq 0 \implies f(x) \geq 0, \forall x \geq 0.$$

于是

$$f'(x) \geq f^3(x) \geq 0, \forall x \geq 0.$$

若存在 $a \geq 0$, 使得 $f(a) > 0$, 则由 $f' \geq 0$ 知

$$f(x) \geq f(a) > 0, \forall x > a. \quad (5.87)$$

注意到对 $\forall x \in (a, A)$, 有

$$\left[x + \frac{1}{f^2(x)} \right]' = \frac{f^3(x) - f'(x)}{f^3(x)} \leq 0.$$

故

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \left[x + \frac{1}{f^2(x)} \right] \leq a + \frac{1}{2f^2(a)} < +\infty. \quad (5.88)$$

而由 $f' \geq 0$ 可知 f 递增, 再结合(5.87)式和命题 5.5 知 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$, 从而 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{f^2(x)} = 0$. 于是 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \left[x + \frac{1}{f^2(x)} \right] = +\infty$, 这与(5.88)式矛盾!

□

例题 5.31 设可导函数 $f : [0, +\infty) \rightarrow \mathbb{R}$ 满足 $\int_0^1 f(x) dx = f(1)$ 且 $xf'(x) + f(x-1) = 0, \forall x \geq 1$. 证明: $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$.

笔记 本题关键是由 $f(x) = \frac{\int_{x-1}^x f(t) dt}{x}$ 看出只需证 f 有界, 然后由

$$f(x) = \frac{\int_{x-1}^x f(t) dt}{x} \leq \frac{\max_{y \in [x-1, x]} f(y)}{x} < \frac{\max_{y \in [0, x]} f(y)}{x} \leq \max_{y \in [0, x]} f(y), \forall x > 1.$$

发现 f 的最大值就在在某个有限区间内取到.

证明 注意到

$$\left(xf(x) - \int_{x-1}^x f(t) dt \right)' = xf'(x) + f(x-1) = 0, \forall x \geq 1.$$

故

$$xf(x) - \int_{x-1}^x f(t) dt = 1 \cdot f(1) - \int_0^1 f(t) dt = 0, \forall x \geq 1. \quad (5.89)$$

下面不妨设 f 不恒为 0, 否则结论是平凡的. 对 $\forall x \geq 1$, 都有

$$|f(x)| \leq \max_{y \in [0, x]} |f(y)|. \quad (5.90)$$

设 $x^* \geq 1$, 满足

$$|f(x^*)| = \max_{y \in [0, x^*]} |f(y)|.$$

由(5.89)式可得

$$\max_{y \in [0, x^*]} |f(y)| = |f(x^*)| = \frac{\int_{x^*-1}^{x^*} f(t) dt}{x^*} \leq \frac{\max_{y \in [0, x^*]} |f(y)|}{x^*} \leq \max_{y \in [0, x^*]} |f(y)|,$$

故 $\frac{\max_{y \in [0, x^*]} |f(y)|}{x^*} = \max_{y \in [0, x^*]} |f(y)| = \frac{\int_{x^*-1}^{x^*} f(t) dt}{x^*}$, 进而要 $x^* = 1$, 要 $\max_{y \in [0, x^*]} |f(y)| = 0$. 显然若 $\max_{y \in [0, x^*]} |f(y)| = 0$, 则 $f(x) = 0, \forall x \in [0, x^*]$. 即(5.90)式等号成立的充要条件就是 $x^* = 1$ 或 $f(x) = 0, \forall x \in [0, x^*]$. 又 f 不恒为 0, 故存

在 $X > 1$, 使得对 $\forall x \geq X$, 都有

$$|f(x)| < \max_{y \in [0, x]} |f(y)|. \quad (5.91)$$

我们断言

$$|f(x)| \leq \max_{y \in [0, X]} |f(y)|, \forall x > 1. \quad (5.92)$$

否则, 存在 $x_0 > 1$, 使得

$$|f(x_0)| > \max_{y \in [0, X]} |f(y)|.$$

记

$$x_1 \triangleq \inf \left\{ x \in [X, x_0] \mid |f(x)| > \max_{y \in [0, X]} |f(y)| \right\},$$

则由 f 的连续性和(5.91)式知

$$\max_{y \in [0, X]} |f(y)| \leq |f(x_1)| < \max_{y \in [0, x_1]} |f(y)|.$$

于是再由 f 的连续性知, 存在 $x_2 \in (X, x_1)$, 使得

$$\max_{y \in [0, X]} |f(y)| \leq |f(x_1)| < \max_{y \in [0, x_1]} |f(y)| = |f(x_2)|.$$

这与 x_1 的下确界定义矛盾! 故(5.92)式成立, 即 f 在 $[0, +\infty)$ 上有界. 因此再由(5.89)式可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_{x-1}^x f(t) dt}{x} \leq \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\sup_{x \in [0, +\infty)} |f(x)|}{x} = 0.$$

□

5.8.2 双绝对值微分不等式问题

注意区分齐次微分不等式问题和双绝对值问题.

例题 5.32 对某个 $D > 0$,

1. 设 $f \in D(\mathbb{R})$, $f(0) = 0$, 使得

$$|f'(x)| \leq D|f(x)|, \forall x \in \mathbb{R}. \quad (5.93)$$

证明 $f \equiv 0$.

2. 设 $f \in C^\infty(\mathbb{R})$, $f^{(j)}(0) = 0, \forall j \in \mathbb{N}_0$, 使得

$$|xf'(x)| \leq D|f(x)|, \forall x \in \mathbb{R}. \quad (5.94)$$

证明 $f(x) = 0, \forall x \geq 0$.

笔记 双绝对值技巧除了正常解微分方程构造函数外, 还需要对构造函数平方进行处理. 对于第一题, 解微分方程 $y' = Dy, y' = -Dy$ 得构造函数

$$C_1(x) = \frac{y(x)}{e^{Dx}}, C_2(x) = y(x)e^{Dx}.$$

但我们还要手动平方一下. 第二题是类似的.

证明

1. 构造 $C_1(x) = \frac{f^2(x)}{e^{2Dx}}, C_2(x) = f^2(x)e^{2Dx}$, 我们有

$$C'_1(x) = \frac{2f(x)f'(x) - 2Df^2(x)}{e^{2Dx}}, C'_2(x) = [2f(x)f'(x) + 2Df^2(x)]e^{2Dx}.$$

由条件(5.93), 我们知道

$$\pm f'(x)f(x) \leq |f'(x)||f(x)| \leq D|f(x)|^2,$$

于是 C_1 递减, C_2 递增, 故

$$\frac{f^2(x)}{e^{2Dx}} \leq \frac{f^2(0)}{e^{20}} = 0, \forall x \geq 0, f^2(x)e^{2Dx} \leq f^2(0)e^{20} = 0, \forall x \leq 0,$$

于是就得到了 $f \equiv 0, \forall x \in \mathbb{R}$.

2. 构造 $C(x) = \frac{f^2(x)}{x^{2D}}, x > 0$ (因为只需证明 $f(x) = 0, \forall x \geq 0$, 所以我们只考虑一边), 则

$$C'(x) = \frac{2f(x)f'(x)x - 2Df^2(x)}{x^{2D+1}}.$$

由(5.94), 我们有

$$xf'(x)f(x) \leq x|f'(x)||f(x)| \leq D|f(x)|^2,$$

即 C 递减. 由 Taylor 公式的 Peano 余项, 我们有 $f(x) = o(x^m), \forall m \in \mathbb{N} \cap (2D, +\infty)$, 于是

$$C(x) \leq \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f^2(x)}{x^{2D}} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{o(x^m)}{x^{2D}} = 0,$$

故 $f(x) = 0, \forall x \geq 0$.

□

例题 5.33 设 $f \in D^2[0, +\infty)$ 满足 $f(0) = f'(0) = 0$ 以及

$$|f''(x)|^2 \leq |f(x)f'(x)|, \forall x \geq 0.$$

证明 $f(x) = 0, \forall x \geq 0$.

笔记 本题的加强版本见命题 5.37.

证明 令 $M = 3$, 考虑

$$g(x) = e^{-Mx} [|f(x)|^2 + |f'(x)|^2], x \geq 0.$$

利用 $1 + t^2 \geq \sqrt{t}, \forall t \geq 0$, 我们有

$$1 + \frac{|f|^2}{|f'|^2} \geq \sqrt{\frac{|f|}{|f'|}} \Rightarrow |f'|^2 + |f|^2 \geq |f|^{\frac{1}{2}}|f'|^{\frac{M}{2}} = |f'| \sqrt{|ff'|}. \quad (5.95)$$

于是

$$\begin{aligned} g'(x) &= e^{-Mx} [2ff' + 2f'f'' - Mf^2 - M(f')^2] \\ &\leq e^{-Mx} [2|ff'| + 2|f'| \sqrt{|ff'|} - Mf^2 - M(f')^2] \\ &\stackrel{(5.95)}{\leq} e^{-Mx} [2|ff'| + 2|f'|^2 + 2|f|^2 - Mf^2 - M(f')^2] \\ &\stackrel{\text{均值不等式}}{\leq} e^{-Mx} [|f|^2 + |f'|^2 + 2|f'|^2 + 2|f|^2 - Mf^2 - M(f')^2] = 0. \end{aligned}$$

于是 g 递减, 从而 $0 \leq g(x) \leq g(0) = 0$, 故 $f(x) \equiv 0$.

□

例题 5.34 设 $f \in D^2(\mathbb{R})$ 满足 $f(0) = f'(0) = 0$ 且

$$|f''(x)| \leq |f'(x)| + |f(x)|, \forall x \in \mathbb{R}.$$

证明:

$$f(x) = 0, \forall x \in \mathbb{R}.$$

笔记 本题的加强版本见命题 5.38.

证明 令 $g(x) = e^{-Mx} [|f(x)|^2 + |f'(x)|^2]$, 则

$$\begin{aligned} g'(x) &= e^{-Mx} [2ff' + 2f'f'' - Mf^2 - M(f')^2] \\ &\leq e^{-Mx} [f^2 + (f')^2 + 2f'(|f| + |f'|) - Mf^2 - M(f')^2] \\ &\leq e^{-Mx} [f^2 + (f')^2 + 2(f')^2 + f^2 + (f')^2 - Mf^2 - M(f')^2] \\ &= e^{-Mx} [(2-M)f^2 + (4-M)(f')^2]. \end{aligned}$$

取充分大的 M , 就有 $g'(x) \leq 0$. 于是 $g(x) \leq g(0) = 0, \forall x \geq 0$. 又注意到 $g(x) = e^{-Mx} [|f(x)|^2 + |f'(x)|^2] \geq 0$, 因此 $g(x) \equiv 0, \forall x \geq 0$. 故 $f(x) = 0, \forall x \geq 0$. \square

例题 5.35 设 $f \in D^2(\mathbb{R})$ 满足 $f(0) = f'(0) = 0$ 且

$$|f''(x)| \leq |f'(x)f(x)|, \forall x \in \mathbb{R}.$$

证明:

$$f(x) = 0, \forall x \geq 0.$$

注 与例题 5.33 不同的是, 本题的不等式左右两边并不齐次, 如果还使用例题 5.33 的方法, 那么在放缩过程中会使得系数不含 M 的项的次数大于系数含 M 的项, 从而无法直接通过控制 M 的取值, 使得 $g'(x) \leq 0$. 因此本题我们需要使用另外的方法.

这里我们将本题与例题 5.32 类比, 采用同样的方法. 因为只需证明 $f(x) = 0, \forall x \geq 0$, 所以将原不等式视为(等式)函数构造类. 此时需要考虑的微分方程是 $y'' = ff'$. 我们将其中的 f 看作已知函数, 考虑的微分方程转化为 $y'' = fy'$, 则

$$y'' = fy' \Rightarrow \frac{y''}{y'} = f \Rightarrow \ln y' = \int_0^x f(t) dt + C \Rightarrow y' = Ce^{\int_0^x f(t) dt}.$$

于是常数变易, 再开平方得到构造函数 $C(x) = \frac{[f'(x)]^2}{e^{2\int_0^x |f(t)| dt}}$.

证明 令 $C(x) = \frac{[f'(x)]^2}{e^{2\int_0^x |f(t)| dt}}$, 则

$$C'(x) = \frac{2f'(x)f''(x) - 2|f(x)|[f'(x)]^2}{e^{2\int_0^x |f(t)| dt}}.$$

又因为

$$f'f'' \leq |f'f''| \leq |f|(f')^2.$$

所以 $C'(x) \leq 0$, 故 $C(x) \leq C(0) = 0$. 又注意到 $C(x) = \frac{[f'(x)]^2}{e^{2\int_0^x |f(t)| dt}} \geq 0$, 故 $C(x) \equiv 0$. 于是 $f'(x) = 0, \forall x \geq 0$. 进而 f 就是常值函数, 又 $f(0) = 0$, 故 $f(x) = 0, \forall x \geq 0$. \square

命题 5.37

设 $f \in D^s(0, +\infty) \cap C[0, +\infty), s \in \mathbb{N}$ 且满足

$$f^{(j)}(0) = 0, j = 0, 1, 2, \dots, s-1.$$

若还存在 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s \geq 0, \sum_{i=1}^s \lambda_i = 1, C > 0$, 满足

$$|f^{(s)}(x)| \leq C |f(x)|^{\lambda_1} |f'(x)|^{\lambda_2} \dots |f^{(s-1)}(x)|^{\lambda_s}, \forall x \geq 0. \quad (5.96)$$

证明 $f(x) = 0, \forall x \geq 0$.

笔记 我们把下述证明中左右两边各项次数均相同的不等式: $x_1^{2\lambda_1} x_2^{2\lambda_2} \dots x_n^{2\lambda_n} \leq K (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2), \forall x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$ 称为齐次不等式.(虽然也可以直接利用幂平均不等式得到, 但这里我们旨在介绍如何利用齐次化方法证明一般的齐次不等式.)

证明 令 $g(x) = e^{-Mx} [f^2 + (f')^2 + (f'')^2 + \dots + (f^{(s-1)})^2]$, $M > 0$, 显然 $g(x) \geq 0, \forall x \geq 0$. 则利用均值不等式和条件 (5.96) 式可得, 对 $\forall x \geq 0$, 都有

$$g'(x) = e^{-Mx} [2ff' + 2f'f'' + 2f''f''' + \dots + 2f^{(s-1)}f^{(s)} - Mf^2 - M(f')^2 - \dots - M(f^{(s-1)})^2]$$

$$\stackrel{\text{均值不等式}}{\leq} e^{-Mx} [f^2 + (f')^2 + (f'')^2 + \dots + (f^{(s-1)})^2 + |f^{(s)}|^2 - Mf^2 - M(f')^2 - \dots - M(f^{(s-1)})^2]$$

$$\stackrel{(5.96)式}{\leqslant} e^{-Mx} \left[(1-M)f^2 + (2-M)(f')^2 + \cdots + (2-M)(f^{(s-1)})^2 + C^2 |f(x)|^{2\lambda_1} |f'(x)|^{2\lambda_2} \cdots |f^{(s-1)}(x)|^{2\lambda_s} \right]. \quad (5.97)$$

我们先证明 $x_1^{2\lambda_1} x_2^{2\lambda_2} \cdots x_n^{2\lambda_n} \leqslant K(x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2)$, $\forall x_1, x_2, \dots, x_n \geqslant 0$.

令 $S \triangleq \{(x_1, x_2, \dots, x_n) | x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2 = 1\}$, 则 S 是 \mathbb{R}^n 上的有界闭集, 从而 S 是紧集. 于是 $x_1^{2\lambda_1} x_2^{2\lambda_2} \cdots x_n^{2\lambda_n}$ 为紧集 S 上的连续函数, 故一定存在 $K > 0$, 使得

$$x_1^{2\lambda_1} x_2^{2\lambda_2} \cdots x_n^{2\lambda_n} \leqslant K, \forall (x_1, x_2, \dots, x_n) \in S. \quad (5.98)$$

对 $\forall x_1, x_2, \dots, x_n \geqslant 0$, 固定 x_1, x_2, \dots, x_n . 不妨设 x_1, x_2, \dots, x_n 不全为零, 否则结论显然成立. 取

$$L = \frac{1}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}} > 0,$$

考虑 $(Lx_1, Lx_2, \dots, Lx_n)$, 则此时 $(Lx_1)^2 + (Lx_2)^2 + \cdots + (Lx_n)^2 = 1$, 因此 $(Lx_1, Lx_2, \dots, Lx_n) \in S$. 从而由(5.98)式可知

$$(Lx_1)^{2\lambda_1} (Lx_2)^{2\lambda_2} \cdots (Lx_n)^{2\lambda_n} \leqslant K.$$

于是

$$x_1^{2\lambda_1} x_2^{2\lambda_2} \cdots x_n^{2\lambda_n} \leqslant \frac{K}{L^{2\lambda_1+2\lambda_2+\cdots+2\lambda_n}} = \frac{K}{L^2} = K(x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2).$$

故由 x_1, x_2, \dots, x_n 的任意性可得

$$x_1^{2\lambda_1} x_2^{2\lambda_2} \cdots x_n^{2\lambda_n} \leqslant K(x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2), \forall x_1, x_2, \dots, x_n \geqslant 0. \quad (5.99)$$

因此由(5.97) (5.99) 式可得, 对 $\forall x \geqslant 0$, 都有

$$\begin{aligned} g'(x) &\leqslant e^{-Mx} \left[(1-M)f^2 + (2-M)(f')^2 + \cdots + (2-M)(f^{(s-1)})^2 + C^2 |f(x)|^{2\lambda_1} |f'(x)|^{2\lambda_2} \cdots |f^{(s-1)}(x)|^{2\lambda_s} \right] \\ &\leqslant e^{-Mx} \left[(1-M)f^2 + (2-M)(f')^2 + \cdots + (2-M)(f^{(s-1)})^2 + KC^2 (f^2 + (f')^2 + (f')^2 + (f'')^2 + \cdots + (f^{(s-1)})^2) \right] \\ &= e^{-Mx} \left[(KC^2 + 1 - M)f^2 + (KC^2 + 2 - M)(f')^2 + \cdots + (KC^2 + 2 - M)(f^{(s-1)})^2 \right]. \end{aligned}$$

于是任取 $M > KC^2 + 2$, 利用上式就有 $g'(x) \leqslant 0, \forall x \geqslant 0$. 故 $g(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上单调递减, 因此 $g(x) \leqslant g(0) = 0$. 又因为 $g(x) \geqslant 0, \forall x \geqslant 0$, 所以 $g(x) = 0, \forall x \geqslant 0$. 故 $f(x) = f'(x) = \cdots = f^{(s-1)}(x) = 0, \forall x \geqslant 0$.

□

例题 5.36 设 $f \in C^n(\mathbb{R}), n \in \mathbb{N}, f^{(k)}(x_0) = 0, k = 0, 1, 2, \dots, n-1$. 若对某个 $M > 0$ 和 $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-2} \geqslant 0, \lambda_{n-1} \geqslant 1$ 有不等式

$$|f^{(n)}(x)| \leqslant M \prod_{k=0}^{n-1} |f^{(k)}(x)|^{\lambda_k}, \forall x \in \mathbb{R}.$$

证明 $f(x) \equiv 0$.

笔记 因为原不等式是绝对值不等式, 所以考虑两个微分方程

$$f^{(n)} = f^{(n-1)} \cdot g \Rightarrow \frac{f^{(n)}}{f^{(n-1)}} = g \Rightarrow \ln f^{(n-1)} = \int_{x_0}^x g(y) dy + C \Rightarrow f^{(n-1)} = C e^{\int_{x_0}^x g(y) dy}.$$

$$f^{(n)} = -f^{(n-1)} \cdot g \Rightarrow \frac{f^{(n)}}{f^{(n-1)}} = -g \Rightarrow \ln f^{(n-1)} = - \int_{x_0}^x g(y) dy + C \Rightarrow f^{(n-1)} = C e^{- \int_{x_0}^x g(y) dy}.$$

分离常量得到构造函数 $c_1(x) \triangleq \frac{f^{(n-1)}(x)}{e^{\int_{x_0}^x g(y) dy}}, c_2(x) \triangleq f^{(n-1)}(x) e^{\int_{x_0}^x g(y) dy}$. 回顾双绝对值问题的构造函数, 我们需要的构造函数应是 $C_1(x) \triangleq c_1^2(x) = \frac{[f^{(n-1)}(x)]^2}{e^{2 \int_{x_0}^x g(y) dy}}, C_2(x) \triangleq c_2^2(x) = [f^{(n-1)}(x)]^2 e^{2 \int_{x_0}^x g(y) dy}$.

证明 由条件可知

$$|f^{(n)}(x)| \leqslant |f^{(n-1)}(x)| \cdot g(x),$$

其中 $g(x) = M \prod_{k=1}^{n-1} |f^{(k)}(x)|^{\lambda_k-1}$. 从而 $f^{(n)}(x)f^{(n-1)}(x) \leq |f^{(n)}(x)f^{(n-1)}(x)| \leq |f^{(n-1)}(x)|^2 \cdot g(x)$.
(5.100)

令 $C_1(x) \triangleq \frac{[f^{(n-1)}(x)]^2}{e^{2 \int_{x_0}^x g(y) dy}}$, 则由 (5.100) 式可知

$$C_1'(x) = \frac{2f^{(n-1)}(x)f^{(n)}(x) - 2g(x)[f^{(n-1)}(x)]^2}{e^{2 \int_{x_0}^x g(y) dy}} \leq 0.$$

故 $C_1(x) \leq C_1(x_0) = 0, \forall x \geq x_0$. 因此 $C_1(x) = 0, \forall x \geq x_0$. 进而 $f^{(n-1)}(x) = 0, \forall x \geq x_0$. 令 $C_2(x) \triangleq [f^{(n-1)}(x)]^2 e^{2 \int_{x_0}^x g(y) dy}$, 则由 (5.100) 式可知

$$C_2'(x) = [2f^{(n-1)}(x)f^{(n)}(x) + 2g(x)(f^{(n-1)}(x))^2] e^{2 \int_{x_0}^x g(y) dy} \geq 0.$$

故 $C_2(x) \leq C_2(x_0) = 0, \forall x \leq x_0$. 因此 $C_2(x) = 0, \forall x \leq x_0$. 进而 $f^{(n-1)}(x) = 0, \forall x \leq x_0$. 综上, $f^{(n-1)}(x) \equiv 0, x \in \mathbb{R}$. 从而 $f^{(n-2)}(x) = K, K \in \mathbb{R}$, 又 $f^{(n-2)}(x_0) = 0$, 故 $f^{(n-2)}(x) \equiv 0$. 又 $f^{(k)}(x_0) = 0, k = 0, 1, \dots, n-1$, 依此类推可得 $f(x) \equiv 0$. \square

命题 5.38

设 $f \in D^s(0, +\infty) \cap C[0, +\infty), s \in \mathbb{N}$ 且满足

$$f^{(j)}(0) = 0, j = 0, 1, 2, \dots, s-1.$$

若还存在 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s \geq 0$, 满足

$$|f^{(s)}(x)| \leq \lambda_1 |f(x)| + \lambda_2 |f'(x)| + \dots + \lambda_s |f^{(s-1)}(x)|, \forall x \geq 0. \quad (5.101)$$

证明 $f(x) = 0, \forall x \geq 0$. \clubsuit

证明 令 $g(x) = e^{-Mx} [f^2 + (f')^2 + (f'')^2 + \dots + (f^{(s-1)})^2]$, $M > 0$, 显然 $g(x) \geq 0, \forall x \geq 0$. 则利用均值不等式和条件(5.101) 式可得, 对 $\forall x \geq 0$, 都有

$$\begin{aligned} g'(x) &= e^{-Mx} [2ff' + 2f'f'' + 2f''f''' + \dots + 2f^{(s-1)}f^{(s)} - Mf^2 - M(f')^2 - \dots - M(f^{(s-1)})^2] \\ &\stackrel{\text{均值不等式}}{\leq} e^{-Mx} [f^2 + (f')^2 + (f'')^2 + \dots + (f^{(s-1)})^2 + |f^{(s)}|^2 - Mf^2 - M(f')^2 - \dots - M(f^{(s-1)})^2] \\ &\stackrel{(5.101) \text{ 式}}{\leq} e^{-Mx} [(1-M)f^2 + (2-M)(f')^2 + \dots + (2-M)(f^{(s-1)})^2 + (\lambda_1 |f| + \lambda_2 |f'| + \dots + \lambda_s |f^{(s-1)}|)^2]. \end{aligned} \quad (5.102)$$

我们先证明 $(\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \dots + \lambda_s x_s)^2 \leq K(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)$, $\forall x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$.

令 $S \triangleq \{(x_1, x_2, \dots, x_n) | x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 = 1\}$, 则 S 是 \mathbb{R}^n 上的有界闭集, 从而 S 是紧集. 于是 $(\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \dots + \lambda_s x_s)^2$ 为紧集 S 上的连续函数, 故一定存在 $K > 0$, 使得

$$x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 \leq K, \forall (x_1, x_2, \dots, x_n) \in S. \quad (5.103)$$

对 $\forall x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$, 固定 x_1, x_2, \dots, x_n . 不妨设 x_1, x_2, \dots, x_n 不全为零, 否则结论显然成立. 取 $L = \frac{1}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}} > 0$, 考虑 $(Lx_1, Lx_2, \dots, Lx_n)$, 则此时 $(Lx_1)^2 + (Lx_2)^2 + \dots + (Lx_n)^2 = 1$, 因此 $(Lx_1, Lx_2, \dots, Lx_n) \in S$. 从而由 (5.103) 式可知

$$(\lambda_1 Lx_1 + \lambda_2 Lx_2 + \dots + \lambda_s Lx_s)^2 \leq K.$$

于是

$$(\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \dots + \lambda_s x_s)^2 \leq \frac{K}{L^2} = K(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2).$$

故由 x_1, x_2, \dots, x_n 的任意性可得

$$(\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \dots + \lambda_s x_s)^2 \leq K (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2), \forall x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0. \quad (5.104)$$

因此由 (5.102) (5.104) 式可得, 对 $\forall x \geq 0$, 都有

$$\begin{aligned} g'(x) &\leq e^{-Mx} \left[(1-M)f^2 + (2-M)(f')^2 + \dots + (2-M)(f^{(s-1)})^2 + \left(\lambda_1 |f| + \lambda_2 |f'| + \dots + \lambda_s |f^{(s-1)}| \right)^2 \right] \\ &\leq e^{-Mx} \left[(1-M)f^2 + (2-M)(f')^2 + \dots + (2-M)(f^{(s-1)})^2 + K (f^2 + (f')^2 + \dots + (f^{(s-1)})^2) \right] \\ &= e^{-Mx} \left[(K+1-M)f^2 + (K+2-M)(f')^2 + \dots + (K+2-M)(f^{(s-1)})^2 \right]. \end{aligned}$$

于是任取 $M > K+2$, 利用上式就有 $g'(x) \leq 0, \forall x \geq 0$. 故 $g(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上单调递减, 因此 $g(x) \leq g(0) = 0$. 又因为 $g(x) \geq 0, \forall x \geq 0$, 所以 $g(x) = 0, \forall x \geq 0$. 故 $f(x) = f'(x) = \dots = f^{(s-1)}(x) = 0, \forall x \geq 0$.

□

5.8.3 极值原理

例题 5.37 设 $f \in C^2[0, 1]$ 且 $f(0) = f(1) = 0$, 若还有

$$f''(x) - g(x)f'(x) = f(x). \quad (5.105)$$

证明: $f(x) = 0, \forall x \in [0, 1]$.

证明 如果 f 在 $(0, 1)$ 取得在 $[0, 1]$ 上的正的最大值, 设最大值点为 c 且 $f(c) > 0, f'(c) = 0, c \in (0, 1)$, 代入 (5.105) 式知 $f''(c) = f(c) > 0$. 又由极值的充分条件, 我们知道 c 是严格极小值点, 这就是一个矛盾!

同样的考虑 f 在 $(0, 1)$ 取得在 $[0, 1]$ 上的负的最小值, 设最小值点为 c 且 $f(c) < 0, f'(c) = 0, c \in (0, 1)$, 代入 (5.105) 式知 $f''(c) = f(c) < 0$. 又由极值的充分条件, 我们知道 c 是严格极大值点, 这就是一个矛盾!

综上, f 在 $(0, 1)$ 上没有正的最大值, 也没有负的最小值. 即

$$0 \leq f(x) \leq 0.$$

故 $f(x) = 0, \forall x \in [0, 1]$.

□

例题 5.38 令 $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ 为连续的, 满足 $f(0) = f(1) = 0$. 假设 f'' 在 $(0, 1)$ 内存在, 且具有 $f'' + 2f' + f \geq 0$. 证明对所有 $0 \leq x \leq 1$, 有 $f(x) \leq 0$ 成立.

证明 反证, 假设 f 存在正的最大值, 记

$$f(x_0) = \max_{x \in [0, 1]} f(x),$$

由 $f(0) = f(1) = 0$ 知 $x_0 \in (0, 1)$. 再记

$$x_1 = \inf\{x \in (x_0, 1] : f(x) = 0\}.$$

由 $f \in C[0, 1]$ 知 $f(x_1) = 0$. 并且

$$f(x) > 0, \forall x \in (x_0, x_1).$$

否则, 存在 $x_2 \in (x_0, x_1)$, 使得 $f(x_2) = 0$, 这与 x_1 的下确界定义矛盾! 于是

$$\frac{f(x) - f(x_1)}{x - x_1} = \frac{f(x)}{x - x_1} \leq 0, \quad \forall x \in (x_0, x_1).$$

令 $x \rightarrow x_1^-$ 得

$$f'(x_1) = \lim_{x \rightarrow x_1^-} \frac{f(x) - f(x_1)}{x - x_1} \leq 0. \quad (5.106)$$

注意到

$$f''(x) + f'(x) \geq -(f'(x) + f(x)),$$

令 $g(x) = f'(x) + f(x)$, 则

$$g'(x) + g(x) \geq 0.$$

再令 $C(x) = e^x g(x)$, 则

$$C'(x) = e^x [g'(x) + g(x)] \geq 0.$$

从而 $C(x)$ 递增. 由(5.106)式知 $f'(x_1) \leq 0$, 故

$$0 < e^{x_0} f(x_0) = C(x_0) \leq C(x_1) = e^{x_1} [f'(x_1) + f(x_1)] = e^{x_1} f'(x_1) \leq 0$$

显然矛盾!

□

例题 5.39 设 $\alpha > 0$, f 在 $[0, 1]$ 上非负, 有二阶导函数, $f(0) = 0$, 且在 $[0, 1]$ 上不恒为零. 求证: 存在 $\xi \in (0, 1)$ 使得

$$\xi f''(\xi) + (\alpha + 1)f'(\xi) > \alpha f(\xi)$$

笔记 要证明的结论是二阶微分不等式无法直接解微分方程构造函数解决, 因此考虑局部微分构造. 然后通过性质分析来处理.

前面微分不等式的转化可以通过局部解微分方程得到局部构造, 然后进行转化. 这里的构造和转化方式不唯一, 可以随便凑.

证明的关键在于发现矛盾点在 f 的第一个递增区间处.

证明 反证, 假设

$$x f''(x) + (\alpha + 1)f'(x) \leq \alpha f(x), \quad \forall x \in (0, 1)$$

从而对 $\forall x \in (0, 1)$, 有

$$x^{\alpha+1} f''(x) + (\alpha + 1)x^\alpha f'(x) \leq \alpha x^\alpha f(x) \iff [x^{\alpha+1} f'(x)]' \leq \alpha x^\alpha f(x)$$

两边同时积分得, 对 $\forall x \in (0, 1)$, 都有

$$\int_0^x [t^{\alpha+1} f'(t)]' dt \leq \alpha \int_0^x t^\alpha f(t) dt \iff x^{\alpha+1} f'(x) \leq \alpha \int_0^x t^\alpha f(t) dt. \quad (5.107)$$

由于 f 在 $[0, 1]$ 上非负且不恒为 0, 又 $f(0) = 0$, 故存在 $c \in (0, 1]$, 使得

$$f(c) = \max_{x \in [0, 1]} f(x) > 0,$$

令

$$A = \{x \in (0, 1] : f'(x) = 0 \text{ 且 } f(x) > 0\} \cup \{c\}, \quad x_1 = \inf A.$$

由 f 的连续性可知 $f(x_1) > 0$. 我们断言 f 在 $[0, x_1]$ 上递增. 否则, 假设存在 $0 \leq a < b \leq x_1$, 使得

$$f(a) > f(b) \geq 0$$

从而 $a > 0$. 否则, 利用上式和 f 非负可得

$$0 \leq f(b) < f(0) = 0$$

显然矛盾! 由 $f \in C[a, b]$ 知, 存在 $\xi \in [a, b]$, 使得

$$f(\xi) = \max_{x \in [a, b]} f(x) \geq f(a) > f(b) > 0$$

于是 $f'(\xi) = 0$ 且 $\xi < b$. 从而 $\xi \in A$, 这与 x_1 的下确界定义矛盾! 故 f 在 $[0, x_1]$ 上递增. 再结合(5.107)式可得, 对 $\forall x \in [0, x_1]$, 有

$$x^{\alpha+1} f'(x) \leq \alpha \int_0^x t^\alpha f(t) dt \leq \alpha \int_0^x x^\alpha f(x) dt = \alpha x^{\alpha+1} f(x) \iff f'(x) - \alpha f(x) \leq 0$$

再令 $g(x) = e^{-\alpha x} f(x)$, 则

$$g'(x) = e^{-\alpha x} [f'(x) - \alpha f(x)] \leq 0, \quad \forall x \in [0, x_1]$$

故 g 在 $[0, x_1]$ 上递减. 从而

$$e^{-x_1} f(x_1) = g(x_1) \leq g(0) = 0 \implies f(x_1) \leq 0$$

这与 $f(x_1) > 0$ 矛盾!

□

5.9 函数性态分析综合

命题 5.39

设 $f : (a, b) \rightarrow (a, b)$ 满足对任意的 $x, y \in (a, b)$, 当 $x \neq y$ 时, 有 $|f(x) - f(y)| < |x - y|$. 任取 $x_1 \in (a, b)$, 令 $x_{n+1} = f(x_n), n = 1, 2, \dots$, 证明: 数列 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ 收敛.

证明 注意到 $x_1 \in (a, b)$, 假设 $x_k \in (a, b)$, 则 $x_{k+1} = f(x_k) \in (a, b)$, 故由数学归纳法可知 $x_n \in (a, b), \forall n \in \mathbb{N}$. 又由条件可知, 对 $\forall \varepsilon > 0$, 令 $\delta = \varepsilon > 0$, 当 $x, y \in (a, b)$ 且 $0 < |x - y| < \delta$ 时, 有

$$|f(x) - f(y)| < |x - y| < \delta = \varepsilon.$$

故 f 在 (a, b) 上一致连续. 从而 $f \in C(a, b)$, 可以补充定义使 $f \in C[a, b]$. 令 $F(x) = f(x) - x$, 则 $F \in C[a, b]$. 下面我们对 F 进行分类讨论.

- (1) 若 F 在 (a, b) 上不变号, 则由 $F \in C(a, b)$ 可知, F 要么恒大于零, 要么恒小于零. 不妨设 F 在 (a, b) 上恒大于零, 即 $f(x) > x, \forall x \in (a, b)$. 从而

$$x_{n+1} = f(x_n) > x_n, \forall n \in \mathbb{N}.$$

即 $\{x_n\}$ 单调递增. 又因为 $x_n \in (a, b), \forall n \in \mathbb{N}$, 所以由单调有界定理可知 $\{x_n\}$ 收敛.

- (2) 若 F 在 (a, b) 上变号, 则由 $F \in C(a, b)$ 及介值定理可得, 存在 $\xi \in (a, b)$, 使得 $f(\xi) = \xi$. 若存在 $\xi' \in (a, b)$ 且 $\xi' \neq \xi$, 使得 $f(\xi') = \xi'$, 则由条件可得到

$$|\xi - \xi'| = |f(\xi) - f(\xi')| < |\xi - \xi'|.$$

显然矛盾! 因此存在唯一的 $\xi \in (a, b)$, 使得 $f(\xi) = \xi$. 从而

$$|x_{n+1} - \xi| = |f(x_n) - f(\xi)| < |x_n - \xi|, \forall n \in \mathbb{N}.$$

于是 $\{|x_n - \xi|\}$ 单调递减且有下界 0, 故由单调有界定理可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_n - \xi| = A \geq 0$ 存在.

(i) 当 $A = 0$ 时, 则由 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_n - \xi| = A = 0$ 可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \xi$.

(ii) 当 $A > 0$ 时, 若 $\{x_n\}$ 收敛, 则结论已经成立. 若 $\{x_n\}$ 发散, 则由 $x_n \in (a, b), \forall n \in \mathbb{N}$ 及聚点定理可知, $\{x_n\}$ 至少有一个聚点. 若 $\{x_n\}$ 只有一个聚点, 则 $\{x_n\}$ 收敛与假设矛盾! 因此 $\{x_n\}$ 至少有两个聚点. 任取收敛子列 $\{x_{n_k}\} \subset \{x_n\}$, 设 $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = B$, 则

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} |x_n - \xi| = \lim_{k \rightarrow \infty} |x_{n_k} - \xi| = |B - \xi|.$$

从而 $B = \xi - A$ 或 $\xi + A$. 因此 $\{x_n\}$ 最多有两个聚点 $\xi - A, \xi + A \in [a, b]$. 故 $\{x_n\}$ 有且仅有两个聚点 $\xi - A$ 和 $\xi + A$. 进而一定存在收敛子列 $\{x_{n_k}\}$, 使得 $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = \xi - A$. 因为 $\xi - A \neq \xi$ 不是 f 的不动点, 而 $\{x_n\}$ 只有两个聚点, 所以

$$\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k+1} = \lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) = f(\xi - A) \neq \xi - A \implies \lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k+1} = f(\xi - A) = \xi + A.$$

由

$$\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = \xi - A < \xi, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k+1} = \xi + A > \xi$$

知, 存在 $K \in \mathbb{N}$, 使得 $\forall k > K$, 有 $x_{n_k} < \xi, x_{n_k+1} > \xi$. 又 $\{|x_n - \xi|\}$ 递减趋于 A , 故对 $\forall k > K$ 有

$$A \leq |x_{n_k} - \xi| = \xi - x_{n_k} < \xi - a \implies \xi - A > a,$$

$$A \leq |x_{n_k+1} - \xi| = x_{n_k+1} - \xi < b - \xi \implies \xi + A < b.$$

因此 $\xi - A, \xi + A \in (a, b)$, $\xi = f(\xi)$. 再由条件可得

$$A = |\xi - (\xi + A)| = |f(\xi) - f(\xi - A)| < |\xi - (\xi - A)| = A.$$

显然矛盾! 故 $A > 0$ 不成立, 于是 $A = 0$. 再由 (1) 可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \xi$, 即 $\{x_n\}$ 收敛, 与假设 $\{x_n\}$ 发散矛盾!

□

命题 5.40

设 f' 在 $[0, +\infty)$ 一致连续且 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在, 证明 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 0$.

◆

笔记 本题也有积分版本(见命题 6.8)令 $F = \int_0^x f(x) dx$ 就可以将这个积分版本转化为上述命题.

证明 反证, 若 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) \neq 0$, 则可以不妨设存在 $\delta > 0, \{x_n\}_{n=1}^\infty$, 使得

$$x_n \rightarrow +\infty \text{ 且 } f'(x_n) \geq \delta, \forall n \in \mathbb{N}.$$

由 f' 在 $[0, +\infty)$ 上一致连续可知, 存在 $\eta > 0$, 使得对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$f'(x) \geq f'(x_n) - \frac{\delta}{2} \geq \frac{\delta}{2}, \forall x \in [x_n - \eta, x_n + \eta].$$

从而对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$f(x_n + \eta) - f(x_n) = \int_{x_n}^{x_n + \eta} f'(x) dx \geq \int_{x_n}^{x_n + \eta} \frac{\delta}{2} dx = \frac{\delta\eta}{2} > 0, \forall x \in [x_n - \eta, x_n + \eta].$$

令 $n \rightarrow \infty$, 由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在可得 $0 \geq \frac{\delta\eta}{2} > 0$, 矛盾! 故 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 0$.

□

命题 5.41 (时滞方程)

设 f 在 \mathbb{R} 上可微且满足

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 1, \quad f(x+1) - f(x) = f'(x), \forall x \in \mathbb{R}.$$

证明 存在常数 $C \in \mathbb{R}$ 使得 $f(x) = x + C, \forall x \in \mathbb{R}$.

◆

证明 由 $f(x+1) - f(x) = f'(x), \forall x \in \mathbb{R}$ 及 $f \in D(\mathbb{R})$ 可知 $f' \in C(\mathbb{R})$. 对 $\forall x_1 \in \mathbb{R}$, 固定 x_1 , 记

$$A = \{z > x_1 \mid f'(z) = f'(x_1)\}.$$

由 Lagrange 中值定理及 $f(x+1) - f(x) = f'(x), \forall x \in \mathbb{R}$ 可知

$$\exists x_2 \in (x_1, x_1 + 1) \text{ s.t. } f'(x_1) = f(x_1 + 1) - f(x_1) = f'(x_2).$$

故 $x_2 \in A$, 从而 A 非空. 现在考虑 $y \triangleq \sup A \in (x_1, +\infty)$, 下证 $y = +\infty$. 若 $y < +\infty$, 则存在 $\{z'_n\}_{n=1}^\infty$, 使得

$$z'_n \rightarrow y \text{ 且 } f'(z'_n) = f'(x_1).$$

两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 由 $f' \in C(\mathbb{R})$ 可得

$$f'(x_1) = \lim_{n \rightarrow \infty} f'(z'_n) = f'(y).$$

又由 Lagrange 中值定理及 $f(x+1) - f(x) = f'(x), \forall x \in \mathbb{R}$ 可得

$$\exists y' \in (y, y+1) \text{ s.t. } f'(y) = f(y+1) - f(y) = f'(y').$$

从而 $y' \in A$ 且 $y' > y$, 这与 $y = \sup A$ 矛盾! 故 $y = +\infty$. 于是存在 $\{z_n\}_{n=1}^\infty$, 使得

$$z_n \rightarrow +\infty \text{ 且 } f'(z_n) = f'(x_1).$$

两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 由 $f' \in C(\mathbb{R})$ 及 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 1$ 可得

$$f'(x_1) = \lim_{n \rightarrow \infty} f'(z_n) = \lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 1.$$

因此由 x_1 的任意性得, 存在 C 为常数, 使得 $f(x) = x + C, \forall x \in \mathbb{R}$. \square

例题 5.40 设 $f \in C^2(\mathbb{R})$ 满足 $f(1) \leq 0$ 以及

$$\lim_{x \rightarrow \infty} [f(x) - |x|] = 0. \quad (12.27)$$

证明: (1) 存在 $\xi \in (1, +\infty)$, 使得 $f'(\xi) > 1$.

(2) 存在 $\eta \in \mathbb{R}$, 使得 $f''(\eta) = 0$.

证明 (1) 如果对任何 $x \in (1, +\infty)$, 都有 $f'(x) \leq 1$, 那么 $[f(x) - x]' \leq 0$ 知 $f(x) - x$ 在 $[1, +\infty)$ 单调递减. 从而

$$-1 \geq f(1) - 1 \geq \lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) - x] = \lim_{x \rightarrow \infty} [f(x) - |x|] = 0,$$

这就是一个矛盾! 于是我们证明了 (1).

(2) 若对任何 $x \in \mathbb{R}$, 我们有 $f''(x) \neq 0$. 从而 $f''(x)$ 要么恒大于零, 要么恒小于零, 否则由零点存在定理可得矛盾! 任取 $\xi \in \mathbb{R}$.

当 $f''(x) > 0, \forall x \in \mathbb{R}$, 我们知道 f 在 \mathbb{R} 上是下凸函数. 由 (1) 和下凸函数切线总是在函数下方, 我们知道

$$f(x) \geq f(\xi) + f'(\xi)(x - \xi), \forall x > \xi.$$

于是

$$0 = \lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) - x] \geq \lim_{x \rightarrow +\infty} [f(\xi) - f'(\xi)\xi + (f'(\xi) - 1)x] = +\infty,$$

这就是一个矛盾!

当 $f''(x) < 0, \forall x \in \mathbb{R}$, 我们知道 f 在 \mathbb{R} 上是上凸函数. 由 (1) 和上凸函数切线总是在函数上方, 我们有

$$f(x) \leq f(\xi) + f'(\xi)(x - \xi), \forall x < \xi.$$

于是

$$0 = \lim_{x \rightarrow -\infty} [f(x) + x] \leq \lim_{x \rightarrow -\infty} [f(\xi) - f'(\xi)\xi + (f'(\xi) + 1)x] = -\infty,$$

这就是一个矛盾! 因此我们证明了 (2). \square

例题 5.41 设 f 在 $[a, b]$ 上每一个点极限都存在, 证明: f 在 $[a, b]$ 有界.

笔记 极限存在必然局部有界, 本题就是说局部有界可以推出在紧集上有界. 在大量问题中会有一个公共现象: 即局部的性质等价于在所有紧集上的性质. 证明的想法就是有限覆盖.

证明 对 $\forall c \in [a, b]$, 由 $\lim_{x \rightarrow c} f(x)$ 存在可知, 存在 c 的邻域 U_c 和 $M > 0$, 使得

$$\sup_{x \in U_c \cap [a, b]} |f(x)| \leq M_c.$$

注意 $[a, b] \subset \bigcup_{c \in [a, b]} U_c$, 由有限覆盖定理得, 存在 $c_1, c_2, \dots, c_n \in [a, b]$, 使得

$$[a, b] \subset \bigcup_{k=1}^n U_{c_k}.$$

故 $\sup_{x \in [a, b]} |f(x)| \leq \max_{1 \leq k \leq n} M_k$. \square

例题 5.42 设 f 是 $(a, +\infty)$ 有界连续函数, 证明对任何实数 T , 存在数列 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$ 使得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [f(x_n + T) - f(x_n)] = 0.$$

注 因为 $|f(x + T) - f(x)| \geq 0$, 所以

$$0 \leq \lim_{x \rightarrow +\infty} |f(x + T) - f(x)| \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |f(x + T) - f(x)|.$$

原结论的反面只用考虑 $\underline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |f(x + T) - f(x)|$ 即可. 若 $\underline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |f(x + T) - f(x)| = 0$, 则一定存在子列 $x_n \rightarrow +\infty$, 使得结论成立. 因此原结论等价于 $\lim_{x \rightarrow +\infty} |f(x + T) - f(x)| = 0$. 故原结论的反面就是 $\lim_{x \rightarrow +\infty} |f(x + T) - f(x)| > 0$.



笔记 考虑反证法之后, 再进行定性分析(画 $f(x)$ 的大致走势图), 就容易找到矛盾.

证明 当 $T = 0$ 时, 显然存在这样的数列. 不妨设 $T > 0$, 假设 $\liminf_{x \rightarrow +\infty} |f(x+T) - f(x)| > 0$, 则存在 $\varepsilon_0 > 0$, $X > 0$, 使得

$$|f(x+T) - f(x)| \geq \varepsilon_0 > 0, \quad \forall x \geq X \quad (5.108)$$

令 $g(x) \triangleq f(x+T) - f(x)$, 则若存在 $x_1, x_2 \geq X$, 使得

$$g(x_1) = f(x_1+T) - f(x_1) \geq \varepsilon_0 > 0, \quad g(x_2) = f(x_2+T) - f(x_2) \leq -\varepsilon_0 < 0.$$

不妨设 $x_1 < x_2$, 由 g 连续及介值定理可知, 存在 $x_3 \in (x_1, x_2)$, 使得

$$g(x_3) = f(x_3+T) - f(x_3) = 0$$

与(5.108)式矛盾! 故 $g(x) \triangleq f(x+T) - f(x)$ 在 $[X, +\infty)$ 上要么恒大于 ε_0 , 要么恒小于 $-\varepsilon_0$. 于是不妨设

$$f(x+T) - f(x) \geq \varepsilon_0, \quad \forall x \geq X. \quad (5.109)$$

从而对 $\forall k \in \mathbb{N}$, 当 $x \geq X$ 时, 有 $x + (k-1)T > X$. 于是由(5.109)式可得

$$f(x+kT) - f(x+(k-1)T) \geq \varepsilon_0, \quad \forall x \geq X.$$

进而对上式求和可得, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$\sum_{k=1}^n [f(x+kT) - f(x+(k-1)T)] = f(x+nT) - f(x) \geq n\varepsilon_0, \quad \forall x \geq X.$$

任取 $x_0 \geq X$, 则

$$f(x_0+nT) - f(x_0) \geq n\varepsilon_0, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

令 $n \rightarrow \infty$, 得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$. 这与 f 在 $(a, +\infty)$ 上有界矛盾!

□

命题 5.42

1. 设 $f_n \in C[a, b]$ 且关于 $[a, b]$ 一致的有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x).$$

证明: 对 $\{x_n\} \subset [a, b]$, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = c$, 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x_n) = f(c).$$

2. 设 $f_n(x) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 满足对任何 $x_0 \in \mathbb{R}$ 和 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset \mathbb{R}$, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$, 都有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x_n) = f(x_0),$$

证明: $f \in C(\mathbb{R})$.

◆

证明

1. 由 f_n 一致收敛到 $f(x)$ 可知, 对 $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $N_0 \in \mathbb{N}$, 使得对 $\forall N \geq N_0$, 当 $n \geq N$ 时, 对 $\forall x \in [a, b]$, 都有

$$|f_n(x) - f_N(x)| < \varepsilon.$$

从而由上式可得

$$\begin{aligned} |f_n(x_n) - f(c)| &\leq |f_n(x_n) - f_N(x_n)| + |f_N(x_n) - f_N(c)| + |f_N(c) - f(c)| \\ &\leq \varepsilon + |f_N(x_n) - f_N(c)| + |f_N(c) - f(c)|. \end{aligned}$$

令 $n \rightarrow +\infty$, 由 f 的连续性及 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = c$ 可得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} |f_n(x_n) - f(c)| \leq \varepsilon + |f_N(c) - f(c)|.$$

再令 $N \rightarrow +\infty$, 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x), \forall x \in [a, b]$ 可知

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} |f_n(x_n) - f(c)| \leq \varepsilon.$$

令 $\varepsilon \rightarrow 0^+$, 得 $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} |f_n(x_n) - f(c)| \leq 0$. 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x_n) = f(c)$.

2. 反证, 若 f 在 $x_0 \in \mathbb{R}$ 处不连续, 则存在 $\varepsilon_0 > 0$, 使得 $\forall m \in \mathbb{N}$, 存在 $y_m \in (x_0 - \frac{1}{m}, x_0 + \frac{1}{m})$, 使得

$$|f(y_m) - f(x_0)| \geq \varepsilon_0. \quad (5.110)$$

令条件中的 $x_n = y_m, \forall n \in \mathbb{N}$, 从而由条件可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} |f_n(y_m) - f(y_m)| = 0, m = 1, 2, \dots$, 故对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 存在严格递增的数列 $n_m \rightarrow +\infty$, 使得

$$|f_{n_m}(y_m) - f(y_m)| < \frac{\varepsilon_0}{2}. \quad (5.111)$$

从而由(5.110)(5.111)式可知, 对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 都有

$$|f(y_{n_m}) - f(x_0)| \geq \varepsilon_0, \quad (5.112)$$

$$|f_{n_m}(y_{n_m}) - f(y_{n_m})| < \frac{\varepsilon_0}{2}. \quad (5.113)$$

因此由(5.112)(5.113)式可得, 对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 都有

$$|f_{n_m}(y_{n_m}) - f(x_0)| \geq |f(y_{n_m}) - f(x_0)| - |f_{n_m}(y_{n_m}) - f(y_{n_m})| \geq \varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0}{2} = \frac{\varepsilon_0}{2}. \quad (5.114)$$

注意到 $y_m \rightarrow x_0$, 于是 $y_{n_m} \rightarrow x_0$. 从而由已知条件可知 $\lim_{m \rightarrow \infty} f_{n_m}(y_{n_m}) = f(x_0)$, 这与(5.114)式矛盾! 故 $f \in C(\mathbb{R})$.

□

例题 5.43 设 $g \in C(\mathbb{R})$ 且以 $T > 0$ 为周期, 且有

$$f(f(x)) = -x^3 + g(x). \quad (5.115)$$

证明: 不存在 $f \in C(\mathbb{R})$, 使得(5.115)式成立.

证明 由连续的周期函数的基本性质可知, 存在 $M > 0$, 使得 $|g(x)| \leq M$. 反证, 假设存在 $f \in C(\mathbb{R})$, 使得(5.115)式成立. 则

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(f(x)) = \lim_{x \rightarrow +\infty} (-x^3 + g(x)) = -\infty, \quad (5.116)$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(f(x)) = \lim_{x \rightarrow -\infty} (-x^3 + g(x)) = +\infty. \quad (5.117)$$

假设 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = A \in \mathbb{R}$, 则存在 $x_n \rightarrow +\infty$, 使得 $f(x_n) \rightarrow A$. 从而由(5.115)式可得

$$f(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(f(x_n)) = \lim_{n \rightarrow \infty} (-x_n^3 + g(x_n)) = -\infty.$$

上式显然矛盾! 又因为 $f \in C(\mathbb{R})$, 所以 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$ 或 $-\infty$. 否则, 当 $x \rightarrow +\infty$ 时, $f(x)$ 振荡 (上下极限不相等, 取 K 为上下极限和的一半即可), 则由介值定理可知, 存在 $K > 0, y_n \rightarrow +\infty$, 使得 $f(y_n) = K, n = 1, 2, \dots$. 从而由(5.116)式可知

$$-\infty = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(f(x)) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(f(y_n)) = f(K).$$

显然矛盾!

(i) 若 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$, 则

$$+\infty = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = f(+\infty) = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(f(x)) = \lim_{x \rightarrow +\infty} [-x^3 + g(x)] = -\infty.$$

显然矛盾!

(ii) 若 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = -\infty$, 则

$$f(-\infty) = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(f(x)) = \lim_{x \rightarrow +\infty} [-x^3 + g(x)] = -\infty. \quad (5.118)$$

从而对上式两边同时作用 f 可得

$$f(-\infty) = f(f(-\infty)) = \lim_{x \rightarrow -\infty} [-x^3 + g(x)] = +\infty. \quad (5.119)$$

于是(5.118)式与(5.119)式显然矛盾! 综上, $f \in C(\mathbb{R})$ 的解不存在.

□

例题 5.44

1. 设 $f \in C[0, +\infty)$ 是有界的. 若对任何 $r \in \mathbb{R}$, 都有 $f(x) = r$ 在 $[0, +\infty)$ 只有有限个或者无根, 证明: $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在.
2. 设 $f \in C(\mathbb{R})$, n 是一个非 0 正偶数, 使得对任何 $y \in \mathbb{R}$, 都有 $\{x \in \mathbb{R} : f(x) = y\}$ 是 n 元集. 证明: 这样的 f 不存在.

证明

1. 反证, 设 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 不存在, 由 f 有界, 可设 $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} f(x) = A > B = \underline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} f(x)$. 任取 $C \in (B, A)$, 则由 $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} f(x) = A > C$ 可知, 存在 $x_1 \geq 0$, 使得 $f(x_1) > C$. 又由 $\underline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} f(x) = B < C$ 可知, 存在 $x_2 > x_1 + 1$, 使得 $f(x_2) < C$. 于是再由 $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} f(x) = A > C$ 可知, 存在 $x_3 > x_2 + 1$, 使得 $f(x_3) > C$. 又由 $\underline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} f(x) = B < C$ 可知, 存在 $x_4 > x_3 + 1$, 使得 $f(x_4) < C$. 依此类推, 可得递增数列 $\{x_n\}$, 使得

$$x_{n+1} > x_n + 1, \quad f(x_{2n-1}) > C, \quad f(x_{2n}) < C, \quad n = 1, 2, \dots.$$

从而由 $f \in C[0, +\infty)$ 及介值定理可得, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 存在 $y_n \in (x_{2n-1}, x_{2n})$, 使得 $f(y_n) = C$, 矛盾!

2. 设 $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ 是 f 的所有零点, 记 $x_0 = -\infty, x_{n+1} = +\infty$, 则由 f 的连续性及介值定理可知, f 在 (x_{i-1}, x_i) 上不变号. 这里共有 $n+1$ 个区间, 现在考虑 $(x_{i-1}, x_i), i = 2, 3, \dots, n$, 这 $n-1$ 个区间. 于是由抽屉原理可知, 这 $n-1$ 个区间中必存在 $\frac{n}{2}$ 区间, 使 f 在这 $\frac{n}{2}$ 个区间内都同号.

不妨设 f 在这 $\frac{n}{2}$ 个区间内恒大于 0, 记 f 在 $[x_{i-1}, x_i]$ 上的最大值记为 $f(m_i) \triangleq M_i > 0$, 其中 $m_i \in (x_{i-1}, x_i), i = 2, 3, \dots, n$. 由介值定理知, 至少存在 $c_i \in (x_{i-1}, m_i), c'_i \in (m_i, x_i)$, 使得

$$f(c_i) = f(c'_i) = \frac{1}{2} \min_{2 \leq i \leq n} M_i > 0, i = 2, 3, \dots, n.$$

注意到在 $(x_0, x_1), (x_n, x_{n+1})$ 上 f 必不同号. 否则, 不妨设在 $(x_0, x_1), (x_n, x_{n+1})$ 上 f 恒大于 0, 则由 $f \in C(\mathbb{R})$ 可知, 存在 $M > 0$, 使得 $|f(x)| < M, \forall x \in [x_1, x_{n+1}]$. 从而 $f(x) \geq -M, \forall x \in \mathbb{R}$. 这与对 $\forall y \in \mathbb{R}, f(x) = y$ 都有根矛盾!

不妨设 f 在 (x_0, x_1) 上恒小于 0, 在 (x_n, x_{n+1}) 上恒大于 0, 则 f 在 (x_n, x_{n+1}) 上无上界. 否则, 存在 $K > \max_{2 \leq i \leq n} M_i > 0$, 使得 $f(x) < K, \forall x \in (x_n, x_{n+1})$. 又因为

$$f(x) < 0 < K, \forall x \in (x_0, x_1), \quad f(x) \leq \max_{2 \leq i \leq n} M_i < K, \forall x \in (x_1, x_n).$$

所以 $f(x) < K, \forall x \in \mathbb{R}$. 这与对 $\forall y \in \mathbb{R}, f(x) = y$ 都有根矛盾!

又 $f(x_n) = 0$, 故至少存在一个 $c \in (x_n, x_{n+1})$, 使得 $f(c) = \frac{1}{2} \min_{2 \leq i \leq n} M_i > 0$. 综上, 至少有 $n+1$ 个点使得 $f(x) = \frac{1}{2} \min_{2 \leq i \leq n} M_i > 0$. 这与 $\{x \in \mathbb{R} : f(x) = \frac{1}{2} \min_{2 \leq i \leq n} M_i\}$ 是 n 元集矛盾!

□

例题 5.45

设 $a, b > 1$ 且 $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 在 $x = 0$ 邻域有界. 若

$$f(ax) = bf(x), \quad \forall x \in \mathbb{R}$$

证明: f 在 $x = 0$ 连续.

证明 注意到

$$f(0) = bf(0) \Rightarrow f(0) = 0.$$

由条件可得

$$f(ax) = bf(x) \Rightarrow f(x) = \frac{f(ax)}{b} = \frac{f(a^2x)}{b^2} = \dots = \frac{f(a^n x)}{b^n}, \forall n \in \mathbb{N}. \quad (5.120)$$

因为 f 在 $x = 0$ 邻域有界, 所以存在 $\delta > 0$, 使得

$$|f(x)| \leq M, \forall x \in (-\delta, \delta). \quad (5.121)$$

从而对 $\forall \varepsilon > 0$, 取 $N \in \mathbb{N}$, 使得

$$\frac{M}{b^N} < \varepsilon. \quad (5.122)$$

于是当 $x \in \left(-\frac{\delta}{a^N}, \frac{\delta}{a^N}\right)$ 时, 结合(5.120)(5.121)(5.122)式, 我们有

$$|f(x)| = \left| \frac{f(a^N x)}{b^N} \right| \leq \frac{M}{b^N} < \varepsilon.$$

故 $\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = f(0) = 0$. □

例题 5.46 设 $f \in C(\mathbb{R})$ 满足 $f(x), f(x^2)$ 都是周期函数, 证明: f 为常值函数.

证明 由连续周期函数必一致连续可知, $f(x), f(x^2)$ 在 \mathbb{R} 上一致连续. 于是对任意满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x'_n - x''_n) = 0$ 的数列 $\{x'_n\}, \{x''_n\}$, 都有

$$|f(x'_n) - f(x''_n)|, |f((x'_n)^2) - f((x''_n)^2)| \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty. \quad (5.123)$$

设 $f(x)$ 的周期为 $T > 0$, 则对 $\forall c \in \mathbb{R}$, 取 $x'_n = \sqrt{nT + c}, x''_n = \sqrt{nT}$, 显然 $x'_n - x''_n = \frac{c}{\sqrt{nT + c} + \sqrt{nT}} \rightarrow 0$. 从而由(5.123)式可得

$$|f((x'_n)^2) - f((x''_n)^2)| = f(nT + c) - f(nT) = f(c) - f(0) \rightarrow 0.$$

故 $f(c) = f(0), \forall c \in \mathbb{R}$. 故 f 为常值函数. □

例题 5.47 计算函数方程 $f(\log_2 x) = f(\log_3 x) + \log_5 x$ 所有 \mathbb{R} 上的连续解.

笔记 注意到

$$f\left(\frac{\ln x}{\ln 2}\right) = f\left(\frac{\ln x}{\ln 3}\right) + \frac{\ln x}{\ln 5}, \quad x > 0.$$

为了凑裂项的形式, 我们待定

$$f\left(\frac{\ln a_n}{\ln 2}\right) = f\left(\frac{\ln a_n}{\ln 3}\right) + \frac{\ln a_n}{\ln 5}, \quad n \in \mathbb{N}.$$

注意到我们有两种选择

$$\frac{\ln a_n}{\ln 2} = \frac{\ln a_{n+1}}{\ln 3}, \quad \frac{\ln a_n}{\ln 3} = \frac{\ln a_{n+1}}{\ln 2}.$$

前者公比 $\frac{\ln 3}{\ln 2} > 1$, 后者公比 $\frac{\ln 2}{\ln 3} < 1$, 为了求和方便我们选取后者.

证明 设 $f \in C(\mathbb{R})$, 对 $\forall x \in \mathbb{R}$, 取 $a_1 = x, \ln a_n = \left(\frac{\ln 2}{\ln 3}\right)^{n-1} \cdot \ln x, n \in \mathbb{N}$. 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} \ln a_n = 0$. 此时有

$$\frac{\ln a_n}{\ln 3} = \frac{\ln a_{n+1}}{\ln 2}, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

于是由条件可得

$$\begin{aligned} f\left(\frac{\ln x}{\ln 2}\right) &= f\left(\frac{\ln x}{\ln 3}\right) + \frac{\ln x}{\ln 5} \Rightarrow f\left(\frac{\ln a_n}{\ln 2}\right) = f\left(\frac{\ln a_n}{\ln 3}\right) + \frac{\ln a_n}{\ln 5} \\ &\Rightarrow f\left(\frac{\ln a_n}{\ln 2}\right) = f\left(\frac{\ln a_{n+1}}{\ln 2}\right) + \frac{\ln a_n}{\ln 5}, \quad n = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

因此

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[f\left(\frac{\ln a_n}{\ln 2}\right) - f\left(\frac{\ln a_{n+1}}{\ln 2}\right) \right] = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\ln a_n}{\ln 5} = \frac{1}{\ln 5} \cdot \frac{\ln x}{1 - \frac{\ln 2}{\ln 3}}.$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[f\left(\frac{\ln a_n}{\ln 2}\right) - f\left(\frac{\ln a_{n+1}}{\ln 2}\right) \right] = f\left(\frac{\ln a_1}{\ln 2}\right) - \lim_{n \rightarrow \infty} f\left(\frac{\ln a_{n+1}}{\ln 2}\right) = f\left(\frac{\ln x}{\ln 2}\right) - f(0).$$

故

$$\frac{1}{\ln 5} \cdot \frac{\ln x}{1 - \frac{\ln 2}{\ln 3}} = f\left(\frac{\ln x}{\ln 2}\right) - f(0) \stackrel{y=\frac{\ln x}{\ln 2}}{\Rightarrow} f(y) = f(0) + \frac{y \ln 2 \ln 3}{\ln 5 \ln \frac{3}{2}}.$$

□

例题 5.48 设 $n \in \mathbb{N}, f \in C^{n+2}(\mathbb{R})$ 使得存在 $\theta \in \mathbb{R}$ 满足对任何 $x, h \in \mathbb{R}$ 都有

$$f(x+h) = f(x) + f'(x)h + \frac{f''(x)}{2}h^2 + \cdots + \frac{f^{(n-1)}(x)}{(n-1)!}h^{n-1} + \frac{f^{(n)}(x+\theta h)}{n!}h^n$$

证明: f 是不超过 $n+1$ 次的多项式.

证明 对 $\forall x, h \in \mathbb{R}$, 由 Taylor 公式可知

$$f^{(n)}(x+\theta h) = f^{(n)}(x) + f^{(n+1)}(x)\theta h + \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{2}\theta^2 h^2.$$

再结合条件可得

$$\begin{aligned} f(x+h) &= \sum_{j=0}^{n-1} \frac{f^{(j)}(x)}{j!}h^j + \frac{f^{(n)}(x+\theta h)}{n!}h^n \\ &= \sum_{j=0}^n \frac{f^{(j)}(x)}{j!}h^j + \frac{f^{(n+1)}(x)\theta h + \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{2}\theta^2 h^2}{n!}h^n, \end{aligned} \quad (5.124)$$

由 Taylor 公式可知

$$f(x+h) = \sum_{j=0}^{n+1} \frac{f^{(j)}(x)}{j!}h^j + \frac{f^{(n+2)}(\eta)}{(n+2)!}h^{n+2}. \quad (5.125)$$

比较(5.124)式和(5.125)式得

$$\left[\frac{1}{(n+1)!} - \frac{\theta}{n!} \right] f^{(n+1)}(x) = \left[\frac{\theta^2 f^{(n+2)}(\xi)}{2n!} - \frac{f^{(n+2)}(\eta)}{(n+2)!} \right] h. \quad (5.126)$$

当 $\theta = \frac{1}{n+1}$ 时, 我们有

$$\frac{\theta^2 f^{(n+2)}(\xi)}{2n!} = \frac{f^{(n+2)}(\eta)}{(n+2)!}.$$

对上式令 $h \rightarrow 0$, 则 $\xi, \eta \rightarrow x$, 故此时就有

$$\frac{f^{(n+2)}(x)}{2n!(n+1)^2} = \frac{f^{(n+2)}(x)}{(n+2)!} \Rightarrow f^{(n+2)}(x) = 0.$$

当 $\theta \neq \frac{1}{n+1}$ 时, 对(5.126)式令 $h \rightarrow 0$, 则 $\xi, \eta \rightarrow x$, 故此时就有

$$\left[\frac{1}{(n+1)!} - \frac{\theta}{n!} \right] f^{(n+1)}(x) = 0 \Rightarrow f^{(n+1)}(x) = 0.$$

因此, 无论如何都有 f 是不超过 $n+1$ 次的多项式.

□

例题 5.49

1. 设

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n, \quad n = 1, 2, \dots \quad (5.127)$$

证明多项式 P_n 的全部根都是实数且分布在 $(-1, 1)$.

2. 设 $g(x) = e^{x^2} \frac{d^n}{dx^n} (e^{-x^2})$, 证明 g 是只有实根的多项式.

笔记 本题第 1 问叫做 Legendre(勒让德) 多项式, 第 2 问叫做 Hermite 多项式. 第 2 问用 Rolle 定理时注意无穷远点也会提供零点.

证明

1. 显然 P_n 是 n 次多项式, 且 ± 1 是 $\frac{d^k}{dx^k} (x^2 - 1)^n$ 的 $n-k$ 重根 ($0 \leq k \leq n$). 由 Rolle 定理可知, $\frac{d}{dx} (x^2 - 1)^n$ 在

$(-1, 1)$ 有一个实根. 于是再由 Rolle 定理可知, $\frac{d^2}{dx^2}(x^2 - 1)^n$ 在 $(-1, 1)$ 有两个不同实根. 反复利用 Rolle 定理可得, $\frac{d^n}{dx^n}(x^2 - 1)^n$ 在 $(-1, 1)$ 有 n 个不同实根. 而 n 次多项式有且仅有 n 个根, 故 P_n 的全部根都是实数且分布在 $(-1, 1)$ 上.

2. 设 $\frac{d^k}{dx^k}(e^{-x^2}) = P_k(x)e^{-x^2}$, P_k 是 k 次多项式, $k \in \mathbb{N}$, 显然 $P_0(x) = 1$, 于是

$$\frac{d^{k+1}}{dx^{k+1}}(e^{-x^2}) = [P'_k(x) - 2xP_k(x)]e^{-x^2}.$$

令 $P_{k+1}(x) = P'_k(x) - 2xP_k(x)$, 则由 P_k 是 k 次多项式可知 $P_{k+1}(x)$ 是 $k+1$ 次多项式. 故由数学归纳法可知

$$\frac{d^n}{dx^n}(e^{-x^2}) = P_n(x)e^{-x^2}, \quad P_n \in \mathbb{R}[x], \quad n \in \mathbb{N}.$$

因此 $g(x) = e^{-x^2} \frac{d^n}{dx^n}(e^{-x^2}) = P_n(x)$ 是 n 次多项式 ($n \in \mathbb{N}$).

显然 $P_1(x) = -2x$ 只有一个实根 $x = 0$. 设 P_k 是有 k 个不同实根的多项式, 这 k 个根为

$$x_1 < x_2 < \dots < x_k.$$

从而这 k 个根也是 $P_k(x)e^{-x^2}$ 的根. 由 Rolle 定理可知

$$P_{k+1}(x) = e^{-x^2} \frac{d^k}{dx^k}(e^{-x^2}) = e^{-x^2} \frac{d}{dx} (P_k(x)e^{-x^2})$$

在 $(x_{j-1}, x_j), j = 2, 3, \dots, k$ 有实根. 而 $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} P_k(x)e^{-x^2} = 0$, 故由加强的 Rolle 中值定理可知 $P_{k+1}(x)$ 在 $(-\infty, x_1), (x_k, +\infty)$ 上还各有一个实根. 因此 $P_{k+1}(x)$ 有 $k+1$ 个根. 故由数学归纳法可知 $P_n(x)$ 有 n 个实根 ($n \in \mathbb{N}$). 又因为 $g(x) = P_n(x)$ 是 n 次多项式, 而 n 次多项式有且仅有 n 个根, 所以 $g(x) = P_n(x)$ 是只有实根的多项式.

□

例题 5.50 设 f 是直线上的非常值连续周期函数. 若 $g \in C(\mathbb{R})$ 且 $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \frac{|g(x)|}{x} = +\infty$, 证明: $f \circ g$ 不是周期函数.

笔记 $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |g(x + \delta) - g(x)| = +\infty$. 的证明类似函数 Stolz 定理的证明. 实际上就是利用了上极限版的函数 Stolz 定理, 只不过我们之前并没有写出这个定理.

证明 若 $f \circ g$ 是周期函数, 则由连续周期函数必一致连续可知 $f \circ g$ 在 \mathbb{R} 上一致连续. 设 f 的周期为 $T > 0$, 记 $a \triangleq \max f - \min f > 0$, 则存在 $\delta > 0$, 使

$$|f(g(x)) - f(g(y))| < a, \forall |x - y| \leq \delta. \quad (5.128)$$

先证 $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |g(x + \delta) - g(x)| = +\infty$. 若 $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |g(x + \delta) - g(x)| \neq +\infty$, 则存在 $A > 0$, 使 $|g(x + \delta) - g(x)| \leq A, \forall x \geq 0$. 对 $x \in [n\delta, (n+1)\delta], n \in \mathbb{N}$, 我们有

$$\left| \frac{g(x)}{x} \right| \leq \frac{|g(x - n\delta)|}{n\delta} + \sum_{k=0}^{n-1} \left| \frac{g(x - k\delta) - g(x - (k+1)\delta)}{n\delta} \right| \leq \frac{1}{n\delta} \sup_{x \in [0, \delta]} |g(x)| + \frac{A}{\delta}.$$

故 $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \left| \frac{g(x)}{x} \right| \leq \frac{A}{\delta}$ 矛盾! 因此 $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |g(x + \delta) - g(x)| = +\infty$. 于是存在 $x_0 \in \mathbb{R}$, 使得 $|g(x_0 + \delta) - g(x_0)| \geq T$. 由介值定理可知, 存在 $s, t \in [x_0, x_0 + \delta]$, 使得 $f(g(s)) = \max f, f(g(t)) = \min f$. 从而由 (5.128) 式可知

$$a = |f(g(s)) - f(g(t))| < a$$

矛盾! 故 $f \circ g$ 不是周期函数 ($f \circ g$ 甚至不是一致连续函数).

□

例题 5.51 设 $F(x)$ 是 $[0, +\infty)$ 上的单调递减函数, 且

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 0, \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_0^{+\infty} F(t) \sin \frac{t}{n} dt = 0. \quad (5.129)$$

证明:

(i)

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} xF(x) = 0; \quad (5.130)$$

(ii)

$$\lim_{x \rightarrow 0} \int_0^{+\infty} F(t) \sin(xt) dt = 0. \quad (5.131)$$

证明

(i) 由(5.129)知 F 非负. 由 A-D 判别法知本题涉及的积分都收敛. 注意到

$$\begin{aligned} \int_0^\infty F(t) \sin(tx) dt &= \frac{1}{x} \int_0^\infty F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du = \frac{1}{x} \sum_{k=0}^\infty \int_{2k\pi}^{(2k+2)\pi} F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du \\ &= \frac{1}{x} \sum_{k=0}^\infty \left[\int_{2k\pi}^{(2k+1)\pi} F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du + \int_{(2k+1)\pi}^{(2k+2)\pi} F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du \right] \\ &= \frac{1}{x} \sum_{k=0}^\infty \left[\int_{2k\pi}^{(2k+1)\pi} F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du - \int_{2k\pi}^{(2k+1)\pi} F\left(\frac{u+\pi}{x}\right) \sin u du \right] \\ &= \frac{1}{x} \sum_{k=0}^\infty \int_{2k\pi}^{(2k+1)\pi} \left[F\left(\frac{u}{x}\right) - F\left(\frac{u+\pi}{x}\right) \right] \sin u du \\ &\geq \frac{1}{x} \int_0^\pi \left[F\left(\frac{u}{x}\right) - F\left(\frac{u+\pi}{x}\right) \right] \sin u du = \frac{1}{x} \int_0^{2\pi} F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du \geq 0, \end{aligned}$$

以及

$$\begin{aligned} \int_0^\infty F(t) \sin(tx) dt &= \frac{1}{x} \int_0^\infty F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du = \frac{1}{x} \int_0^\pi F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du + \frac{1}{x} \sum_{k=0}^\infty \int_{(2k+1)\pi}^{(2k+3)\pi} F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du \\ &= \frac{1}{x} \int_0^\pi F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du + \frac{1}{x} \sum_{k=0}^\infty \left[\int_{(2k+1)\pi}^{(2k+2)\pi} F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du + \int_{(2k+2)\pi}^{(2k+3)\pi} F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du \right] \\ &= \frac{1}{x} \int_0^\pi F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du + \frac{1}{x} \sum_{k=0}^\infty \left[\int_{(2k+1)\pi}^{(2k+2)\pi} F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du - \int_{(2k+1)\pi}^{(2k+2)\pi} F\left(\frac{u+\pi}{x}\right) \sin u du \right] \\ &= \frac{1}{x} \int_0^\pi F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du + \frac{1}{x} \sum_{k=0}^\infty \int_{(2k+1)\pi}^{(2k+2)\pi} \left[F\left(\frac{u}{x}\right) - F\left(\frac{u+\pi}{x}\right) \right] \sin u du \\ &\leq \frac{1}{x} \int_0^\pi F\left(\frac{u}{x}\right) \sin u du. \end{aligned}$$

从而

$$0 \leq \int_0^{2\pi} \frac{F\left(\frac{t}{x}\right) \sin t}{x} dt \leq \int_0^\infty F(t) \sin(tx) dt = \int_0^\infty \frac{F\left(\frac{t}{x}\right) \sin t}{x} dt \leq \int_0^\pi \frac{F\left(\frac{t}{x}\right) \sin t}{x} dt. \quad (5.132)$$

上式取 $x = \frac{1}{n}$ 并结合

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} F(t) \sin \frac{t}{n} dt &\geq n \int_0^{2\pi} F(nu) \sin u du \xrightarrow{\text{区间再现}} n \int_0^\pi [F(nu) - F(2\pi n - nu)] \sin u du \\ &\geq n \int_0^{\frac{\pi}{2}} [F(nu) - F(2\pi n - nu)] \sin u du \geq n \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[F\left(\frac{\pi n}{2}\right) - F\left(\frac{3\pi n}{2}\right) \right] \sin u du \\ &= n \left[F\left(\frac{\pi n}{2}\right) - F\left(\frac{3\pi n}{2}\right) \right] \geq 0, \end{aligned}$$

和(5.129)知

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} n \left[F\left(\frac{\pi n}{2}\right) - F\left(\frac{3\pi n}{2}\right) \right] = 0.$$

现在对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $N \in \mathbb{N}$ 使得对任何 $n \geq N$ 都有

$$n \left[F\left(\frac{\pi n}{2}\right) - F\left(\frac{3\pi n}{2}\right) \right] \leq \varepsilon. \quad (5.133)$$

当正整数 k 充分大, 我们考虑

$$b_n \triangleq k 3^{n-1} \left[F\left(\frac{\pi k 3^{n-1}}{2}\right) - F\left(\frac{\pi k 3^n}{2}\right) \right] \leq \varepsilon,$$

则利用 $\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 0$ 和(5.133)得

$$0 \leq kF\left(\frac{k\pi}{2}\right) = k \sum_{n=1}^{\infty} \left[F\left(\frac{\pi k 3^{n-1}}{2}\right) - F\left(\frac{\pi k 3^n}{2}\right) \right] = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{3^{n-1}} \leq \varepsilon \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{3^{n-1}} = \frac{3}{2}\varepsilon.$$

现在我们有 $\lim_{k \rightarrow +\infty} kF\left(\frac{k\pi}{2}\right) = 0$. 对 $x \in [0, +\infty)$, 存在唯一的 $k \in \mathbb{N}$ 使得 $x \in \left[\frac{k\pi}{2}, \frac{k+1}{2}\pi\right)$, 于是

$$0 \leq xF(x) \leq \frac{(k+1)\pi}{2} F\left(\frac{k\pi}{2}\right) \rightarrow 0, k \rightarrow +\infty,$$

因此我们证明了(5.130).

(ii) 我们由(5.132)知

$$\int_0^{\infty} F(t) \sin(tx) dt \geq 0 \Rightarrow \lim_{x \rightarrow 0^+} \int_0^{\infty} F(t) \sin(tx) dt \geq 0, \quad (5.134)$$

以及对任何 $\eta > 0$, 我们有

$$\begin{aligned} \overline{\lim}_{x \rightarrow 0^+} \int_0^{\infty} F(t) \sin(tx) dt &\leq \overline{\lim}_{x \rightarrow 0^+} \int_0^{\pi} \frac{t}{x} F\left(\frac{t}{x}\right) \cdot \frac{\sin t}{t} dt \\ &\leq \overline{\lim}_{x \rightarrow 0^+} \int_0^{\eta} \frac{t}{x} F\left(\frac{t}{x}\right) \cdot \frac{\sin t}{t} dt + \overline{\lim}_{x \rightarrow 0^+} \int_{\eta}^{\pi} \frac{t}{x} F\left(\frac{t}{x}\right) \cdot \frac{\sin t}{t} dt \\ &\leq \sup_{y \in [0, +\infty)} yF(y) \cdot \int_0^{\eta} \frac{\sin t}{t} dt + \overline{\lim}_{x \rightarrow 0^+} \sup_{y \in [\frac{\eta}{x}, \frac{\pi}{x}]} yF(y) \cdot \int_0^{\pi} \frac{\sin t}{t} dt \\ &= \sup_{y \in [0, +\infty)} yF(y) \cdot \int_0^{\eta} \frac{\sin t}{t} dt, \end{aligned}$$

这里最后一个等号用到了(5.130). 由 η 任意性得

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow 0^+} \int_0^{\infty} F(t) \sin(tx) dt \leq 0.$$

结合(5.134)即得(5.131).

□

第6章 反常积分

6.1 反常积分敛散性判别

定理 6.1 (Cauchy 收敛准则)

广义积分 $\int_a^\infty f(x)dx$ 收敛等价于对任意 $\varepsilon > 0$, 存在 $A > a$ 使得任意 $x_1, x_2 > A$ 都有 $\left| \int_{x_1}^{x_2} f(t)dt \right| < \varepsilon$.

定理 6.2

设在 $[a, +\infty)$ 上 $f \geq 0$, f 在 $[a, +\infty)$ 的任何有界子区间上可积, 则无穷积分 $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 收敛的充要条件是: 存在 $M > 0$ 使得对任何 $b > a$ 都有

$$\int_a^b f(x)dx < M,$$

即 $F(b) = \int_a^b f(x)dx$ 对于任何 b 有界.

定理 6.3 (比较判别法)

设 f 和 g 在 $[a, +\infty)$ 上有定义, 对任意 $b > a$, f 和 g 在 $[a, b]$ 可积, 且对充分大的 x , 成立不等式 $0 \leq f(x) \leq g(x)$. 若 $\int_a^{+\infty} g(x)dx$ 收敛, 则 $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 收敛.

定理 6.4 (比较判别法极限形式)

如果 f 和 g 在 $[a, +\infty)$ 上有定义且非负, 并且对任意 $b > a$, f 和 g 在 $[a, b]$ 上可积, $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = k$, 那么有

- (1) 若 $0 < k < +\infty$, 则 $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 与 $\int_a^{+\infty} g(x)dx$ 同敛散;
- (2) 若 $k = 0$, 则当 $\int_a^{+\infty} g(x)dx$ 收敛时, $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 也收敛;
- (3) 若 $k = +\infty$, 则当 $\int_a^{+\infty} g(x)dx$ 发散时, $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 也发散.

定理 6.5 (A-D 判别法)

设 $f(x), g(x)$ 在任何闭区间上黎曼可积, 其 f, g 在 $x = a$ 处都有界.

1. Abel 判别法: 若 $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 收敛, 并且 $g(x)$ 在 $[a, +\infty)$ 上单调有界, 则 $\int_a^{+\infty} f(x)g(x)dx$ 收敛.

2. Dirichlet 判别法: 若 $\int_a^x f(x)dx$ 在 $[a, +\infty)$ 上有界, 并且 $g(x)$ 在 $[a, +\infty)$ 上单调, $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = 0$, 则 $\int_a^{+\infty} f(x)g(x)dx$ 收敛.

注 Dirichlet 判别法要强于 Abel 判别法. 因为可以由 Dirichlet 判别法直接推出 Abel 判别法. 证明如下:

设 $f(x), g(x)$ 在任何闭区间上黎曼可积, 其 f, g 在 $x = a$ 处都有界. 若 $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 收敛, 并且 $g(x)$ 在 $[a, +\infty)$ 上单调有界, 则 $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) \triangleq A \in \mathbb{R}$, 令 $h(x) = g(x) - A$, 则 $\lim_{x \rightarrow +\infty} h(x) = 0$, 并且 $h(x)$ 与 $g(x)$ 有相同单调性. 由

$\int_a^\infty f(x)dx$ 收敛可知, $\int_a^x f(t)dt$ 在 $[a, +\infty)$ 上必有界. 从而由 Dirichlet 判别法可知 $\int_a^\infty f(x)h(x)dx$ 收敛. 于是

$$\int_a^\infty f(x)g(x)dx = \int_a^\infty f(x)h(x)dx + A \int_a^\infty f(x)dx < +\infty.$$

例题 6.1 设 $f(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 中非负且递减, 证明: $\int_0^{+\infty} f(x)dx, \int_0^{+\infty} f(x) \sin^2 x dx$ 同敛散性.

证明 (i) 若 $\int_0^\infty f(x)dx < \infty$, 则由条件可知

$$f(x) \sin^2 x \leq f(x), \quad \forall x \in [0, +\infty).$$

故由比较判别法可得 $\int_0^\infty f(x) \sin^2 x dx < \infty$.

(ii) 若 $\int_0^\infty f(x) \sin^2 x dx < \infty$, 则由 f 非负递减, 故 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在且 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \geq 0$. 若 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \triangleq a > 0$, 则存在 $M > 0$, 使得

$$f(x) \sin^2 x > \frac{a}{2} \sin^2 x, \quad \forall x \in [M, +\infty). \quad (6.1)$$

又因为

$$\int_0^\infty \sin^2 x dx = \lim_{b \rightarrow +\infty} \int_0^b \frac{1 - \cos 2x}{2} dx = \frac{1}{2} \lim_{b \rightarrow +\infty} \left(b - \frac{\sin 2b}{2} \right),$$

而上式右边极限不存在, 所以 $\int_0^\infty \sin^2 x dx$ 发散. 从而结合 (6.1) 式, 由比较判别法可知 $\int_0^\infty f(x) \sin^2 x dx$ 发散, 矛盾! 故 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$.

注意到

$$\int_0^\infty f(x) \sin^2 x dx = \frac{1}{2} \int_0^\infty f(x)(1 - \cos 2x) dx < \infty.$$

即 $\int_0^\infty f(x)(1 - \cos 2x) dx < \infty$. 考虑 $\int_0^\infty f(x) \cos 2x dx$, 注意到

$$\int_0^C \cos 2x dx = \frac{\sin 2C}{2} < 1, \quad \forall C > 0.$$

又由于 $f(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上单调递减趋于 0, 故由狄利克雷判别法可知 $\int_0^\infty f(x) \cos 2x dx < \infty$. 因此

$$\int_0^\infty f(x)dx = \int_0^\infty f(x)(1 - \cos 2x) dx + \int_0^\infty f(x) \cos 2x dx < \infty.$$

(iii) 当 $\int_0^\infty f(x)dx$ 或 $\int_0^\infty f(x) \sin^2 x dx$ 发散时, 实际上, $\int_0^\infty f(x)dx$ 或 $\int_0^\infty f(x) \sin^2 x dx$ 发散的情形就是 (i)(ii) 的逆否命题. 故结论得证. □

命题 6.1

设 $f(x), g(x)$ 在任何闭区间上黎曼可积, 其 f, g 在 $x = a$ 处都有界.

(1) 若 $\int_a^\infty f(x)dx$ 绝对收敛, 则 $\int_a^\infty f(x)dx$ 一定条件收敛.

(2) 若 $\int_a^\infty f(x)dx, \int_a^\infty g(x)dx$ 都绝对收敛, 则 $\int_a^\infty [f(x) \pm g(x)]dx$ 也绝对收敛.

(3) 若 $\int_a^\infty f(x)dx$ 绝对收敛, $\int_a^\infty g(x)dx$ 条件收敛, 则 $\int_a^\infty [f(x) \pm g(x)]dx$ 条件收敛, 但不绝对收敛.

(4) 若 $\int_a^\infty f(x)dx, \int_a^\infty g(x)dx$ 都条件收敛, 则 $\int_a^\infty [f(x) \pm g(x)]dx$ 可能条件收敛, 也可能绝对收敛.

证明

(1) 由 $f(x) \leq |f(x)|$ 立得.

(2) 由 $|f(x) \pm g(x)| \leq |f(x)| + |g(x)|$ 立得.

(3) 由(1)可知 $\int_a^\infty f(x)dx, \int_a^\infty g(x)dx$ 都条件收敛, 从而 $\int_a^\infty [f(x) \pm g(x)]dx$ 也条件收敛. 若 $\int_a^\infty |f(x) \pm g(x)|dx < \infty$, 注意到 $g(x) = [f(x) + g(x)] - f(x)$, 从而由(2)可知 $\int_a^\infty g(x)dx = \int_a^\infty [(f(x) + g(x)) - f(x)]dx$ 也绝对收敛, 矛盾!

(4)

□

例题 6.2 判断如下积分的收敛性:

1. $\int_0^\infty \frac{1}{\sqrt[3]{x(x-1)^2(x-2)}}dx;$
2. $\int_0^1 \frac{\sqrt[m]{\ln^2(1-x)}}{\sqrt[n]{x}}dx, m, n \in \mathbb{N};$
3. $\int_2^\infty (\sqrt{x+1} - \sqrt{x})^p \ln \frac{x+1}{x-1}dx.$

证明

1. 四个瑕点 $x = 0, 1, 2, \infty$, 分别估阶讨论即得收敛.

2. 注意到

$$\frac{\sqrt[m]{\ln^2(1-x)}}{\sqrt[n]{x}} \sim \frac{x^{\frac{2}{m}}}{x^{\frac{1}{n}}} = \frac{1}{x^{\frac{1}{n}-\frac{2}{m}}}, x \rightarrow 0^+.$$

又 $\frac{1}{n} < 1 + \frac{2}{m}, \forall m, n \in \mathbb{N}$, 故 $\int_0^{\frac{1}{2}} \frac{\sqrt[m]{\ln^2(1-x)}}{\sqrt[n]{x}}dx (\forall m, n \in \mathbb{N})$ 收敛. 注意到

$$\frac{\sqrt[m]{\ln^2(1-x)}}{\sqrt[n]{x}} \sim \ln^{\frac{2}{m}}(1-x), x \rightarrow 1^-.$$

并且对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 都有

$$\begin{aligned} \int_{\frac{1}{2}}^1 \ln^{\frac{2}{m}}(1-x)dx &= \int_0^{\frac{1}{2}} \ln^{\frac{2}{m}} x dx \xrightarrow{x=e^t} \int_{-\infty}^{-\ln 2} t^{\frac{2}{m}} e^t dt \\ &\xrightarrow{t=-u} \int_{\ln 2}^{\infty} u^{\frac{2}{m}} e^{-u} du \leq \int_0^{\infty} u^{\frac{2}{m}} e^{-u} du \\ &= \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) < +\infty. \end{aligned}$$

故 $\int_{\frac{1}{2}}^1 \frac{\sqrt[m]{\ln^2(1-x)}}{\sqrt[n]{x}}dx (\forall m, n \in \mathbb{N})$ 收敛. 综上, $\int_0^1 \frac{\sqrt[m]{\ln^2(1-x)}}{\sqrt[n]{x}}dx (\forall m, n \in \mathbb{N})$ 收敛.

3. 由于 $(\sqrt{x+1} - \sqrt{x})^p \ln \frac{x+1}{x-1} \sim \frac{1}{x^{1+\frac{p}{2}}}, x \rightarrow +\infty$. 故 $\int_2^\infty (\sqrt{x+1} - \sqrt{x})^p \ln \frac{x+1}{x-1}dx$ 收敛当且仅当 $p > 0$.

□

例题 6.3 设 $p, q > 0$, 判断 $\int_1^\infty \frac{1}{x^p \ln^q x}dx$ 收敛性.

笔记 一个经验上的小结论. 在幂函数次数不为 1 时, 趋于无穷或者趋于 0 时 \ln 可忽略.

证明 先讨论 $\int_1^2 \frac{1}{x^p \ln^q x}dx$ 的收敛性. 由于

$$\frac{1}{x^p \ln^q x} \sim \frac{1}{(x-1)^q}, x \rightarrow 1^+.$$

因此 $\int_1^2 \frac{1}{x^p \ln^q x}dx$ 收敛当且仅当 $q < 1$.

再讨论 $\int_2^\infty \frac{1}{x^p \ln^q x}dx$ 的收敛性.

① 当 $p > 1$ 时, 我们有

$$\frac{\frac{1}{x^p \ln^q x}}{\frac{1}{x^p}} = \frac{1}{\ln^q x} \rightarrow 0, x \rightarrow +\infty.$$

从而存在 $C > 0$, 当 x 充分大时, 有

$$\frac{1}{x^p \ln^q x} < \frac{C}{x^p}.$$

而 $\int_2^\infty \frac{C}{x^p} dx$ 收敛, 故 $\int_2^\infty \frac{1}{x^p \ln^q x} dx$ 此时收敛.

②当 $0 < p < 1$ 时, 取 $\varepsilon > 0$, 使得 $p + \varepsilon < 1$, 从而

$$\frac{\frac{1}{x^p \ln^q x}}{\frac{1}{x^{p+\varepsilon}}} = \frac{x^\varepsilon}{\ln^q x} \rightarrow +\infty, x \rightarrow +\infty.$$

于是存在 $M > 0$, 当 x 充分大时, 有

$$\frac{1}{x^p \ln^q x} > \frac{M}{x^{p+\varepsilon}}.$$

而 $\int_2^\infty \frac{M}{x^{p+\varepsilon}} dx$ 发散, 故 $\int_2^\infty \frac{1}{x^p \ln^q x} dx$ 此时发散.

③当 $p = 1$ 时, 我们有

$$\int_2^\infty \frac{1}{x \ln^q x} dx = \int_2^\infty \frac{1}{\ln^q x} d \ln x = \int_{\ln 2}^\infty \frac{1}{t^q} dt.$$

于是此时 $\int_2^\infty \frac{1}{x \ln^q x} dx$ 收敛当且仅当 $q > 1$.

综上所述, $\int_1^\infty \frac{1}{x^p \ln^q x} dx$ 收敛当且仅当 $p > 1, q < 1$.

□

例题 6.4 对 $a, b \in \mathbb{R}$, 判断 $\int_0^\infty \frac{\sin x^b}{x^a} dx$ 的收敛性和绝对收敛性.

证明 收敛性:

1. 当 $b = 0$ 时, 此时 $\int_0^\infty \frac{\sin 1}{x^a} dx$ 必定发散.

2. 当 $b \neq 0$ 时, 我们有

$$\int_0^{+\infty} \frac{\sin x^b}{x^a} dx \stackrel{y=x^b}{=} \frac{1}{|b|} \int_0^{+\infty} \frac{\sin y}{y^{\frac{a}{b}}} y^{\frac{1}{b}-1} dy = \frac{1}{|b|} \int_0^{+\infty} \frac{\sin y}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy. \quad (6.2)$$

(a). 先考虑 $\int_0^1 \frac{\sin y}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy$. 注意到

$$\frac{\sin y}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} \sim \frac{1}{y^{\frac{a-1}{b}}}, x \rightarrow 0^+.$$

因此 $\int_0^1 \frac{\sin y}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy$ 收敛当且仅当 $\frac{a-1}{b} < 1$.

(b). 再考虑 $\int_1^{+\infty} \frac{\sin y}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy$.

I. 当 $\frac{a-1}{b} + 1 \leq 0$ 时, 我们有

$$\begin{aligned} \left| \int_{\frac{\pi}{4}+2n\pi}^{\frac{\pi}{2}+2n\pi} \frac{\sin y}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy \right| &\geq \left(\frac{\pi}{4} + 2n\pi \right)^{-(\frac{a-1}{b}+1)} \left| \int_{\frac{\pi}{4}+2n\pi}^{\frac{\pi}{2}+2n\pi} \sin y dy \right| \\ &= \left(\frac{\pi}{4} \right)^{-(\frac{a-1}{b}+1)} \left| \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} \sin y dy \right| = \left(\frac{\pi}{4} \right)^{-(\frac{a-1}{b}+1)} \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right), \forall n \in \mathbb{N}. \end{aligned}$$

因此由 Cauchy 收敛准则可知, 此时 $\int_1^{+\infty} \frac{\sin y}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy$ 发散.

II. 当 $\frac{a-1}{b} + 1 > 0$ 时, 我们有

$$\left| \int_0^x \sin y dy \right| = |1 - \cos x| \leq 2 (\forall x > 0), \quad \frac{1}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} \text{ 单调递减趋于0 } (y \rightarrow +\infty).$$

于是由 Dirichlet 判别法可知, 此时 $\int_1^{+\infty} \frac{\sin y}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy$ 收敛.

综上, $\int_0^\infty \frac{\sin x^b}{x^a} dx$ 收敛当且仅当 $b \neq 0$ 且 $-1 < \frac{a-b}{b} < 1$.

绝对收敛性: 在 $-1 < \frac{a-1}{b} < 1, b \neq 0$ 情况下, 先考虑 $\int_0^1 \frac{|\sin y|}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy$. 我们有

$$\frac{|\sin y|}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} \sim \frac{1}{y^{\frac{a-1}{b}}}, x \rightarrow 0^+.$$

又因为 $\frac{a-1}{b} < 1$, 所以 $\int_0^1 \frac{1}{y^{\frac{a-1}{b}}} dy$ 必收敛, 因此 $\int_0^1 \frac{|\sin y|}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy$ 必绝对收敛.

再考虑 $\int_1^{+\infty} \frac{|\sin y|}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy$. 当 $\frac{a-1}{b} > 0$, 注意到由(6.2)知道

$$\int_1^{+\infty} \frac{\sin x^b}{x^a} dx = \frac{1}{|b|} \int_1^\infty \frac{|\sin y|}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy \leq \frac{1}{|b|} \int_1^\infty \frac{1}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy < \infty,$$

故此时 $\int_1^{+\infty} \frac{|\sin y|}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy$ 绝对收敛.

当 $\frac{a-1}{b} \leq 0$, 我们有

$$\begin{aligned} \frac{1}{|b|} \int_1^\infty \frac{|\sin y|}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy &\geq \frac{1}{|b|} \int_1^\infty \frac{|\sin y|^2}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy = \frac{1}{2|b|} \int_1^\infty \frac{1 - \cos(2y)}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy \\ &= \frac{1}{2|b|} \int_1^\infty \frac{1}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy - \frac{1}{2|b|} \int_1^\infty \frac{\cos(2y)}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy \end{aligned}$$

因为 $-1 < \frac{a-1}{b}$, 所以 $\int_1^\infty \frac{1}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy$ 发散, 由 Dirichlet 判别法可知 $\int_1^\infty \frac{\cos(2y)}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy$ 收敛. 故此时 $\int_1^{+\infty} \frac{|\sin y|}{y^{\frac{a-1}{b}+1}} dy$ 发散.

综上, 这就证明了原积分在 $-1 < \frac{a-1}{b} \leq 0, b \neq 0$ 情况下条件收敛, $0 < \frac{a-1}{b} < 1, b \neq 0$ 情况下绝对收敛.

□

例题 6.5 判断收敛性 $\int_{e^2}^\infty \frac{1}{\ln^{\ln x} x} dx$.

笔记 注意运用 $x^\square = e^{\square \ln x} = (e^\square)^{\ln x}$.

证明 注意到

$$\begin{aligned} \int_{e^2}^\infty \frac{1}{\ln^{\ln x} x} dx &= \int_{e^2}^\infty \frac{1}{e^{\ln x \cdot \ln \ln x}} dx = \int_{e^2}^\infty \frac{1}{e^{\ln x \cdot \ln \ln x}} dx \\ &= \int_{e^2}^{+\infty} \frac{1}{x^{\ln \ln x}} dx = \int_{e^2}^{e^{e^2}} \frac{1}{x^{\ln \ln x}} dx + \int_{e^{e^2}}^\infty \frac{1}{x^{\ln \ln x}} dx \\ &\leq \int_{e^2}^{e^{e^2}} \frac{1}{x^{\ln \ln x}} dx + \int_{e^{e^2}}^\infty \frac{1}{x^2} dx < +\infty. \end{aligned}$$

故原积分收敛.

□

例题 6.6 判断收敛性和绝对收敛性:

$$1. \int_1^\infty \tan\left(\frac{\sin x}{x}\right) dx,$$

$$2. \int_2^\infty \frac{\sin x}{x^p(x^p + \sin x)} dx, p > 0.$$

笔记 经验上, Taylor 公式应该展开到余项里面的函数绝对收敛为止.

证明

1. 由 Taylor 公式可知

$$\tan \frac{\sin x}{x} = \frac{\sin x}{x} + O\left(\frac{\sin^3 x}{x^3}\right), x \rightarrow +\infty. \quad (6.3)$$

由 Dirichlet 判别法可知 $\int_1^\infty \frac{\sin x}{x} dx$ 收敛, 显然有 $\int_1^\infty \frac{\sin x}{x} dx$ 条件收敛. 注意到

$$\left| O\left(\frac{\sin^3 x}{x^3}\right) \right| \leq M \left| \frac{\sin x}{x} \right|^3 \leq \frac{M}{x^3}, x \rightarrow +\infty.$$

故 $\int_1^\infty O\left(\frac{\sin^3 x}{x^3}\right) dx$ 绝对收敛. 因此由(6.3)式可得 $\int_1^\infty \tan \frac{\sin x}{x} dx$ 条件收敛.

2. 注意到

$$\int_2^{+\infty} \frac{\sin x}{x^p(x^p + \sin x)} dx = \int_2^{+\infty} \frac{\frac{\sin x}{x^p}}{x^p(1 + \frac{\sin x}{x^p})} dx.$$

取 $m \in \mathbb{N}$, 使 $m > \frac{1}{p} - 1$. 由 Taylor 公式可知

$$\frac{t}{1+t} = t - t^2 + \cdots + (-1)^m t^{m-1} + O(t^m), t \rightarrow 0^+.$$

从而

$$\frac{\frac{\sin x}{x^p}}{x^p(1 + \frac{\sin x}{x^p})} = \frac{\sin x}{x^{2p}} - \frac{\sin^2 x}{x^{3p}} + \cdots + (-1)^m \frac{\sin^{m-1} x}{x^{mp}} + O\left(\frac{\sin^m x}{x^{(m+1)p}}\right), x \rightarrow +\infty. \quad (6.4)$$

注意到

$$\frac{\sin^2 x}{x^{3p}} = \frac{1}{2x^{3p}} - \frac{\cos 2x}{x^{3p}}, \quad (6.5)$$

(i) 当 $p \leq \frac{1}{3}$ 时, 有 $\int_2^{+\infty} \frac{1}{2x^{3p}} dx$ 发散, 从而此时 $\int_2^{+\infty} \frac{\sin x}{x^p(x^p + \sin x)} dx$ 发散.

(ii) 当 $p > \frac{1}{3}$ 时, 有 $\int_2^{+\infty} \frac{1}{2x^{3p}} dx$ 收敛, 并且由 Dirichlet 判别法可知 $\int_2^{+\infty} \frac{\sin x}{x^{2p}} dx, \int_2^{+\infty} \frac{\cos 2x}{x^{3p}} dx$ 收敛. 从而

由(6.5)式可知, 此时 $\int_2^{+\infty} \frac{\sin^2 x}{x^{3p}} dx$ 收敛. 又因为对 $\forall k \geq 2$, 都有

$$\left| \frac{\sin^k x}{x^{(k+1)p}} \right| \leq \frac{1}{x^{(k+1)p}} \leq \frac{1}{x^{3p}}, \forall x > 2.$$

而 $\int_2^{+\infty} \frac{1}{x^{3p}} dx$ 收敛, 所以此时 $\int_2^{+\infty} \frac{\sin^k x}{x^{(k+1)p}} dx$ 都绝对收敛. 故由(6.4)式可知, 此时原积分收敛.

综上, 原积分在 $p \leq \frac{1}{3}$ 时发散, $p > \frac{1}{3}$ 收敛. 再讨论绝对收敛性.

(a). 当 $p > \frac{1}{2}$ 时, 由 M 判别法易知 $\int_2^{+\infty} \frac{\sin^k x}{x^{(k+1)p}} dx (1 \leq k \leq m)$ 绝对收敛. 再由(6.4)式可知, 此时原积分绝对收敛.

(b). 当 $\frac{1}{3} < p \leq \frac{1}{2}$ 时, 我们有

$$\left| \frac{\sin x}{x^{2p}} \right| \geq \frac{\sin^2 x}{x^{2p}} = \frac{1}{2x^{2p}} - \frac{\cos 2x}{2x^{2p}}.$$

显然 $\int_2^{+\infty} \frac{1}{2x^{2p}} dx$ 发散, 故此时 $\int_2^{+\infty} \frac{\sin x}{x^{2p}} dx$ 条件收敛. 注意到对 $\forall k \geq 2$, 都有

$$\left| \frac{\sin^k x}{x^{(k+1)p}} \right| \leq \frac{1}{x^{(k+1)p}} \leq \frac{1}{x^{3p}}, \forall x > 2.$$

而显然此时 $\int_2^{+\infty} \frac{1}{x^{3p}} dx$ 收敛, 故 $\int_2^{+\infty} \frac{\sin^k x}{x^{(k+1)p}} dx (2 \leq k \leq m)$ 绝对收敛. 因此再由(6.4)式及命题 6.1(3)可知原积分此时条件收敛. □

例题 6.7 设 $f(x)$ 在 \mathbb{R} 上非负连续, 对任意正整数 k 有 $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{|x|}{k}} f(x) dx \leq 1$, 证明: $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx \leq 1$.

注 实际上, 由实变函数相关结论可直接得到

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}} e^{-\frac{|x|}{k}} f(x) dx = \int_{\mathbb{R}} \left[\lim_{k \rightarrow \infty} e^{-\frac{|x|}{k}} f(x) \right] dx = \int_{\mathbb{R}} f(x) dx.$$

证明 由条件可得, 对 $\forall A > 0$, 我们有

$$1 \geq \int_{-A}^A e^{-\frac{|x|}{k}} f(x) dx \geq e^{-\frac{1}{k}} \int_{-A}^A f(x) dx \implies \int_{-A}^A f(x) dx \leq e^{-\frac{1}{k}}, \forall k \in \mathbb{N}.$$

令 $k \rightarrow \infty$, 则 $\int_{-A}^A f(x) dx \leq 1, \forall A > 0$. 于是再令 $A \rightarrow +\infty$, 可得 $\int_{\mathbb{R}} f(x) dx \leq 1$.

实际上再由单调有界可知 $\int_{\mathbb{R}} f(x) dx$ 收敛. □

例题 6.8 对实数 a , 讨论 $\int_0^{\infty} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx$ 的敛散性.

证明 证法一: 先讨论 $\int_0^1 \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx$ 的敛散性. 注意到

$$\int_0^1 \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx \leq \int_0^1 \frac{1}{\cos^2 x} dx = \tan x \Big|_0^1 = \tan 1 < \infty, \quad \forall a \in \mathbb{R}.$$

故 $\forall a \in \mathbb{R}$, 都有 $\int_0^1 \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx$ 收敛. 再讨论 $\int_1^{\infty} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx$ 的敛散性.

(i) 当 $a \leq 2$ 时,

$$\int_1^{\infty} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx \geq \int_1^{\infty} \frac{x}{\cos^2 x + x^2 \sin^2 x} dx \geq \int_1^{\infty} \frac{x}{x^2 + 1} dx = \frac{1}{2} \int_1^{\infty} \frac{1}{x^2 + 1} d(x^2 + 1) = +\infty.$$

(ii) 当 $a > 2$ 时, 我们有 (等价关系直观上是显然的, 可由拟合法或放缩严谨证明)

$$\int_{n\pi}^{(n+1)\pi} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx = \int_0^{\pi} \frac{x + n\pi}{\cos^2 x + (x + n\pi)^a \sin^2 x} dx \sim n\pi \int_0^{\pi} \frac{1}{\cos^2 x + (n\pi)^a \sin^2 x} dx, \quad n \rightarrow \infty. \quad (6.6)$$

注意到对 $\forall \lambda > 0$, 我们都有

$$\int_0^{\pi} \frac{1}{\cos^2 x + \lambda \sin^2 x} dx = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\cos^2 x + \lambda \sin^2 x} dx = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{1 + \lambda \tan^2 x} \cdot \frac{1}{\cos^2 x} dx = 2 \int_0^{\infty} \frac{1}{1 + \lambda t^2} dt = \frac{\pi}{\sqrt{\lambda}}.$$

故再结合(6.6)式可知

$$\int_{n\pi}^{(n+1)\pi} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx \sim n\pi \int_0^{\pi} \frac{1}{\cos^2 x + (n\pi)^a \sin^2 x} dx \sim n\pi \frac{\pi}{(n\pi)^{\frac{a}{2}}} \sim \frac{1}{n^{\frac{a}{2}-1}}, \quad n \rightarrow \infty.$$

由于被积函数非负, 因此再结合**命题 6.3**可知

$$\int_1^{\infty} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx \sim \int_{\pi}^{\infty} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{n\pi}^{(n+1)\pi} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx \sim \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{\frac{a}{2}-1}}, \quad n \rightarrow \infty.$$

从而当 $\frac{a}{2}-1 \leq 1$ 时, 即 $2 < a \leq 4$, $\int_1^{\infty} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx$ 发散; 当 $\frac{a}{2}-1 > 1$, 即 $a > 4$ 时, $\int_1^{\infty} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx$ 收敛.

综上, 当 $a > 4$ 时, $\int_0^{\infty} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx$ 收敛; 当 $a \leq 4$ 时, $\int_0^{\infty} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx$ 发散.

证法二: 由于被积函数非负, 因此由**命题 6.3**可知

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{n\pi} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{(n-1)\pi}^{n\pi} \frac{x}{\cos^2 x + x^a \sin^2 x} dx \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\pi} \frac{(n-1)\pi + y}{\cos^2 y + [(n-1)\pi + y]^a \sin^2 y} dy. \end{aligned}$$

一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\pi} \frac{(n-1)\pi + y}{\cos^2 y + [(n-1)\pi + y]^a \sin^2 y} dy &\leq \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\pi} \frac{n\pi}{\cos^2 y + [(n-1)\pi]^a \sin^2 y} dy = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2n\pi}{\cos^2 y + [(n-1)\pi]^a \sin^2 y} dy \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\frac{2n\pi}{\cos^2 y}}{1 + [(n-1)\pi]^a \tan^2 y} dy \stackrel{t=\tan y}{=} 2\pi \sum_{n=1}^{\infty} n \int_0^{+\infty} \frac{dt}{1 + [(n-1)\pi]^a t^2} \end{aligned}$$

$$= \pi^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{\sqrt{[(n-1)\pi]^a}} \sim \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_1}{n^{\frac{a}{2}-1}}, n \rightarrow \infty.$$

故当 $a < 4$ 时, 有 $\frac{a}{2} - 1 < 1$, 此时原积分收敛. 另一方面, 我们有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\pi} \frac{(n-1)\pi + y}{\cos^2 y + [(n-1)\pi + y]^a \sin^2 y} dy &\geq \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\pi} \frac{(n-1)\pi}{\cos^2 y + (n\pi)^a \sin^2 y} dy = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2(n-1)\pi}{\cos^2 y + (n\pi)^a \sin^2 y} dy \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\frac{2(n-1)\pi}{\cos^2 y}}{1 + (n\pi)^a \tan^2 y} dy \xrightarrow{t=\tan y} 2\pi \sum_{n=1}^{\infty} (n-1) \int_0^{+\infty} \frac{dt}{1 + (n\pi)^a t^2} \\ &= \pi^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n-1}{\sqrt{(n\pi)^a}} \sim \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_2}{n^{\frac{a}{2}-1}}, n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

故当 $a \geq 4$ 时, 有 $\frac{a}{2} - 1 \geq 1$, 此时原积分发散.

□

例题 6.9 对 $x > 0$, 判断积分 $\int_0^{\infty} \frac{[t] - t + a}{t+x} dt$ 收敛性.

证明 注意到

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_1^n \frac{[t] - t + a}{t+x} dt &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{n-1} \int_k^{k+1} \frac{k - t + a}{t+x} dt = \sum_{k=1}^{\infty} \int_k^{k+1} \frac{k - t + a}{t+x} dt \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \left[(a + k + x) \ln \left(1 + \frac{1}{k+x} \right) - 1 \right] = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{a - \frac{1}{2}}{k} + O \left(\frac{1}{k^2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (6.7)$$

故当 $a \neq \frac{1}{2}$ 时, 有 $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{a - \frac{1}{2}}{k}$ 发散, 从而结合(6.7)式可知, 此时 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_1^n \frac{[t] - t + \frac{1}{2}}{t+x} dt$ 不存在. 因此由子列极限命题

(a) 可知, 此时 $\int_0^{\infty} \frac{[t] - t + a}{t+x} dt$ 发散.

当 $a = \frac{1}{2}$ 时, 由(6.7)式知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_1^n \frac{[t] - t + \frac{1}{2}}{t+x} dt = \sum_{k=1}^{\infty} O \left(\frac{1}{k^2} \right) \leq M \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} < \infty. \quad (6.8)$$

对 $\forall y > 0$, 存在唯一 $n \in \mathbb{N}$, 使得 $n \leq y < n+1$. 于是

$$\int_0^y \frac{[t] - t + \frac{1}{2}}{t+x} dt = \int_0^n \frac{[t] - t + \frac{1}{2}}{t+x} dt + \int_n^y \frac{[t] - t + \frac{1}{2}}{t+x} dt. \quad (6.9)$$

注意到

$$\left| \int_n^y \frac{[t] - t + \frac{1}{2}}{t+x} dt \right| \leq \int_n^y \frac{1 + \frac{1}{2}}{t+x} dt \leq \frac{3}{2} \int_n^{n+1} \frac{1}{t+x} dt = \frac{3}{2} \ln \frac{n+1+x}{n+x}.$$

当 $y \rightarrow +\infty$ 时, 有 $n \rightarrow +\infty$, 故 $\int_n^y \frac{[t] - t + \frac{1}{2}}{t+x} dt \rightarrow 0, y \rightarrow +\infty$. 再结合(6.8)(6.9)式可知

$$\int_0^{\infty} \frac{[t] - t + \frac{1}{2}}{t+x} dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^n \frac{[t] - t + \frac{1}{2}}{t+x} dt < \infty.$$

故当 $a = \frac{1}{2}$ 时, $\int_0^{\infty} \frac{[t] - t + \frac{1}{2}}{t+x} dt$ 收敛.

□

例题 6.10 对正整数 n , 讨论 $\int_0^{+\infty} x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx$ 的敛散性.

证明 注意到

$$\int_{k\pi}^{(k+1)\pi} x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx = \int_0^{\pi} (x + k\pi)^n e^{-(x+k\pi)^{12} \sin^2 x} dx \sim (k\pi)^n \int_0^{\pi} e^{-(x+k\pi)^{12} \sin^2 x} dx, \quad k \rightarrow \infty. \quad (6.10)$$

又注意到

$$\int_0^\pi e^{-\lambda \sin^2 x} dx = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-\lambda \sin^2 x} dx \geq 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-\lambda x^2} dx = \frac{2}{\sqrt{\lambda}} \int_0^{\frac{\pi}{2}\sqrt{\lambda}} e^{-x^2} dx \sim \sqrt{\frac{\pi}{\lambda}}, \quad \lambda \rightarrow +\infty,$$

$$\int_0^\pi e^{-\lambda \sin^2 x} dx = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-\lambda \sin^2 x} dx \leq 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-\lambda \frac{4}{\pi^2} x^2} dx = \frac{\pi}{\sqrt{\lambda}} \int_0^{\sqrt{\lambda}} e^{-x^2} dx \sim \frac{\pi \sqrt{\pi}}{2\sqrt{\lambda}}, \quad \lambda \rightarrow +\infty.$$

故 $\int_0^\pi e^{-\lambda \sin^2 x} dx \sim \frac{C}{\sqrt{\lambda}}, \lambda \rightarrow +\infty$, 其中 C 为某一常数. 因此

$$\int_0^\pi e^{-(k\pi)^{12} \sin^2 x} dx \sim \frac{C}{(k\pi)^6}, \quad k \rightarrow +\infty,$$

$$\int_0^\pi e^{-[(k+1)\pi]^{12} \sin^2 x} dx \sim \frac{C}{[(k+1)\pi]^6}, \quad k \rightarrow +\infty.$$

又因为

$$\int_0^\pi e^{-[(k+1)\pi]^{12} \sin^2 x} dx \leq \int_0^\pi e^{-(x+k\pi)^{12} \sin^2 x} dx \leq \int_0^\pi e^{-(k\pi)^{12} \sin^2 x} dx,$$

所以 $\int_0^\pi e^{-(x+k\pi)^{12} \sin^2 x} dx \sim \frac{C_1}{k^6}, k \rightarrow +\infty$, 其中 C_1 为某一常数. 于是结合(6.10)式可知

$$\int_{k\pi}^{(k+1)\pi} x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx = \int_0^\pi (x+k\pi)^n e^{-(x+k\pi)^{12} \sin^2 x} dx \sim (k\pi)^n \int_0^\pi e^{-(x+k\pi)^{12} \sin^2 x} dx \sim C_2 k^{n-6}, \quad k \rightarrow \infty.$$

其中 C_2 为某一常数. 因此再结合命题 6.3 可得

$$\int_\pi^\infty x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_0^{k\pi} x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx = \sum_{k=1}^\infty \int_{k\pi}^{(k+1)\pi} x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx \sim \sum_{k=1}^\infty C_2 k^{n-6}, \quad k \rightarrow \infty.$$

故当 $n < 5$ 时, $\int_\pi^\infty x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx$ 收敛; 当 $n \geq 5$ 时, $\int_\pi^\infty x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx$ 发散. 又因为

$$\int_0^\pi x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx \leq \pi^n,$$

所以 $\int_0^\pi x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx$ 对 $\forall n \in \mathbb{N}$ 都收敛. 从而由

$$\int_0^\infty x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx = \int_0^\pi x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx + \int_\pi^\infty x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx,$$

可知当 $n < 5$ 时, $\int_0^\infty x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx$ 收敛; 当 $n \geq 5$ 时, $\int_0^\infty x^n e^{-x^{12} \sin^2 x} dx$ 发散.

□

例题 6.11 设 p, q 为正整数, 求反常积分 $I(p, q) = \int_0^{+\infty} \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx$ 收敛的充要条件.

证明 因为当 $p = q$ 时, 积分显然收敛, 所以只需考虑 $p \neq q$ 的情形. 由 $I(q, p) = -I(p, q)$ 可知, 可以不妨设 $p > q$,

否则用 $I(q, p) = -I(p, q)$ 代替 $I(p, q)$ 即可

先讨论 $\int_0^1 \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx$ 的敛散性. 由 Taylor 定理可知, 对 $\forall \varepsilon \in (0, 1)$, 存在 $\delta > 0$, 使得

$$-\frac{x^2}{2} - \varepsilon x^2 \leq \cos x \leq 1 - \frac{x^2}{2} + \varepsilon x^2, \quad \forall x \in [0, \delta].$$

于是

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx &= \int_0^\delta \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx + \int_\delta^1 \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx \\ &\leq \int_0^\delta \frac{(1 - \frac{x^2}{2} + \varepsilon x^2)^p - (1 - \frac{x^2}{2} - \varepsilon x^2)^q}{x} dx + \frac{2}{\delta}(1 - \delta) \\ &\leq \int_0^\delta \frac{\frac{q-p+(p-q)\varepsilon}{2}x^2 + (p+q)C_p^2 x^4}{x} dx + \frac{2}{\delta}(1 - \delta) \\ &= \frac{q-p+(p-q)\varepsilon}{4}\delta + \frac{(p+q)C_p^2}{4}\delta + \frac{2}{\delta}(1 - \delta). \end{aligned}$$

令 $\varepsilon \rightarrow 0^+$, 得 $\int_0^1 \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx \leq \frac{q-p}{4} \delta + \frac{(p+q)C_p^2}{4} \delta + \frac{2}{\delta}(1-\delta)$. 故对 $\forall p > q$ 且 $p, q \in \mathbb{N}$, 都有 $\int_0^1 \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx$ 收敛.

再讨论 $\int_1^\infty \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx$ 的敛散性.

(i) 当 p, q 都是奇数时, 由定理 A.13 可知

$$\cos^p x = \sum_{k=1}^p p_k \cos kx, \quad \text{其中 } p_k \in \mathbb{R}, k = 1, 2, \dots, p.$$

$$\cos^q x = \sum_{k=1}^q q_k \cos kx, \quad \text{其中 } q_k \in \mathbb{R}, k = 1, 2, \dots, q.$$

从而此时

$$\begin{aligned} \int_1^\infty \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx &= \int_1^\infty \frac{\sum_{k=1}^p p_k \cos kx - \sum_{k=1}^q q_k \cos kx}{x} dx \\ &= \sum_{k=1}^q (p_k - q_k) \int_1^\infty \frac{\cos kx}{x} dx + \sum_{k=q+1}^p p_k \int_1^\infty \frac{\cos kx}{x} dx. \end{aligned}$$

注意到对 $\forall k \in \mathbb{N}$ 都有

$$\int_1^x \cos ktdt = \frac{\sin kx - \sin k}{k} < 2, \quad \forall x > 1.$$

并且 $\frac{1}{x}$ 在 $[1, +\infty)$ 上单调递减趋于 0, 故由 Dirichlet 判别法可知, $\int_1^\infty \frac{\cos kx}{x} dx (k \in \mathbb{N})$ 都收敛. 因此再结合(??)式可知, $\int_1^\infty \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx$ 收敛.

(ii) 当 p, q 中至少有一个是偶数时, 不妨设 p 是偶数 q 不是偶数, 则由定理 A.13 可知

$$\cos^p x = \frac{1}{2^{p-1}} \sum_{k=0}^{\frac{p}{2}-1} C_p^k \cos 2\left(\frac{p}{2}-k\right)x + \frac{C_p^{\frac{p}{2}}}{2^p}.$$

$$\cos^q x = \sum_{k=1}^q q_k \cos kx \quad \text{其中 } q_k \in \mathbb{R} \quad k = 1, 2, \dots, q.$$

于是

$$\begin{aligned} \int_1^\infty \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx &= \int_1^\infty \frac{\frac{1}{2^{p-1}} \sum_{k=0}^{\frac{p}{2}-1} C_p^k \cos 2\left(\frac{p}{2}-k\right)x - \sum_{k=1}^q q_k \cos kx + \frac{C_p^{\frac{p}{2}}}{2^p}}{x} dx \\ &= \int_1^\infty \frac{\frac{1}{2^{p-1}} \sum_{k=0}^{\frac{p}{2}-1} C_p^k \cos 2\left(\frac{p}{2}-k\right)x - \sum_{k=1}^q q_k \cos kx}{x} dx + \frac{C_p^{\frac{p}{2}}}{2^p} \int_1^\infty \frac{1}{x} dx. \end{aligned}$$

由于 $\int_1^\infty \frac{1}{x} dx$ 发散, 故此时 $\int_1^\infty \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx$ 也发散.
综上, 由

$$\int_0^\infty \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx = \int_0^1 \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx + \int_1^\infty \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx.$$

可知当 $p = q$ 或 p, q 均为奇数时, $\int_0^\infty \frac{\cos^p x - \cos^q x}{x} dx$ 收敛, 其余情形均发散.

□

例题 6.12 对实数 $p \neq 0$, 讨论 $I = \int_0^1 \frac{\cos(\frac{1}{1-x})}{\sqrt[3]{1-x^2}} dx$ 的敛散性.

证明 对 I 进行积分换元可得

$$\begin{aligned} I &= \int_0^1 \frac{\cos\left(\frac{1}{1-x}\right)}{\sqrt[3]{1-x^2}} dx \stackrel{u=\frac{1}{1-x}}{=} \int_1^\infty \frac{\cos u}{\left(1-\left(1-\frac{1}{u}\right)^2\right)^{\frac{1}{3}} \cdot u^2} du \\ &= \int_1^\infty \frac{\cos u}{\left(\frac{2}{u}-\frac{1}{u^2}\right)^{\frac{1}{3}} u^2} du = \int_1^\infty \frac{\cos u}{\left(2-\frac{1}{u}\right)^{\frac{1}{3}} u^{2-\frac{1}{p}}} du. \end{aligned} \quad (6.11)$$

(i) 当 $p > \frac{1}{2}$ 时, 令 $f(u) = \left[\left(2-\frac{1}{u}\right)^{\frac{1}{p}} u^{2-\frac{1}{p}}\right]^p = \left(2-\frac{1}{u}\right) u^{2p-1}$, 则显然有 $\lim_{u \rightarrow +\infty} f(u) = +\infty$ 且 $f(u)$ 递增. 于

是 $\frac{1}{\left(\frac{2}{u}-\frac{1}{u^2}\right)^{\frac{1}{3}} u^2} = \frac{1}{\sqrt[3]{f(u)}}$ 在 $[1, +\infty)$ 上单调递减趋于 0. 又显然有 $\int_1^A \cos x dx$ 关于 A 有界, 所以结合(6.11)式, 再

由 Dirichlet 判别法可知 I 收敛.

(ii) 当 $p \in \left[0, \frac{1}{2}\right]$ 时, 若 $p = \frac{1}{2}$, 则 $\lim_{u \rightarrow +\infty} \frac{1}{\left(2-\frac{1}{u}\right)^{\frac{1}{3}} u^{2-\frac{1}{p}}} = 2$; 若 $p \in \left(0, \frac{1}{2}\right)$, 则 $\lim_{u \rightarrow +\infty} \frac{1}{\left(2-\frac{1}{u}\right)^{\frac{1}{3}} u^{2-\frac{1}{p}}} = +\infty$. 因

此对 $\forall p \in \left[0, \frac{1}{2}\right]$, 都存在 $K > 0$, 使得

$$\frac{1}{\left(2-\frac{1}{u}\right)^{\frac{1}{3}} u^{2-\frac{1}{p}}} \geq 1, \forall u > K.$$

于是对 $\forall k \in \mathbb{N} \cap (K, +\infty)$, 都有

$$\left| \int_{\frac{k\pi}{2}}^{\frac{(k+1)\pi}{2}} \frac{\cos u}{\left(2-\frac{1}{u}\right)^{\frac{1}{3}} u^{2-\frac{1}{p}}} du \right| \geq \left| \int_{\frac{k\pi}{2}}^{\frac{(k+1)\pi}{2}} \cos u du \right| = 1.$$

故由 Cauchy 收敛准则可知, $I = \int_1^\infty \frac{\cos u}{\left(2-\frac{1}{u}\right)^{\frac{1}{3}} u^{2-\frac{1}{p}}} du$ 发散.

(iii) 当 $p < 0$ 时, 显然有 $\lim_{u \rightarrow +\infty} \frac{1}{\left(2-\frac{1}{u}\right)^{\frac{1}{3}} u^{2-\frac{1}{p}}} = 0$. 令 $g(u) = \left(2-\frac{1}{u}\right)^{\frac{1}{p}} u^{2-\frac{1}{p}}$, 则

$$g'(u) = \frac{2}{p} u^{-\frac{1}{p}} \left(2-\frac{1}{u}\right)^{\frac{1}{p}-1} + \left(2-\frac{1}{p}\right) \left(2-\frac{1}{u}\right)^{\frac{1}{p}} u^{1-\frac{1}{p}} > 0, \forall u \in [1, +\infty).$$

因此 $g(u)$ 单调递增, 于是 $\frac{1}{\left(2-\frac{1}{u}\right)^{\frac{1}{3}} u^{2-\frac{1}{p}}} = \frac{1}{g(u)}$ 单调递减趋于 0. 又显然有 $\int_1^A \cos x dx$ 关于 A 有界, 所以结合(6.11)式, 再由 Dirichlet 判别法可知 I 收敛.

□

例题 6.13 对实数 p , 讨论反常积分 $\int_0^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 的敛散性.

注 令 $u = x + \frac{1}{x}$, 则

$$\int_1^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx = \int_u^\infty \frac{\sin u}{\left(u + \sqrt{u^2 - 4}\right)^p} \left(1 + \frac{u}{\sqrt{u^2 - 4}}\right) du.$$

显然 $\int_0^A \sin u du$ 关于 A 有界. 再证明 $\frac{1 + \frac{u}{\sqrt{u^2 - 4}}}{\left(u + \sqrt{u^2 - 4}\right)^p}$ 单调递减趋于 0, 就能利用 Dirichlet 判别法得到 $\int_1^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 收敛. 再同理讨论 $\int_0^1 \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 即可. 这种方法虽然能做, 但是比较繁琐, 不适合考场中使用.

证明 显然 $\int_0^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 有两个奇点 $x = 0, +\infty$.

(1) 当 $p \leq 0$ 时, 考虑区间 $\left[2n\pi + \frac{\pi}{4}, 2n\pi + \frac{3\pi}{4}\right]$, 则

$$x + \frac{1}{x} \in \left[2n\pi + \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2n\pi + \frac{\pi}{4}}, 2n\pi + \frac{3\pi}{4} + \frac{1}{2n\pi + \frac{3\pi}{4}}\right].$$

于是当 $n > 10$ 时, 我们有

$$\begin{aligned} \int_{2n\pi + \frac{\pi}{4}}^{2n\pi + \frac{3\pi}{4}} \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx &\geq \int_{2n\pi + \frac{\pi}{4}}^{2n\pi + \frac{3\pi}{4}} \sin\left(x + \frac{1}{x}\right) dx \\ &\geq \int_{2n\pi + \frac{\pi}{4}}^{2n\pi + \frac{3\pi}{4}} \sin\left(2n\pi + \frac{3\pi}{4} + \frac{1}{2n\pi + \frac{3\pi}{4}}\right) dx \\ &= \frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{3\pi}{4} + \frac{1}{2n\pi + \frac{3\pi}{4}}\right) > 0. \end{aligned}$$

因此由 Cauchy 收敛准则可知 $\int_1^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 发散. 故此时 $\int_0^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 发散.

(2) 当 $p > 0$ 时, 先考虑 $\int_1^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$.

(i) 若 $p > 1$, 则

$$\int_1^\infty \left| \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} \right| dx \leq \int_1^\infty \frac{1}{x^p} dx < \infty.$$

因此 $\int_1^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 绝对收敛.

(ii) 若 $p \in (0, 1]$, 则

$$\int_1^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx = \int_1^\infty \sin x \frac{\cos \frac{1}{x}}{x^p} dx + \int_1^\infty \cos x \frac{\sin \frac{1}{x}}{x^p} dx. \quad (6.12)$$

显然 $\int_1^A \cos x dx$ 关于 A 有界, 并且 $\frac{\sin \frac{1}{x}}{x^p}$ 在 $[1, +\infty)$ 上单调递减趋于 0, 故由 Dirichlet 判别法可知 $\int_1^\infty \cos x \frac{\sin \frac{1}{x}}{x^p} dx$ 收敛. 令 $f(u) = u^p \cos u$, 则当 $u \in \left(0, \frac{4p}{\pi}\right)$ 时, 有

$$f'(u) = pu^{p-1} \cos u - u^p \sin u = u^{p-1} \cos u (p - u \tan u) > 0.$$

于是 $f(u)$ 在 $\left(0, \frac{4p}{\pi}\right)$ 上单调递增, 从而 $\frac{\cos \frac{1}{x}}{x^p} = f\left(\frac{1}{x}\right)$ 在 $\left(\frac{\pi}{4}p, +\infty\right)$ 上单调递减趋于 0. 又显然 $\int_{\frac{\pi}{4}p}^A \sin x dx$ 关于 A 有界, 故由 Dirichlet 判别法可知 $\int_{\frac{\pi}{4}p}^\infty \sin x \frac{\cos \frac{1}{x}}{x^p} dx$ 收敛, 又 $\frac{\pi}{4}p < 1$, 故此时 $\int_1^\infty \sin x \frac{\cos \frac{1}{x}}{x^p} dx$ 收敛. 因此再由(6.12)式可知 $\int_1^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 收敛.

注意到

$$\int_1^\infty \left| \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} \right| dx \geq \int_1^\infty \frac{\sin^2(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx = \frac{1}{2} \int_1^\infty \frac{1}{x^p} dx + \frac{1}{2} \int_1^\infty \frac{\cos(2x + \frac{2}{x})}{x^p} dx.$$

显然 $\int_1^\infty \frac{1}{x^p} dx$ 发散. 故此时 $\int_1^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 条件收敛, 但不绝对收敛.

再考虑 $\int_0^1 \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$.

①若 $p \in (0, 1)$, 则

$$\int_0^1 \left| \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} \right| dx \leq \int_0^1 \frac{1}{x^p} dx < \infty.$$

故此时 $\int_0^1 \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 绝对收敛.

②若 $p \geq 1$, 则

$$\int_0^1 \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx \xrightarrow{x=\frac{1}{t}} \int_1^\infty \frac{\sin(t + \frac{1}{t})}{t^{2-p}} dt.$$

此时 $2-p \leq 1$. 于是当 $2-p \leq 0$ 即 $p \geq 2$ 时, 由(1)可知 $\int_0^1 \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 发散. 当 $2-p \in (0, 1]$ 即 $p \in [1, 2)$ 时,

由(i)可知 $\int_0^1 \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 条件收敛, 但不绝对收敛.

综上, 当 $p \leq 0$ 时, $\int_0^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 发散; 当 $p \in (0, 2)$ 时, $\int_0^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 条件收敛; 当 $p \geq 2$ 时, $\int_0^\infty \frac{\sin(x + \frac{1}{x})}{x^p} dx$ 发散.

□

例题 6.14 判断广义积分 $\int_1^\infty \frac{1}{x} e^{\cos x} \cos(2 \sin x) dx, \int_0^\infty \frac{1}{x} e^{\cos x} \sin(\sin x) dx$ 的敛散性.

证明 (1) 由于 $e^{\cos x} \sin(2 \sin x)$ 是周期为 2π 的奇函数, 故

$$\int_0^{2\pi} e^{\cos x} \sin(2 \sin x) dx = \int_{-\pi}^{\pi} e^{\cos x} \sin(2 \sin x) dx = 0.$$

$$\int_0^{2\pi} |e^{\cos x} \sin(2 \sin x)| dx \leq \int_0^{2\pi} e dx = 2\pi e.$$

于是

$$\begin{aligned} \int_0^A e^{\cos x} \sin(2 \sin x) dx &= \int_0^{2\pi[\frac{A}{2\pi}]} e^{\cos x} \sin(2 \sin x) dx + \int_{2\pi[\frac{A}{2\pi}]}^A e^{\cos x} \sin(2 \sin x) dx \\ &\leq 0 + \int_{2\pi[\frac{A}{2\pi}]}^A |e^{\cos x} \sin(2 \sin x)| dx \leq \int_{2\pi[\frac{A}{2\pi}]}^{2\pi([\frac{A}{2\pi}]+1)} |e^{\cos x} \sin(2 \sin x)| dx \\ &= \int_0^{2\pi} |e^{\cos x} \sin(2 \sin x)| dx \leq 2\pi e, \forall A > 2\pi. \end{aligned}$$

又显然有 $\frac{1}{x}$ 单调趋于 0, 故由 Dirichlet 判别法可知 $\int_0^\infty e^{\cos x} \sin(2 \sin x) dx$ 收敛.

(2) 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 我们有

$$\int_{2n\pi}^{2(n+2)\pi} \frac{1}{x} e^{\cos x} \cos(2 \sin x) dx \geq \frac{C}{n},$$

其中 C 为某一常数.(这里需要对上述积分进行数值估计, C 需要具体确定出来, 太麻烦暂时省略) 于是

$$\int_1^\infty \frac{1}{x} e^{\cos x} \cos(2 \sin x) dx = \sum_{n=1}^\infty \int_{2n\pi}^{2(n+2)\pi} \frac{1}{x} e^{\cos x} \cos(2 \sin x) dx \geq \sum_{n=1}^\infty \frac{C}{n} = \infty.$$

故 $\int_1^\infty \frac{1}{x} e^{\cos x} \cos(2 \sin x) dx$ 发散.

□

例题 6.15 设 $f(x) \in C^1[1, +\infty), 0 \leq f(x) \leq x^2 \ln x, f'(x) > 0$, 证明: $\int_1^{+\infty} \frac{1}{f'(x)} dx$ 发散.

笔记 首先形式计算一下, 假如 $f(x) = x^2 \ln x$, 则 $f'(x) = 2x \ln x + x$, 量级是 $x \ln x$, 代入进去刚刚好积分是发散的, 可以把这个视为取等条件, 然后对着这个取等, 使用柯西不等式(目标是去掉难以处理的分母).

证明 对任意充分大的 $b > a$, 令 $A = e^a, B = e^b$, 则由 Cauchy 不等式有

$$\int_A^B \frac{f'(x)}{x^2 \ln^2 x} dx \int_A^B \frac{1}{f'(x)} dx \geq \left(\int_A^B \frac{1}{x \ln x} dx \right)^2 = (\ln \ln B - \ln \ln A)^2 = \left(\ln \frac{\ln B}{\ln A} \right)^2.$$

注意到

$$\int_A^B \frac{f'(x)}{x^2 \ln^2 x} dx = \int_A^B \frac{1}{x^2 \ln^2 x} df(x) = \frac{f(B)}{B^2 \ln^2 B} - \frac{f(A)}{A^2 \ln^2 A} + 2 \int_A^B \frac{f(x)(\ln x + 1)}{x^3 \ln^3 x} dx,$$

故

$$\begin{aligned}
 \left(\ln \frac{\ln B}{\ln A} \right)^2 &\leq \int_A^B \frac{1}{f'(x)} dx \left[\frac{f(B)}{B^2 \ln^2 B} - \frac{f(A)}{A^2 \ln^2 A} + 2 \int_A^B \frac{f(x)(\ln x + 1)}{x^3 \ln^3 x} dx \right] \\
 &\leq \int_A^B \frac{1}{f'(x)} dx \left[\frac{f(B)}{B^2 \ln^2 B} - \frac{f(A)}{A^2 \ln^2 A} + 4 \int_A^B \frac{f(x)}{x^3 \ln^2 x} dx \right] \\
 &\leq \int_A^B \frac{1}{f'(x)} dx \left(\frac{1}{\ln B} + 4 \int_A^B \frac{1}{x \ln x} dx \right) \\
 &= \int_A^B \frac{1}{f'(x)} dx \left(\frac{1}{\ln B} + 4 \ln \frac{\ln B}{\ln A} \right).
 \end{aligned}$$

从而

$$\left(\ln \frac{b}{a} \right)^2 \leq \int_{e^a}^{e^b} \frac{1}{f'(x)} dx \left(\frac{1}{b} + 4 \ln \frac{b}{a} \right) \Rightarrow \int_{e^a}^{e^b} \frac{1}{f'(x)} dx \geq \frac{\left(\ln \frac{b}{a} \right)^2}{\left(\frac{1}{b} + 4 \ln \frac{b}{a} \right)}.$$

于是对任意充分大的 a , 取 $b = 2a$, 则

$$\int_{e^a}^{e^{2a}} \frac{1}{f'(x)} dx \geq \frac{(\ln 2)^2}{\left(\frac{1}{2a} + 4 \ln 2 \right)} \rightarrow \frac{\ln 2}{4}, a \rightarrow +\infty.$$

因此由 Cauchy 收敛准则可知 $\int_1^{+\infty} \frac{1}{f'(x)} dx$ 发散. □

例题 6.16 设 $f(x)$ 在 $[1, +\infty)$ 单调递减趋于零, $p > 1$, 若 $\int_1^{\infty} \frac{f^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx$ 收敛, 证明: $\int_1^{\infty} f^p(x) dx$ 收敛.

笔记 首先要搞清楚一个误区: 一定不存在 $C > 0$, 使得

$$\int_1^{\infty} f^p(x) dx \leq C \int_1^{\infty} \frac{f^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx \quad (6.13)$$

成立. 因为如果上式成立, 则对 $\forall k > 0$, 用 $kf(x)$ 代替 $f(x)$ 就有

$$\begin{aligned}
 k^p \int_1^{\infty} f^p(x) dx &\leq C k^{p-1} \int_1^{\infty} \frac{f^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx \\
 \Rightarrow \frac{k}{C} \int_1^{\infty} f^p(x) dx &\leq \int_1^{\infty} \frac{f^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx.
 \end{aligned}$$

令 $k \rightarrow \infty$ 得 $\int_1^{\infty} \frac{f^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx > +\infty$, 矛盾! 因此, 只有(6.13)式左右 f 的次数相同 (齐次不等式), 才可能存在上述的 C . 由此得到启发, 我们可以尝试建立如下不等式

$$\int_0^{\infty} f^p(x) dx \leq C \left(\int_0^{\infty} \frac{f^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx \right)^{\frac{p}{p-1}}.$$

因为 $\int_0^1 \frac{1}{x^{\frac{1}{p}}} dx$ 收敛, 所以

$$\int_0^1 \frac{f^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx \leq \int_0^1 \frac{f(1)}{x^{\frac{1}{p}}} dx < +\infty.$$

故 $\int_0^{\infty} \frac{f^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx$ 收敛. 从而可以不妨将积分下限改成 0, 方便后续计算. 定义 $F(x) \triangleq \begin{cases} f(1), & x \in [0, 1] \\ f(x), & x > 1 \end{cases}$, 则

$F(x)$ 递减, $F(x) = f(x)$, $\forall x \geq 1$, 并且

$$\int_0^{\infty} \frac{F^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx = \int_0^1 \frac{f(1)}{x^{\frac{1}{p}}} dx + \int_1^{\infty} \frac{f^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx < +\infty.$$

待定 $C > 0$, 令 $g(x) = \int_0^x F^p(t) dt - C \left(\int_0^x \frac{F^{p-1}(t)}{t^{\frac{1}{p}}} dt \right)^{\frac{p}{p-1}}$, 则 $g(0) = 0$, 形式计算 (f 不一定连续, g 不一定可导)

可得

$$\begin{aligned} g'(x) &= F^p(x) - \frac{Cp}{p-1} \left(\int_0^x \frac{F^{p-1}(t)}{t^{\frac{1}{p}}} dt \right)^{\frac{1}{p-1}} \frac{F^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} \\ &= \frac{F^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} \left[F(x)x^{\frac{1}{p}} - \frac{Cp}{p-1} \left(\int_0^x \frac{F^{p-1}(t)}{t^{\frac{1}{p}}} dt \right)^{\frac{1}{p-1}} \right]. \end{aligned}$$

由 F 递减可得

$$\frac{Cp}{p-1} \left(\int_0^x \frac{F^{p-1}(t)}{t^{\frac{1}{p}}} dt \right)^{\frac{1}{p-1}} \geq \frac{Cp}{p-1} \left(F^{p-1}(x) \int_0^x \frac{1}{t^{\frac{1}{p}}} dt \right)^{\frac{1}{p-1}} = C \left(\frac{p}{p-1} \right)^{\frac{p}{p-1}} \cdot F(x)x^{\frac{1}{p}}.$$

从而取 $C = \left(1 - \frac{1}{p}\right)^{\frac{p}{p-1}}$, 则上式可化为

$$\left(1 - \frac{1}{p}\right)^{\frac{1}{p-1}} \left(\int_0^x \frac{F^{p-1}(t)}{t^{\frac{1}{p}}} dt \right)^{\frac{1}{p-1}} \geq \left(1 - \frac{1}{p}\right)^{\frac{p}{p-1}} \left(\frac{p}{p-1} \right)^{\frac{p}{p-1}} \cdot F(x)x^{\frac{1}{p}} = F(x)x^{\frac{1}{p}}, \forall x \geq 1. \quad (6.14)$$

于是 $g'(x) \leq 0, \forall x \geq 1$ 再结合 $g(0) = 0$ 就有

$$\int_0^x F^p(t) dt - \left(1 - \frac{1}{p}\right)^{\frac{1}{p-1}} \left(\int_0^x \frac{F^{p-1}(t)}{t^{\frac{1}{p}}} dt \right)^{\frac{p}{p-1}} = g(x) \leq g(0) = 0, \forall x \geq 1.$$

令 $x \rightarrow \infty$ 得

$$\int_0^\infty F^p(x) dx \leq \left(1 - \frac{1}{p}\right)^{\frac{1}{p-1}} \left(\int_0^\infty \frac{F^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx \right)^{\frac{p}{p-1}} < +\infty.$$

但是注意上述 g 不一定可导, 所以还是需要通过定性地放缩得到严谨的证明, 只需注意到(6.14)式始终成立.

当然也可以通过逼近方法, 构造一个折线函数 $h(x)$ 逼近 $F(x)$, 此时 $h(x)$ 连续, 从而用 $h(x)$ 代替 $g(x)$ 中的 $F(x)$ 得到的新的 $G(x)$ 是可导的. 就能按照上述方法进行严谨证明.(逼近得到的不等式系数往往更加精确)

证明 定义 $F(x) \triangleq \begin{cases} f(1), & x \in [0, 1] \\ f(x), & x > 1 \end{cases}$, 则 $F(x)$ 递减, $F(x) = f(x), \forall x \geq 1$, 并且

$$\int_0^\infty \frac{F^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx = \int_0^1 \frac{f(1)}{x^{\frac{1}{p}}} dx + \int_1^\infty \frac{f^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx < +\infty.$$

待定 $C > 0$, 令 $g(x) = \int_0^x F^p(t) dt - C \left(\int_0^x \frac{F^{p-1}(t)}{t^{\frac{1}{p}}} dt \right)^{\frac{p}{p-1}}$, 则由 F 递减可得

$$\frac{Cp}{p-1} \left(\int_0^x \frac{F^{p-1}(t)}{t^{\frac{1}{p}}} dt \right)^{\frac{1}{p-1}} \geq \frac{Cp}{p-1} \left(F^{p-1}(x) \int_0^x \frac{1}{t^{\frac{1}{p}}} dt \right)^{\frac{1}{p-1}} = C \left(\frac{p}{p-1} \right)^{\frac{p}{p-1}} \cdot F(x)x^{\frac{1}{p}}.$$

从而取 $C = \left(1 - \frac{1}{p}\right)^{\frac{p}{p-1}}$, 则上式可化为

$$\left(1 - \frac{1}{p}\right)^{\frac{1}{p-1}} \left(\int_0^x \frac{F^{p-1}(t)}{t^{\frac{1}{p}}} dt \right)^{\frac{1}{p-1}} \geq \left(1 - \frac{1}{p}\right)^{\frac{p}{p-1}} \left(\frac{p}{p-1} \right)^{\frac{p}{p-1}} \cdot F(x)x^{\frac{1}{p}} = F(x)x^{\frac{1}{p}}, \forall x \geq 1.$$

由 $\int_0^\infty \frac{F^{p-1}(t)}{t^{\frac{1}{p}}} dt$ 收敛可知, 存在 $C > 0$, 使得

$$F(x)x^{\frac{1}{p}} \leq \left(1 - \frac{1}{p}\right)^{\frac{1}{p-1}} \left(\int_0^x \frac{F^{p-1}(t)}{t^{\frac{1}{p}}} dt \right)^{\frac{1}{p-1}} \leq \left(1 - \frac{1}{p}\right)^{\frac{1}{p-1}} \left(\int_0^\infty \frac{F^{p-1}(t)}{t^{\frac{1}{p}}} dt \right)^{\frac{1}{p-1}} < C, \forall x \geq 1.$$

于是

$$\int_0^\infty F^p(x) dx = \int_0^\infty \frac{F^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} \cdot F(x)x^{\frac{1}{p}} dx \leq C \int_0^\infty \frac{F^{p-1}(x)}{x^{\frac{1}{p}}} dx < +\infty.$$

□

命题 6.2

设 $f(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 中连续, 证明: 广义积分 $\int_0^{+\infty} f(x) dx$ 收敛的充要条件有

1. 存在 $u(x), v(x)$ 使得 $f(x) = u(x)v(x)$, 其中 $u(x)$ 单调趋于零, $\int_0^A v(x) dx$ 有界.
2. 存在 $u(x), v(x)$ 使得 $f(x) = u(x)v(x)$, 其中 $u(x)$ 单调有界, $\int_0^{+\infty} v(x) dx$ 收敛,

 **笔记** 这个命题说明:A-D 判别法“几乎”是充要条件(只有确定 f 的分解逆命题才成立), 并且“逆命题”当中, 依然是 Dirichlet 判别法强于 Abel 判别法. 级数版本见**命题 9.11**.

证明 充分性由 A-D 判别法立得. 下证明必要性.

1. 由 $\int_0^{+\infty} f(x) dx$ 收敛及 Cauchy 收敛准则可知, 对 $\forall \varepsilon > 0, \exists M > 0, \forall B > A > M$, 有

$$\left| \int_A^B f(x) dx \right| < \varepsilon.$$

对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 取 $\varepsilon = \frac{1}{n^3}$, 则存在 $M_n > 0$, 对 $\forall B > M_n$, 有

$$\left| \int_{M_n}^B f(x) dx \right| < \frac{1}{n^3}. \quad (6.15)$$

取 $\varepsilon = \frac{1}{(n+1)^3}$, 则存在 $M_{n+1} > M_n + 1$, 对 $\forall B > M_{n+1}$, 有

$$\left| \int_{M_{n+1}}^B f(x) dx \right| < \frac{1}{(n+1)^3}.$$

由 $M_{n+1} > M_n + 1$ 及(6.15)式可知

$$\left| \int_{M_n}^{M_{n+1}} f(x) dx \right| < \frac{1}{n^3}. \quad (6.16)$$

令 $u(x) \triangleq \begin{cases} \frac{1}{n}, & x \in [M_n, M_{n+1}), n = 1, 2, \dots \\ 1, & x \in [0, M_1) \end{cases}$, $v(x) \triangleq \frac{f(x)}{u(x)}$, 则 $u(x)$ 单调递减, 且 $\lim_{x \rightarrow +\infty} u(x) = 0$. 对 $\forall A > 0$, 存

在 $n \in \mathbb{N}$, 使得 $A \in [M_n, M_{n+1})$. 从而由(6.15)(6.16)式可得

$$\begin{aligned} \left| \int_0^A \frac{f(x)}{u(x)} dx \right| &= \left| \int_0^{M_1} \frac{f(x)}{u(x)} dx + \int_{M_1}^{M_2} \frac{f(x)}{u(x)} dx + \dots + \int_{M_{n-1}}^{M_n} \frac{f(x)}{u(x)} dx + \int_{M_n}^A \frac{f(x)}{u(x)} dx \right| \\ &\leq \left| \int_0^{M_1} f(x) dx \right| + \left| \int_{M_1}^{M_2} f(x) dx \right| + \dots + \left| \int_{M_{n-1}}^{M_n} (n-1)f(x) dx \right| + \left| \int_{M_n}^A n f(x) dx \right| \\ &\leq \left| \int_0^{M_1} f(x) dx \right| + 1 + \dots + \frac{1}{(n-1)^2} + \frac{1}{n^2} \\ &< \left| \int_0^{M_1} f(x) dx \right| + \frac{\pi^2}{6} < +\infty. \end{aligned}$$

这就完成了证明.

2. 由第 1 问可知, 存在 $u(x), v(x)$, 使得 $f(x) = u(x)v(x)$, 其中 $u(x)$ 单调趋于 0, $\int_0^A v(x) dx$ 有界. 令 $u_1(x) = \sqrt{u(x)}$, $v_1(x) = \sqrt{u(x)}v(x)$, 则 $f(x) = u_1(x)v_1(x)$. 由 $u(x)$ 单调趋于 0 可知, $u_1(x)$ 单调有界. 因为 $\sqrt{u(x)}$ 单调趋于 0, $\int_0^A v(x) dx$ 有界, 所以由第 1 问可知

$$\int_0^\infty v_1(x) dx = \int_0^\infty \sqrt{u(x)}v(x) dx < +\infty.$$

故 $u_1(x), v_1(x)$ 就是第 2 问中我们要找的分解.

□

6.2 反常积分收敛抽象问题

命题 6.3

设 f 为 $[a, +\infty)$ 上的非负可积函数, 若存在一个数列 $\{x_n\}$, 满足 $x_n \rightarrow +\infty$, 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^{x_n} f(y) dy \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$, 则

$$\int_a^{+\infty} f(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^{x_n} f(y) dy.$$

进而可得

- (i) $\int_a^{+\infty} f(x) dx$ 收敛的充要条件是存在一个数列 $\{x_n\}$, 满足 $x_n \rightarrow +\infty$, 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^{x_n} f(y) dy$ 存在.
- (ii) $\int_a^{+\infty} f(x) dx$ 发散的充要条件是存在一个数列 $\{x_n\}$, 满足 $x_n \rightarrow +\infty$, 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^{x_n} f(y) dy = +\infty$.

◆

注 对于瑕积分也有类似的结论.

笔记 这个命题说明: 非负可积函数的反常积分的敛散性完全由其子列的变限积分决定.

证明 令 $g(x) = \int_a^x f(y) dy$, 则 $g(x)$ 在 $[a, +\infty)$ 上非负单调递增. 由单调收敛定理可知 $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$. 从而由子列极限命题(a)可知

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} g(x_n) \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}.$$

因此

$$\int_a^{+\infty} f(x) dx = \lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} g(x_n) \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}.$$

□

命题 6.4

若 $f \in R[a, +\infty)$, $\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_a^n |f(x)| dx$ 存在且 $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |f(x)| = 0$, 则 $\int_a^{+\infty} f(x) dx$ 一定存在.

◆

笔记 若已知 $\int_a^{+\infty} f(x) dx$ 存在, 则由 Heine 归结原则可知 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_a^n f(x) dx$ 一定存在. 但是反过来, $\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_a^n f(x) dx$ 只是 $\int_a^{+\infty} f(x) dx$ 的一个子列极限, 故 $\int_a^{+\infty} f(x) dx$ 不一定存在. 还需要额外的条件才能使得 $\int_a^{+\infty} f(x) dx$ 存在.

证明 对 $\forall x \geq a$, 一定存在 $n \in \mathbb{N}$, 使得 $n \leq x < n+1$. 从而可得

$$\int_a^x f(x) dx = \int_a^n f(x) dx + \int_n^x f(x) dx. \quad (6.17)$$

并且

$$\int_n^x f(x) dx \leq \int_n^x |f(x)| dx \leq \int_n^{n+1} |f(x)| dx \leq \sup_{y \geq n} |f(y)|. \quad (6.18)$$

对(6.18)式两边同时令 $x \rightarrow +\infty$, 则 $n \rightarrow +\infty$. 进而可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_n^x f(x) dx \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \sup_{y \geq n} |f(y)| = \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |f(x)|.$$

由于此时 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$, 因此 $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |f(x)| = \lim_{x \rightarrow +\infty} |f(x)| = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$. 从而

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_n^x f(x) dx \leq \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} |f(x)| = 0.$$

故 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \int_n^x f(x)dx = 0$. 于是再对(6.17)式两边同时令 $x \rightarrow +\infty$, 则 $n \rightarrow +\infty$. 从而可得

$$\int_a^\infty f(x)dx = \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_a^x f(x)dx = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_a^n f(x)dx + \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_n^x f(x)dx = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_a^n f(x)dx.$$

又因为此时 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_a^n f(x)dx$ 存在, 所以 $\int_a^\infty f(x)dx$ 也存在.

□

命题 6.5 (积分收敛必有子列趋于 0)

(1) 设 $f \in C[0, +\infty)$ 满足 $\int_0^\infty f(x)dx$ 收敛, 则存在趋于 $+\infty$ 的 $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset (0, +\infty)$, 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = 0$.

(2) 设 $f \in R[0, +\infty)$, 且 $\int_0^\infty |f(x)|dx < \infty$, 则存在严格递增的 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$, 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n \ln x_n f(x_n) = 0$.

◆

笔记 连续性是否可以去掉构成一个有趣的话题. 第一问结论可以直接用, 第二问主要告诉我们积分绝对收敛性, 我们总能找到很好的子列极限. 并且(2)中结论的 $x_n \ln x_n$ 可以换成任意数列 $\{a_n\}$, 只要满足 $\int_a^\infty a_n dx = +\infty$ 即可证明

(1) 运用积分中值定理, 我们知道

$$\int_A^{A+1} f(x)dx = f(\theta(A)), A+1 > \theta(A) > A.$$

由 Cauchy 收敛准则, 我们知道

$$0 = \lim_{A \rightarrow +\infty} \int_A^{A+1} f(x)dx = \lim_{A \rightarrow +\infty} f(\theta(A)), \lim_{A \rightarrow +\infty} \theta(A) = +\infty.$$

这就完成了证明.

(2) 若 $|f(x)| > \frac{1}{x \ln x}, \forall x > e$, 则由 $\int_e^\infty \frac{1}{x \ln x} dx = \lim_{x \rightarrow +\infty} \ln \ln x = +\infty$ 可得 $\int_e^\infty |f(x)| dx = +\infty$ 矛盾! 故存在 $x_1 > e$ 使得 $|f(x_1)| \leq \frac{1}{x_1 \ln x_1}$. 同样的, 如果 $|f(x)| > \frac{1}{2x \ln x}, \forall x > x_1 + 1$, 同理可得矛盾! 因此必然存在 $x_2 > x_1 + 1$ 使得 $|f(x_2)| \leq \frac{1}{2x_2 \ln x_2}$. 依次下去我们得到

$$|f(x_n)| \leq \frac{1}{nx_n \ln x_n}, n = 1, 2, \dots,$$

即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n \ln x_n \cdot |f(x_n)| = 0.$$

□

命题 6.6

设 $f : [0, +\infty) \rightarrow \mathbb{R}$ 满足 $\int_0^{+\infty} f(y)dy$ 收敛, 证明

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x yf(y)dy}{x} = 0.$$

◆

笔记 本题不可直接洛必达. 这个命题是命题 9.1 的连续版本, 在那里我们先 Abel 变换再 Stolz 定理, 于是在这里我们先分部积分再洛必达.

证明 记 $F(x) \triangleq \int_0^x f(y)dy$, 则

$$\int_0^x yf(y)dy \xrightarrow{\text{R-S 积分}} \int_0^x ydF(y) = xF(x) - \int_0^x F(y)dy.$$

由 $F \in C[0, +\infty)$, 利用 L'Hospital 法则得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x yf(y)dy}{x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) - \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \int_0^x F(y)dy \xrightarrow{\text{L'Hospital 法则}} \int_0^{+\infty} f(y)dy - \int_0^{+\infty} f(y)dy = 0.$$

□

命题 6.7

(1) 设 $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 收敛, 且 $f(x)$ 单调, 则 $\lim_{x \rightarrow +\infty} xf(x) = 0$.

(2) 若 $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 收敛且 $xf(x)$ 单调, 则 $\lim_{x \rightarrow +\infty} x \ln xf(x) = 0$.

◆

证明

(1) 不妨设 f 递减, 否则用 $-f$ 代替 f , 从而

$$Af(A) \geq \int_A^{2A} f(x)dx, \quad \frac{A}{2}f(A) \leq \int_{\frac{A}{2}}^A f(x)dx.$$

进而

$$\int_A^{2A} f(x)dx \leq Af(A) \leq 2 \int_{\frac{A}{2}}^A f(x)dx.$$

由 $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 收敛的 Cauchy 收敛准则可知

$$\int_{\frac{A}{2}}^A f(x)dx \rightarrow 0, A \rightarrow +\infty, \quad \int_A^{2A} f(x)dx \rightarrow 0, A \rightarrow +\infty.$$

故 $\lim_{A \rightarrow +\infty} Af(A) = 0$.

(2) 不妨设 xf 递减, 否则用 $-f$ 代替 f 即可. 于是

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}A \ln Af(A) &= Af(A) \int_{\sqrt{A}}^A \frac{1}{x}dx \leq \int_{\sqrt{A}}^A \frac{xf(x)}{x}dx = \int_{\sqrt{A}}^A f(x)dx, \\ \int_A^{A^2} f(x)dx &= \int_A^{A^2} \frac{xf(x)}{x}dx \leq Af(A) \int_A^{A^2} \frac{1}{x}dx = A \ln Af(A). \end{aligned}$$

从而

$$\int_A^{A^2} f(x)dx \leq A \ln Af(A) \leq 2 \int_{\sqrt{A}}^A f(x)dx$$

又由 $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 收敛的 Cauchy 收敛准则可知

$$\int_{\sqrt{A}}^A f(x)dx \rightarrow 0, A \rightarrow +\infty. \quad \int_A^{A^2} f(x)dx \rightarrow 0, A \rightarrow +\infty.$$

故由夹逼准则可知 $\lim_{A \rightarrow +\infty} A \ln Af(A) = 0$.

□

命题 6.8

若 f 在 $[0, +\infty)$ 上一致连续, 且 $\int_0^{+\infty} f(x)dx < \infty$, 则 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$.

◆



笔记 本题也有导数版本见命题 5.40.

证明 反证, 假设 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \neq 0$, 则可不妨设存在 $c > 0, x_n \rightarrow +\infty$, 使得

$$f(x_n) \geq c > 0.$$

由 f 在 $[0, +\infty)$ 上一致连续可知, 存在 $\delta > 0$, 使 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$|f(x) - f(x_n)| < \frac{c}{2} \implies f(x) > f(x_n) - \frac{c}{2} \geq \frac{c}{2}, \quad \forall x \in (x_n, x_n + \delta) > 0.$$

于是

$$\int_{x_n}^{x_n + \delta} f(x) dx \geq \int_{x_n}^{x_n + \delta} \frac{c}{2} dx = \frac{c\delta}{2}, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

这与 $\int_0^{+\infty} f(x) dx < \infty$ 的 Cauchy 收敛准则矛盾!

□

例题 6.17 设 $f \in D^1(0, +\infty)$ 且 $|f'|$ 在 $(0, +\infty)$ 递减. 若 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在, 证明: $\lim_{x \rightarrow +\infty} xf'(x) = 0$.

证明 若存在 $a > 0$, 使得 $f'(a) = 0$, 则由 $|f'|$ 在 $(0, +\infty)$ 递减可得

$$f'(x) = 0, \quad \forall x > a.$$

此时结论显然成立.

若 $f' \neq 0, \forall x \in (0, +\infty)$, 则由导数介值性可知, f' 在 $(0, +\infty)$ 上要么恒大于零, 要么恒小于零. 于是不妨设 $f' > 0, \forall x \in (0, +\infty)$, 故此时 f 在 $(0, +\infty)$ 上严格递增. 并且此时 $f' = |f'|$ 在 $(0, +\infty)$ 递减, 故此时 f' 在 $(0, +\infty)$ 内闭 Riemann 可积. 从而由微积分基本定理可知

$$\int_1^x f'(y) dy = f(x) - f(1).$$

又因为 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在, 所以 $\int_1^{+\infty} f'(y) dy$ 收敛. 于是由命题 6.7(1) 可知 $\lim_{x \rightarrow +\infty} xf'(x) = 0$.

□

例题 6.18 设 f 在 $(a, +\infty)$ 可导. 如果 f 有界且 xf' 为单调函数, 证明

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} x \ln x f'(x) = 0.$$

证明 由 xf' 单调可知, $g(x) \triangleq xf'$ 在 $(a, +\infty)$ 上内闭 Riemann 可积. 从而 $f' = \frac{g(x)}{x}$ 在 $(a, +\infty)$ 上也内闭 Riemann 可积. 不妨设 xf' 单调递增, 由单调有界定理可知, $\lim_{x \rightarrow +\infty} xf'(x)$ 存在或 $+\infty$. 由 f 有界可得 $\lim_{x \rightarrow +\infty} xf'(x) \leq 0$. 否则, 若 $\lim_{x \rightarrow +\infty} xf'(x) > 0$, 则存在 $C > 0$, 使得

$$xf'(x) > C \Rightarrow f'(x) > \frac{C}{x}, \quad x \in (\max\{a, 0\}, +\infty). \quad (6.19)$$

对 (6.19) 式两边同时积分得到

$$f(x) > \int_a^x \frac{c}{t} dt = c \ln|x| - c \ln a.$$

令 $x \rightarrow +\infty$, 得到 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$, 这与 f 有界矛盾! 于是由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} xf'(x) \leq 0$ 可知存在 $X > \max\{a, 0\}$, 使得

$$xf'(x) \leq 0 \Rightarrow f'(x) \leq 0, \quad x \in (X, +\infty).$$

故 f 在 $(X, +\infty)$ 上递减. 又因为 f 有界, 所以 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在. 根据微积分基本定理可得

$$\int_a^x f'(t) dt = f(x) - f(a).$$

令 $x \rightarrow +\infty$, 则由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在可得 $\int_a^{+\infty} f'(t) dt$ 收敛. 又 $xf'(x)$ 单调, 于是由命题 6.7(2) 可知 $\lim_{x \rightarrow +\infty} x \ln x f'(x) = 0$.

□

例题 6.19 设 $f \in D[a, +\infty)$, $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = +\infty$ 且 f' 严格递增, 证明 $\int_0^{+\infty} \sin f(x) dx$ 收敛.

证明 由命题 5.7 和命题 5.9 可知, $f' \in C[a, +\infty)$. 又由命题 5.5 可知 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$. 故存在 $X > 0$, 使得 f', f 在 $[X, +\infty)$ 上恒正, 且 f 在 $[X, +\infty)$ 上严格单调递增. 从而由反函数存在定理可知, f 存在严格单调递增的反函数

$$g : [f(X), +\infty) \rightarrow [X, +\infty).$$

于是令 $x = g(y)$, 则

$$\int_X^{+\infty} \sin f(x) dx = \int_{f(X)}^{+\infty} \sin y g'(y) dy.$$

又由反函数求导定理可知 $g'(y)f'(g(y)) = 1$, 并且 $f(g(y)) = y$, 故上式可化为

$$\int_X^{+\infty} \sin f(x) dx = \int_{f(X)}^{+\infty} \sin y g'(y) dy = \int_{f(X)}^{+\infty} \frac{\sin y}{f'(g(y))} dy.$$

因为 f', g 都严格递增趋于 $+\infty$, 所以 $\frac{1}{f'(g(x))}$ 严格递增趋于 0. 又注意到

$$\left| \int_{f(X)}^A \sin y dy \right| \leq 2, \forall A \geq f(X).$$

故由 Dirichlet 判别法可知 $\int_0^{+\infty} \sin f(x) dx$ 收敛.

□

例题 6.20

(1) 设 f 内闭可积且 $f(x) > 0, x_0 > 0$. 若

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x+x_0)}{f(x)} = \ell \in [0, +\infty) \bigcup \{+\infty\}$$

我们就有

$$\int_a^{+\infty} f(x) dx \text{ 是 } \begin{cases} \text{收敛,} & \ell < 1 \\ \text{发散,} & \ell > 1 \end{cases}.$$

(2) 设 $f > 0$ 内闭可积, 若有常数 $k > 1$ 使得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(kx)}{f(x)} = \ell \in [0, +\infty) \bigcup \{+\infty\},$$

则

$$\int_a^{+\infty} f(x) dx \text{ 是 } \begin{cases} \text{收敛,} & \ell < \frac{1}{k} \\ \text{发散,} & \ell > \frac{1}{k} \end{cases}.$$

(3) 设 $f > 0$ 内闭可积, 若

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln f(x)}{\ln x} = p,$$

则

$$\int_a^{+\infty} f(x) dx \text{ 是 } \begin{cases} \text{收敛,} & -\infty \leq p < -1 \\ \text{发散,} & -1 < p \leq +\infty \end{cases}.$$

注 第(1)题中当 $\ell = 1$ 时无法判断反常积分的敛散性!

第(2)题中当 $\ell = \frac{1}{k}$ 时无法判断反常积分的敛散性!

第(3)题中当 $p = 1$ 时无法判断反常积分的敛散性!

第(3)题的条件 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln f(x)}{\ln x} = p$ 可改为 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{xf'(x)}{f(x)} = p$. 因为由 L'Hospital 法则可知

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln f(x)}{\ln x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{xf'(x)}{f(x)} = p.$$

注 上述例题第(3)题的证明中, 令 $\varepsilon \rightarrow 0$, 并不能得到

$$\frac{1}{x^{-p}} \leq f(x) \leq \frac{1}{x^{-p}}, \forall x > X.$$

因为 X 是与 ε 有关的. 因此只有固定 ε 时, 才有 $\frac{1}{x^{-p+\varepsilon}} \leq f(x) \leq \frac{1}{x^{-p-\varepsilon}}$, $\forall x > X$ 成立. 故再利用比较判别法式, 不能令 $\varepsilon \rightarrow 0$.

证明

(1) 由 $f > 0$ 和命题 6.3 可知

$$\int_a^\infty f(x) dx = \lim_{m \rightarrow \infty} \int_a^{a+mx_0} f(x) dx = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{a+(n-1)x_0}^{a+nx_0} f(x) dx \triangleq \sum_{n=1}^{\infty} a_n.$$

对 $\forall \varepsilon > 0$, 由题设可知, 存在 $X > a$, 使得

$$\ell - \varepsilon \leq \frac{f(x_0 + x)}{f(x)} \leq \ell + \varepsilon, \forall x \geq X.$$

从而当 $n > \frac{X-a}{x_0}$ 时, 就有 $a+nx_0 > X$, 进而

$$a_{n+1} = \int_{a+nx_0}^{a+(n+1)x_0} f(x) dx = \int_{a+(n-1)x_0}^{a+nx_0} f(x+x_0) dx \in [(\ell - \varepsilon) a_n, (\ell + \varepsilon) a_n],$$

故

$$\ell - \varepsilon \leq \frac{a_{n+1}}{a_n} \leq \ell + \varepsilon, \forall n > \frac{X-a}{x_0}.$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = \ell$, 再由比值判别法得证.

(2) 根据题设, 令 $x = e^t$, 任取 $c > 0$, 再令 $g(x) = f(x)e^x$, 则

$$\int_c^\infty f(x) dx = \int_{\ln c}^\infty f(e^t) e^t dt = \int_{\ln c}^\infty g(t) dt,$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{g(t + \ln k)}{g(t)} = \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{f(e^{t+\ln k}) e^{t+\ln k}}{f(e^t) e^t} = k \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{f(ke^t)}{f(e^t) e^t} = k\ell.$$

于是由 (1) 可知结论成立.

(3) 只讨论 $p \in \mathbb{R}$ 的情况, 其余 $p = \pm\infty$ 情况类似. 由题意可知, $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $X > e$, 使得当 $x > X$ 时, 有

$$p - \varepsilon \leq \frac{\ln f(x)}{\ln x} \leq p + \varepsilon \iff x^{p-\varepsilon} \leq f(x) \leq x^{p+\varepsilon}.$$

于是

$$\frac{1}{x^{-p+\varepsilon}} \leq f(x) \leq \frac{1}{x^{-p-\varepsilon}}, \forall x > X.$$

再由比较判别法即得结论. 当 $p < -1$ 也就即 $-p > 1$ 时, 取 $\varepsilon = \frac{-p-1}{2}$, 则由上式知, 存在 $X_1 > e$, 使得

$$f(x) \leq \frac{1}{x^{-p-\varepsilon}}, \forall x > X_1.$$

注意到此时 $-p - \varepsilon > 1$, 故 $\int_{X_1}^\infty \frac{1}{x^{-p-\varepsilon}} dx < +\infty$. 由比较判别法知 $\int_{X_1}^\infty f(x) dx < +\infty$. 因此 $\int_a^\infty f(x) dx < +\infty$.

当 $p \geq -1$ 也即 $-p \leq 1$ 时, 取 $\varepsilon = \frac{p+1}{2}$, 则由上式知, 存在 $X_2 > e$, 使得

$$f(x) \geq \frac{1}{x^{-p+\varepsilon}}, \forall x > X_2.$$

注意到此时 $-p + \varepsilon \leq 1$, 故 $\int_{X_2}^\infty \frac{1}{x^{-p+\varepsilon}} dx = +\infty$. 由比较判别法知 $\int_{X_2}^\infty f(x) dx = +\infty$. 因此 $\int_a^\infty f(x) dx = +\infty$. \square

例题 6.21 若 $f \in C^1[0, +\infty)$ 且 $f(0) > 0, f'(x) > 0$. 若 $\int_0^\infty \frac{1}{f(x) + f'(x)} dx < \infty$, 证明 $\int_0^\infty \frac{1}{f(x)} dx < \infty$.

 **笔记** 利用拟合法的想法证明反常积分收敛.

证明 由条件可知 $f(x)$ 严格递增且恒正, 从而 $f(+\infty) \in \mathbb{R}^+ \cup \{+\infty\}$, 进而

$$\frac{1}{f(+\infty)} \in \mathbb{R}^+ \cup \{0\}.$$

于是

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \left| \frac{1}{f(x) + f'(x)} - \frac{1}{f(x)} \right| dx &= \int_0^\infty \frac{f'(x)}{f(x)[f(x) + f'(x)]} dx \leq \int_0^\infty \frac{f'(x)}{f^2(x)} dx \\ &= \int_0^\infty \frac{1}{f^2(x)} df(x) = \frac{1}{f(0)} - \frac{1}{f(+\infty)} < +\infty. \end{aligned}$$

注意到

$$\frac{1}{f(x)} \leq \left| \frac{1}{f(x)} - \frac{1}{f(x) + f'(x)} \right| + \frac{1}{f(x) + f'(x)}.$$

$$\text{又 } \int_0^\infty \frac{1}{f(x) + f'(x)} dx < +\infty, \text{ 故 } \int_0^\infty \frac{1}{f(x)} dx < \infty.$$

□

例题 6.22 设非负函数 $f \in C(\mathbb{R})$ 使得对任何 $k \in \mathbb{N}$ 都有 $\int_{-\infty}^\infty e^{-\frac{|x|}{k}} f(x) dx \leq M$, 证明 $\int_{-\infty}^\infty f(x) dx$ 收敛且 $\int_{-\infty}^\infty f(x) dx \leq M$.

 **笔记** 利用拟合法的想法证明反常积分收敛.

证明 证法一: $\forall a < b$, 注意到 $1 - x \leq e^{-x}, \forall x \in \mathbb{R}$. 从而对 $\forall k \in \mathbb{N}$, 都有

$$\int_a^b \left(1 - \frac{|x|}{k}\right) f(x) dx \leq \int_a^b e^{-\frac{|x|}{k}} f(x) dx \leq M.$$

于是

$$\int_a^b f(x) dx \leq \frac{1}{k} \int_a^b |x| f(x) dx + M.$$

令 $k \rightarrow +\infty$ 得 $\int_a^b f(x) dx \leq M$. 再由 a, b 的任意性可得 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx \leq M$.

证法二: 由 Fatou 引理 可得

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \liminf_{k \rightarrow +\infty} e^{-\frac{|x|}{k}} f(x) dx \leq \liminf_{k \rightarrow +\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{|x|}{k}} f(x) dx \leq M.$$

□

例题 6.23 设 $f \in C^1[0, +\infty)$ 满足

$$|f'(x)| \leq M, \forall x \geq 0, \int_0^\infty |f(x)|^2 dx < \infty.$$

证明

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0.$$

证明 由条件可得

$$\int_0^{+\infty} |f^2(x)f'(x)| dx \leq M \int_0^{+\infty} |f(x)|^2 dx < +\infty.$$

故 $\int_0^{+\infty} f^2(x)f'(x) dx$ 收敛. 于是

$$\int_0^{+\infty} f^2(x)f'(x) dx = \lim_{x \rightarrow +\infty} f^3(x) - f^3(0) < \infty.$$

从而 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f^3(x)$ 存在. 由 $\int_0^{+\infty} |f(x)|^2 dx < \infty$ 及 命题 6.5(1) 可知, 存在 $\{x_n\}$, 满足 $x_n \rightarrow +\infty$, 使得 $f^2(x_n) \rightarrow 0$. 故

$\lim_{x \rightarrow +\infty} f^3(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} [f^2(x_n)]^{\frac{3}{2}} = 0$, 因此 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$.

□

例题 6.24 设 $f \in D^2[0, +\infty)$ 且

$$\int_0^\infty |f(x)|^2 dx < \infty, \int_0^\infty |f''(x)|^2 dx < \infty.$$

证明 $\int_0^\infty |f'(x)|^2 dx < \infty$.

证明 由 Cauchy 不等式得

$$\int_0^\infty |f(x)f''(x)| dx \leq \sqrt{\int_0^\infty |f(x)|^2 dx \int_0^\infty |f''(x)|^2 dx} < +\infty.$$

故 $\int_0^{+\infty} |f(x)f''(x)| dx$ 收敛. 利用分部积分得

$$\int_0^x |f'(y)|^2 dy = f(x)f'(x) - f(0)f'(0) - \int_0^x f(y)f''(y) dy \quad (6.20)$$

由命题 6.3 可知, 只须找一个 $x_n \rightarrow +\infty$, 使 $f(x_n)f'(x_n)$ 极限存在即可.

由于 $\int_0^\infty |f(x)|^2 dx < +\infty$, 故由命题 6.5(1) 可知存在 $a_n \rightarrow +\infty$, 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} |f(a_n)|^2 = 0$, 从而 $\lim_{x \rightarrow +\infty} |f(x)|^2 \neq +\infty$. 于是再由命题 5.6 可知, 存在 $x_n \rightarrow +\infty$, 使得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [f^2(x_n)]' = 0 \iff \lim_{n \rightarrow \infty} 2f(x_n)f'(x_n) = 0.$$

从而由命题 6.3 及 (6.20) 式可知结论成立. □

第7章 积分不等式

7.1 著名积分不等式

定理 7.1 (Young 不等式初等形式)

设 $(x_i)_{i=1}^n \subset [0, +\infty)$, $(p_i)_{i=1}^n \subset (1, +\infty)$, $\sum_{i=1}^n \frac{1}{p_i} = 1$, 则有

$$\prod_{i=1}^n x_i \leq \sum_{i=1}^n \frac{x_i^{p_i}}{p_i}.$$

且等号成立条件为所有 $x_i, i = 1, 2, \dots, n$ 相等.



笔记 最常用的是 Young 不等式的二元情形:

对任何 $a, b \geq 0$, $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, $p > 1$ 有 $ab \leq \frac{a^p}{p} + \frac{b^q}{q}$.

证明 不妨设 $x_i \neq 0, (i = 1, 2, \dots, n)$. 本结果可以取对数用 Jensen 不等式证明, 即

$$\prod_{i=1}^n x_i \leq \sum_{i=1}^n \frac{x_i^{p_i}}{p_i} \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n \ln x_i \leq \ln \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i^{p_i}}{p_i} \right) \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n \frac{1}{p_i} \ln x_i^{p_i} \leq \ln \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i^{p_i}}{p_i} \right),$$

而最后一个等价之后就是 \ln 的上凸性结合 Jensen 不等式给出.



定义 7.1

(1) $d\mu = g(x)dx$, 这里 g 是一个在区间上内闭黎曼可积的函数.

(2) 若 $E \subset \mathbb{Z}$, 则 $\int_E f(x)d\mu = \sum_{n \in E} f(n)$.



定理 7.2 (Cauchy 不等式)

$$\left(\int_E f(x)g(x)d\mu \right)^2 \leq \int_E |f(x)|^2 d\mu \int_E |g(x)|^2 d\mu.$$

等号成立当且仅当存在不全为零的 c_1, c_2 , 使得 $c_1 f(x) + c_2 g(x) = 0$.



证明 只需证

$$\int_E |f(x)g(x)|d\mu \leq \sqrt{\int_E |f(x)|^2 d\mu \int_E |g(x)|^2 d\mu}.$$

当 $\int_E |f(x)|d\mu$ 或 $\int_E |g(x)|d\mu = 0$ 时, 不等式右边为 0, 结论显然成立.

当 $\int_E |f(x)|d\mu \neq 0$ 且 $\int_E |g(x)|d\mu \neq 0$ 时, 不妨设 $\int_E |f(x)|^2 d\mu = \int_E |g(x)|^2 d\mu = 1$, 否则, 用 $\frac{f(x)}{\sqrt{\int_E |f(x)|^2 d\mu}}$ 代

替 $f(x)$, $\frac{g(x)}{\sqrt{\int_E |g(x)|^2 d\mu}}$ 代替 $g(x)$ 即可. 利用 Young 不等式可得

$$\int_E |f(x)||g(x)|d\mu \leq \int_E \frac{|f(x)|^2 + |g(x)|^2}{2} d\mu = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1.$$

等号成立当且仅当存在不全为零的 c_1, c_2 , 使得 $c_1 f(x) + c_2 g(x) = 0$.



定理 7.3 (Jensen 不等式 (积分形式))

设 φ 是下凸函数且 $p(x) \geq 0, \int_a^b p(x)dx > 0$, 则在有意义时, 必有

$$\varphi\left(\frac{\int_a^b p(x)f(x)dx}{\int_a^b p(x)dx}\right) \leq \frac{\int_a^b p(x)\varphi(f(x))dx}{\int_a^b p(x)dx}. \quad (7.1)$$



- 笔记 1. 类似的对上凸函数, 不等式(7.1)反号.
2. 一般情况可利用下凸函数可以被 C^2 的下凸函数逼近得到, 例如定理 Bernstein 多项式保凸性一致逼近.
3. Jensen 不等式 (积分形式) 考试中不能直接使用, 需要证明.

证明 为书写简便, 我们记 $d\mu = \frac{p(x)}{\int_a^b p(y)dy}dx$, 那么有 $\int_a^b 1d\mu = 1$. 于是我们记 $x_0 = \int_a^b f(x)d\mu$ 并利用下凸函数恒在切线上方

$$\varphi(x) \geq \varphi(x_0) + \varphi'(x_0)(x - x_0),$$

就有

$$\int_a^b \varphi(f(x))d\mu \geq \int_a^b [\varphi(x_0) + \varphi'(x_0)(f(x) - x_0)]d\mu = \varphi(x_0) = \varphi\left(\int_a^b f(x)d\mu\right),$$

这就完成了证明. □

例题 7.1 对连续正值函数 f , 我们有

$$\ln\left(\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x)dx\right) \geq \frac{1}{b-a} \int_a^b \ln f(x)dx.$$

证明 令 $d\mu = \frac{1}{b-a}dx$, 则 $\int_a^b d\mu = 1$, 再令 $x_0 \triangleq \int_a^b f(x)d\mu > 0$, 则由 $\ln x$ 的上凸性可知

$$\ln x \leq \ln x_0 + \frac{1}{x_0}(x - x_0), \forall x > 0.$$

从而

$$\begin{aligned} \int_a^b \ln f(x)d\mu &\leq \int_a^b \ln x_0 d\mu + \frac{1}{x_0} \int_a^b (f(x) - x_0)d\mu \\ &= \ln x_0 + \frac{1}{x_0} \left(\int_a^b f(x)d\mu - x_0 \int_a^b d\mu \right) \\ &= \ln x_0 = \ln \int_a^b f(x)d\mu. \end{aligned}$$

故结论得证. □

定理 7.4 (Hölder 不等式)

设 V 是 \mathbb{R}^n 中有体积的有界集, f 和 g 都在 V 上可积, 又设 p, q 是满足 $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ 的正数, 且 $p > 1$, 则有

$$\int_V |f(x)g(x)| dx \leq \left(\int_V |f(x)|^p dx \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_V |g(x)|^q dx \right)^{\frac{1}{q}}$$

当且仅当 $\frac{f^p(x)}{g^q(x)}$ 几乎处处为同一个常数时取等 (若一个取零, 则另一个也取零). ♡

注 这是最重要的基本结论了 (必须掌握), 很多需要“调幂次”的积分不等式, 都得用赫尔德不等式, 同时这也是用来证明很多定理或者题目的工具, 也包括下面两个, 对于 $p \in (0, 1)$ 的情况会有反向赫尔德不等式.

证明 不妨设 $f, g \geq 0$, 否则用 $|f|, |g|$ 代替 f, g . 由 Young 不等式可知

$$f(x)g(x) \leq \frac{f^p(x)}{p} + \frac{g^q(x)}{q}.$$

由于 f, g 在 V 上都可积, 故可不妨设 $\int_V f^p(x)dx = \int_V g^q(x)dx = 1$, 否则用 $\frac{f}{(\int_V f^p(x)dx)^{\frac{1}{p}}}, \frac{g}{(\int_V g^q(x)dx)^{\frac{1}{q}}}$ 代替 f, g . 从而

$$\int_V f(x)g(x)dx \leq \frac{1}{p} \int_V f^p(x)dx + \frac{1}{q} \int_V g^q(x)dx = 1 = \left(\int_V f^p(x)dx \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_V g^q(x)dx \right)^{\frac{1}{q}}.$$

如果上述不等式等号成立, 那么

$$f(x)g(x) \leq \frac{f^p(x)}{p} + \frac{g^q(x)}{q}$$

在 V 上几乎处处取等. 根据 Young 不等式的取等条件可知, 此即 $\frac{f^p(x)}{g^q(x)}$ 几乎处处为一个常数 (若一个取零, 则另一个也取零).

□

定理 7.5 (Minkowski 不等式)

若 f 是 $[a, b] \times [c, d]$ 上的非负连续函数, 则对 $p \geq 1$ 有 (若 $p \in (0, 1)$ 则不等式反向)

$$\left(\int_a^b \left(\int_c^d f(x, y)dy \right)^p dx \right)^{\frac{1}{p}} \leq \int_c^d \left(\int_a^b f^p(x, y)dx \right)^{\frac{1}{p}} dy.$$

♡

笔记 证明的核心就一句话: 拆一个幂次出来, 然后换序, 再用 Hölder 不等式.

注 注意观察, 积分顺序变了, 另外, 可以简单的记为“绝对值不等式”, 就像直觉那样, 先取绝对值再算积分要大 (先算积分再取绝对值要小), 用 p 范数来写会好记并且清晰:

$$\left\| \int_c^d f(x, y)dy \right\|_p \leq \int_c^d \|f(x, y)\|_p dy.$$

对于 $p \in (0, 1)$ 的情形, 证明方法是完全类似的, 只需要运用反向 Hölder 不等式.

证明 假设 $p \geq 1$, 记 $g(x) = \int_c^d f(x, y)dy$, 换序并利用 Hölder 不等式有

$$\begin{aligned} \int_a^b \left(\int_c^d f(x, y)dy \right)^p dx &= \int_a^b \int_c^d f(x, y)dy \cdot \left(\int_c^d f(x, y)dy \right)^{p-1} dx \\ &= \int_a^b \int_c^d f(x, y)g^{p-1}(x)dy dx = \int_c^d \int_a^b f(x, y)g^{p-1}(x)dx dy \\ &\leq \int_c^d \left(\int_a^b f^p(x, y)dx \right)^{\frac{1}{p}} \cdot \left(\int_a^b g^{q(p-1)}(x)dx \right)^{\frac{1}{q}} dy \\ &= \left(\int_a^b g^p(x)dx \right)^{1-\frac{1}{p}} \cdot \int_c^d \left(\int_a^b f^p(x, y)dx \right)^{\frac{1}{p}} dy \\ &= \left(\int_a^b \left(\int_c^d f(x, y)dy \right)^p dx \right)^{1-\frac{1}{p}} \cdot \int_c^d \left(\int_a^b f^p(x, y)dx \right)^{\frac{1}{p}} dy. \end{aligned}$$

其中 $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, 进而 $q(p-1) = p$. 两边约掉 $\int_a^b \left(\int_c^d f(x, y)dy \right)^p dx$ 就有

$$\left(\int_a^b \left(\int_c^d f(x, y)dy \right)^p dx \right)^{\frac{1}{p}} \leq \int_c^d \left(\int_a^b f^p(x, y)dx \right)^{\frac{1}{p}} dy.$$

□

定理 7.6 (Hardy 不等式)

设 $p > 1$ 或 $p < 0$, $f(x)$ 恒正且连续, 记 $F(x) = \int_0^x f(t)dt$, 则

$$\int_0^\infty \left(\frac{F(x)}{x} \right)^p dx \leq \left(\frac{p}{p-1} \right)^p \int_0^\infty f^p(x) dx.$$



注 这个不等式及其离散形式经常会考, 证明的方法就是分部积分然后 Hölder(连续版), 或者作差(离散版)然后求和再 Hölder, 结构是类似的, 系数也是最佳的, 不过并不能找到一个函数使得刚刚好取等, 只能是逼近取等, 另外 $p < 0$ 的情况证明完全类似, 利用反向 Hölder 即可.

证明 假设 $p > 1$, 对任意 $M > 0$, 利用分部积分和 Hölder 不等式有

$$\begin{aligned} \int_0^M \left(\frac{F(x)}{x} \right)^p dx &= -\frac{1}{p-1} \int_0^M F^p(x) d\left(\frac{1}{x^{p-1}} \right) = -\frac{1}{p-1} \left(\frac{F^p(x)}{x^{p-1}} \Big|_0^M - \int_0^M \frac{1}{x^{p-1}} dF^p(x) \right) \\ &= -\frac{1}{p-1} \frac{F^p(M)}{M^{p-1}} + \frac{p}{p-1} \int_0^M \frac{F^{p-1}(x)f(x)}{x^{p-1}} dx \leq \frac{p}{p-1} \int_0^M \left(\frac{F(x)}{x} \right)^{p-1} f(x) dx \\ &\leq \frac{p}{p-1} \left(\int_0^M \left(\frac{F(x)}{x} \right)^p dx \right)^{\frac{p-1}{p}} \left(\int_0^M f^p(x) dx \right)^{\frac{1}{p}}. \end{aligned}$$

其中利用了

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{F^p(x)}{x^{p-1}} = \lim_{x \rightarrow 0^+} F(x) \left(\frac{F(x)}{x} \right)^{p-1}, \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{F(x)}{x} \xrightarrow{\text{L'Hospital}} \lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = f(0).$$

所以

$$\frac{F^p(x)}{x^{p-1}} \Big|_0^M = \frac{F^p(M)}{M^{p-1}} - \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{F^p(x)}{x^{p-1}} = \frac{F^p(M)}{M^{p-1}}.$$

现在两边约掉相同的部分并同时开 p 次方, 再令 $M \rightarrow \infty$ 就有

$$\int_0^\infty \left(\frac{F(x)}{x} \right)^p dx \leq \left(\frac{p}{p-1} \right)^p \int_0^\infty f^p(x) dx.$$



推论 7.1 (离散版 Hardy 不等式)

设数列 a_n 非负, 对任意 $p > 1$ 或者 $p < 0$, 都有

$$\sum_{k=1}^n \left(\frac{a_1 + a_2 + \dots + a_k}{k} \right)^p \leq \left(\frac{p}{p-1} \right)^p \sum_{k=1}^n a_k^p.$$



注 如果 $p < 0$, 则同样使用反向 Hölder 不等式即可完成证明.

证明 记 $S_k = a_1 + a_2 + \dots + a_k$, 不妨设 $p > 1$, 先证

$$\frac{S_k^p}{k^p} - \frac{p}{p-1} \frac{S_k^{p-1}}{k^{p-1}} a_k \leq \frac{1}{p-1} \left((k-1) \frac{S_{k-1}^p}{(k-1)^p} - k \frac{S_k^p}{k^p} \right) \leq 0. \quad (7.2)$$

上式等价于

$$\begin{aligned} (p-1) \frac{S_k^p}{k^p} - p \frac{S_k^{p-1}}{k^{p-1}} a_k &\leq (k-1) \frac{S_{k-1}^p}{(k-1)^p} - k \frac{S_k^p}{k^p} \\ \iff (k+p-1) \frac{S_k^p}{k^p} &\leq (k-1) \frac{S_{k-1}^p}{(k-1)^p} + p \frac{S_k^{p-1}}{k^{p-1}} a_k. \end{aligned}$$

令 $x = S_{k-1}$, $y = a_k$, 则 $S_k = x + y$, 代入上式得

$$\begin{aligned} (k+p-1) \frac{(x+y)^p}{k^p} &\leq \frac{x^p}{(k-1)^{p-1}} + p \frac{(x+y)^{p-1}}{k^{p-1}} y. \\ \iff (k+p-1)(x+y)^p &\leq \frac{k^p}{(k-1)^{p-1}} x^p + p k (x+y)^{p-1} y. \end{aligned}$$

两边除以 $(x+y)^p$, 再令 $t = \frac{x}{x+y} \in [0, 1)$ 代入得

$$k+p-1 \leq \frac{k^p}{(k-1)^{p-1}} t^p + pk(1-t).$$

令

$$h(t) = \frac{k^p}{(k-1)^{p-1}} t^p + pk(1-t) - (k+p-1),$$

则(7.2)式等价于 $h(t) \geq 0, \forall t \in [0, 1)$. 注意到

$$h'(t) = \frac{k^p}{(k-1)^{p-1}} pt^{p-1} - pk =,$$

令 $h'(t) = 0$ 得

$$\frac{k^p}{(k-1)^{p-1}} t^{p-1} = k \implies t^{p-1} = \frac{k(k-1)^{p-1}}{k^p} = \left(\frac{k-1}{k}\right)^{p-1} \implies t = \frac{k-1}{k}.$$

故 $h(t)$ 在 $t = \frac{k-1}{k}$ 处取得最小值. 又因为

$$\begin{aligned} h\left(\frac{k-1}{k}\right) &= \frac{k^p}{(k-1)^{p-1}} \left(\frac{k-1}{k}\right)^p + pk\left(1 - \frac{k-1}{k}\right) - (k+p-1) \\ &= \frac{k^p}{(k-1)^{p-1}} \cdot \frac{(k-1)^p}{k^p} + pk \cdot \frac{1}{k} - (k+p-1) \\ &= (k-1) + p - (k+p-1) = 0. \end{aligned}$$

所以 $h(t) \geq h\left(\frac{k-1}{k}\right) = 0, \forall t \in [0, 1)$ 成立. 故(7.2)式成立. 再对(7.2)式两边求和有

$$\sum_{k=1}^n \left(\frac{a_1 + a_2 + \dots + a_k}{k}\right)^p \leq \frac{p}{p-1} \sum_{k=1}^n \left(\frac{a_1 + a_2 + \dots + a_k}{k}\right)^{p-1} a_k.$$

再利用Hölder不等式得

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \left(\frac{a_1 + a_2 + \dots + a_k}{k}\right)^p &\leq \frac{p}{p-1} \sum_{k=1}^n \left(\frac{a_1 + a_2 + \dots + a_k}{k}\right)^{p-1} a_k \\ &\leq \frac{p}{p-1} \left[\sum_{k=1}^n \left(\frac{a_1 + a_2 + \dots + a_k}{k}\right)^{(p-1) \cdot \frac{p}{p-1}} \right]^{\frac{p-1}{p}} \left(\sum_{k=1}^n a_k^p\right)^{\frac{1}{p}} \\ &= \frac{p}{p-1} \left[\sum_{k=1}^n \left(\frac{a_1 + a_2 + \dots + a_k}{k}\right)^p \right]^{\frac{p-1}{p}} \left(\sum_{k=1}^n a_k^p\right)^{\frac{1}{p}}. \end{aligned}$$

现在两边约掉相同的部分并同时开 p 次方得

$$\sum_{k=1}^n \left(\frac{a_1 + a_2 + \dots + a_k}{k}\right)^p \leq \left(\frac{p}{p-1}\right)^p \sum_{k=1}^n a_k^p.$$

□

7.2 积分不等式的应用

例题 7.2 设 f 在区间 $[0, 1]$ 上可积且满足

$$\int_0^1 f(x) dx = \int_0^1 x f(x) dx = 1.$$

求证: $\int_0^1 f^2(x) dx \geq 4$.

证明 证法一: 对于任意常数 a 和 b 有 $\int_0^1 (f(x) - ax - b)^2 dx \geq 0$. 由此并根据条件可得

$$\begin{aligned} \int_0^1 (f(x) - ax - b)^2 dx &= \int_0^1 f^2(x) dx - 2 \int_0^1 (ax + b) f(x) dx + \int_0^1 (ax + b)^2 dx \geq 0 \\ \Rightarrow \int_0^1 f^2(x) dx &\geq 2 \int_0^1 (ax + b) f(x) dx - \int_0^1 (ax + b)^2 dx = 2(a + b) - \frac{1}{3}a^2 - ab - b^2. \end{aligned}$$

取 $a = 6, b = -2$ 即得所证.

证法二: 对 $\forall a, b \in \mathbb{R}$, 由 Cauchy 不等式可知

$$\int_0^1 (ax + b)^2 dx \int_0^1 f^2(x) dx \geq \left[\int_0^1 (ax + b) f(x) dx \right]^2 = (a + b)^2.$$

从而

$$\int_0^1 f^2(x) dx \geq \frac{(a + b)^2}{\int_0^1 (ax + b)^2 dx} = \frac{a^2 + 2ab + b^2}{\frac{a^2}{3} + ab + b^2} = 3 - \frac{3\frac{a}{b} + 6}{\frac{a^2}{b^2} + 3\frac{a}{b} + 3}.$$

再由 a, b 的任意性知

$$\int_0^1 f^2(x) dx \geq 3 + \sup_{a, b \in \mathbb{R}} \left\{ -\frac{3\frac{a}{b} + 6}{\frac{a^2}{b^2} + 3\frac{a}{b} + 3} \right\}. \quad (7.3)$$

令 $g(x) = -\frac{3x + 6}{x^2 + 3x + 3}$, 则

$$g'(x) = \frac{3(x + 1)(x + 3)}{(x^2 + 3x + 3)^2} = 0 \Rightarrow x = -1, -3.$$

又 $g(-1) = -3 < 1 = g(-3)$, 故 $\max_{\mathbb{R}} g(x) = 1$. 因此

$$\sup_{a, b \in \mathbb{R}} \left\{ -\frac{3\frac{a}{b} + 6}{\frac{a^2}{b^2} + 3\frac{a}{b} + 3} \right\} = \max_{\mathbb{R}} g(x) = 1.$$

再由(7.3)式可知

$$\int_0^1 f^2(x) dx \geq 4.$$

并且这个不等式右边不可改进.

□

例题 7.3 设 $f \in C^1[0, 1]$, 解决下列问题.

1. 若 $f(0) = 0$, 证明:

$$\int_0^1 |f(x)|^2 dx \leq \frac{1}{2} \int_0^1 |f'(x)|^2 dx.$$

2. 若 $f(0) = f(1) = 0$, 证明:

$$\int_0^1 |f(x)|^2 dx \leq \frac{1}{8} \int_0^1 |f'(x)|^2 dx.$$

注 牛顿莱布尼兹公式也可以看作带积分余项的插值公式(插一个点).

证明

1. 由牛顿莱布尼兹公式可知

$$f(x) = f(0) + \int_0^x f'(y) dy = \int_0^x f'(y) dy.$$

从而

$$|f(x)|^2 = \left| \int_0^x f'(y) dy \right|^2 \leq \int_0^x 1^2 dy \int_0^x |f'(y)|^2 dy = x \int_0^x |f'(y)|^2 dy \leq x \int_0^1 |f'(y)|^2 dy.$$

于是对上式两边同时积分可得

$$\int_0^1 |f(x)|^2 dx \leq \int_0^1 x dx \int_0^1 |f'(y)|^2 dy = \frac{1}{2} \int_0^1 |f'(y)|^2 dy.$$

2. 由牛顿莱布尼兹公式(带积分型余项的插值公式)可得

$$f(x) = \int_0^x f(y)dy, x \in \left[0, \frac{1}{2}\right]; \quad f(x) = \int_x^1 f'(y)dy, x \in \left[\frac{1}{2}, 1\right].$$

从而

$$|f(x)|^2 = \left| \int_0^x f'(y)dy \right|^2 \leq \int_0^x 1^2 dy \int_0^x |f'(y)|^2 dy = x \int_0^x |f'(y)|^2 dy \leq x \int_0^{\frac{1}{2}} |f'(y)|^2 dy, x \in \left[0, \frac{1}{2}\right].$$

$$|f(x)|^2 = \left| \int_x^1 f'(y)dy \right|^2 \leq \int_x^1 1^2 dy \int_x^1 |f'(y)|^2 dy \leq (1-x) \int_{\frac{1}{2}}^1 |f'(y)|^2 dy, x \in \left[\frac{1}{2}, 1\right].$$

于是对上面两式两边同时积分可得

$$\int_0^{\frac{1}{2}} |f(x)|^2 dx \leq \int_0^{\frac{1}{2}} x dx \int_0^{\frac{1}{2}} |f'(y)|^2 dy = \frac{1}{8} \int_0^{\frac{1}{2}} |f'(y)|^2 dy.$$

$$\int_{\frac{1}{2}}^1 |f(x)|^2 dx \leq \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x) dx \int_{\frac{1}{2}}^1 |f'(y)|^2 dy = \frac{1}{8} \int_{\frac{1}{2}}^1 |f'(y)|^2 dy.$$

将上面两式相加得

$$\int_0^1 |f(x)|^2 dx \leq \frac{1}{8} \int_0^1 |f'(y)|^2 dy.$$

□

例题 7.4 opial 不等式

特例:

1. 设 $f \in C^1[a, b]$ 且 $f(a) = 0$, 证明

$$\int_a^b |f(x)f'(x)| dx \leq \frac{b-a}{2} \int_a^b |f'(x)|^2 dx.$$

2. 设 $f \in C^1[a, b]$ 且 $f(a) = 0, f(b) = 0$, 证明

$$\int_a^b |f(x)f'(x)| dx \leq \frac{b-a}{4} \int_a^b |f'(x)|^2 dx.$$

一般情况:

1. 设 $f \in C^1[a, b], p \geq 0, q \geq 1$ 且 $f(a) = 0$. 证明

$$\int_a^b |f(x)|^p |f'(x)|^q dx \leq \frac{q(b-a)^p}{p+q} \int_a^b |f'(x)|^{p+q} dx. \quad (7.4)$$

2. 若还有 $f(b) = 0$. 证明

$$\int_a^b |f(x)|^p |f'(x)|^q dx \leq \frac{q(b-a)^p}{(p+q)2^p} \int_a^b |f'(x)|^{p+q} dx. \quad (7.5)$$

 **笔记** 说明了证明的想法就是注意变限积分为整体凑微分.

证明 特例:

1. 令 $F(x) \triangleq \int_a^x |f'(y)| dy$, 则 $F'(x) = |f'(x)|, F(a) = 0$. 从而

$$f(x) = \int_0^x f'(y) dy \Rightarrow |f(x)| \leq \int_a^x |f'(y)| dy = F(x).$$

于是

$$\int_a^b |f(x)f'(x)| dx \leq \int_a^b F(x)F'(x) dx = \frac{1}{2} F^2(x) \Big|_a^b = \frac{1}{2} F^2(b) = \frac{1}{2} \left(\int_a^b |f'(y)| dy \right)^2$$

$$\stackrel{\text{Cauchy 不等式}}{\leq} \frac{1}{2} \int_a^b 1^2 dx \int_a^b |f'(y)|^2 dy = \frac{b-a}{2} \int_a^b |f'(y)|^2 dy.$$

2. 由第 1 问可知

$$\int_a^{\frac{a+b}{2}} |f(x)f'(x)| dx \leq \frac{\frac{a+b}{2} - a}{2} \int_a^{\frac{a+b}{2}} |f'(y)|^2 dy = \frac{b-a}{4} \int_a^{\frac{a+b}{2}} |f'(y)|^2 dy.$$

$$\int_{\frac{a+b}{2}}^b |f(x)f'(x)|dx \leq \frac{\frac{a+b}{2} - a}{2} \int_{\frac{a+b}{2}}^b |f'(y)|^2 dy = \frac{b-a}{4} \int_{\frac{a+b}{2}}^b |f'(y)|^2 dy.$$

将上面两式相加可得

$$\int_a^b |f(x)f'(x)|dx \leq \frac{b-a}{4} \int_a^b |f'(y)|^2 dy.$$

一般情况:

1. 只证 $q > 1$. $q = 1$ 可类似得到. 考虑

$$f(x) = \int_a^x f'(y) dy, F(x) = \int_a^x |f'(y)|^q dy.$$

则由 Hölder 不等式, 我们知道

$$|f(x)|^p \leq \left(\int_a^x |f'(y)| dy \right)^p \leq \left(\int_a^x |f'(y)|^q dy \right)^{\frac{p}{q}} \left(\int_a^x 1^{\frac{q}{q-1}} dy \right)^{\frac{p(q-1)}{q}} = F^{\frac{p}{q}}(x)(x-a)^{\frac{p(q-1)}{q}},$$

这里 $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. 于是

$$\begin{aligned} \int_a^b |f(x)|^p |f'(x)|^q dx &\leq \int_a^b F^{\frac{p}{q}}(x)(x-a)^{\frac{p(q-1)}{q}} |f'(x)|^q dx = \int_a^b F^{\frac{p}{q}}(x)(x-a)^{\frac{p(q-1)}{q}} dF(x) \\ &\leq (b-a)^{\frac{p(q-1)}{q}} \int_a^b F^{\frac{p}{q}}(x) dF(x) = \frac{q}{q+p} (b-a)^{\frac{p(q-1)}{q}} F^{\frac{p+q}{q}}(b) \\ &= \frac{q}{q+p} (b-a)^{\frac{p(q-1)}{q}} \left(\int_a^b |f'(y)|^q dy \right)^{\frac{p+q}{q}} \\ &\stackrel{\text{Cauchy 不等式}}{\leq} \frac{q}{q+p} (b-a)^{\frac{p(q-1)}{q}} \left(\int_a^b |f'(y)|^{q(\frac{p+q}{q})} dy \right)^{\frac{q}{q+p}} \left(\int_a^b 1^{(\frac{p+q}{q-1})} dy \right)^{\frac{q-1}{q+p}} \\ &= \frac{q(b-a)^p}{p+q} \int_a^b |f'(y)|^{p+q} dy, \end{aligned}$$

这就证明了不等式(7.4).

2. 由第一问得

$$\int_a^{\frac{a+b}{2}} |f(x)|^p |f'(x)|^q dx \leq \frac{q(b-a)^p}{(p+q)2^p} \int_a^{\frac{a+b}{2}} |f'(x)|^{p+q} dx,$$

对称得

$$\int_{\frac{a+b}{2}}^b |f(x)|^p |f'(x)|^q dx \leq \frac{q(b-a)^p}{(p+q)2^p} \int_{\frac{a+b}{2}}^b |f'(x)|^{p+q} dx.$$

故上面两式相加得到(7.5)式.

□

例题 7.5 设 $f \in C[0, 1]$ 满足 $\int_0^1 f(x) dx = 0$, 证明:

$$\left(\int_0^1 x f(x) dx \right)^2 \leq \frac{1}{12} \int_0^1 f^2(x) dx. \quad (7.6)$$

笔记 从条件 $\int_0^1 f(x) dx = 0$ 来看, 我们待定 $a \in \mathbb{R}$, 一定有

$$\int_0^1 x f(x) dx = \int_0^1 (x-a) f(x) dx.$$

然后利用 Cauchy 不等式得

$$\left(\int_0^1 (x-a) f(x) dx \right)^2 \leq \int_0^1 (x-a)^2 dx \int_0^1 f^2(x) dx.$$

为了使得不等式最精确, 我们自然希望 $\int_0^1 (x-a)^2 dx$ 达到最小值. 读者也可以直接根据对称性猜测出 $a = \frac{1}{2}$ 就是

达到最小值的 a .

证明 利用 Cauchy 不等式得

$$\frac{1}{12} \int_0^1 f^2(x) dx = \int_0^1 \left(x - \frac{1}{2}\right)^2 dx \int_0^1 f^2(x) dx \geq \left(\int_0^1 \left(x - \frac{1}{2}\right) f(x) dx\right)^2 = \left(\int_0^1 x f(x) dx\right)^2,$$

这就证明了(7.6)式. \square

例题 7.6 设 $f \in C^1[0, 1]$, $\int_{\frac{1}{3}}^{\frac{2}{3}} f(x) dx = 0$, 证明

$$\int_0^1 |f'(x)|^2 dx \geq 27 \left(\int_0^1 f(x) dx\right)^2.$$

笔记 为了分部积分提供 0 边界且求导之后不留下东西, 设 $g(0) = g(1) = 0$ 且 g 是一次函数, 这不可能, 于是只能是分段函数 $g(x) = \begin{cases} x-1, & c \leq x \leq 1 \\ x, & 0 \leq x \leq c \end{cases}$. 为了让 g 连续会发现 $c = c-1$, 这不可能. 结合 $\int_{\frac{1}{3}}^{\frac{2}{3}} f(x) dx = 0$, 所以我们插入一段来使得连续, 因此真正构造的函数为

$$g(x) = \begin{cases} x-1, & \frac{2}{3} \leq x \leq 1 \\ 1-2x, & \frac{1}{3} \leq x \leq \frac{2}{3} \\ x, & 0 \leq x \leq \frac{1}{3} \end{cases}.$$

证明 令

$$g(x) = \begin{cases} x-1, & \frac{2}{3} \leq x \leq 1 \\ 1-2x, & \frac{1}{3} \leq x \leq \frac{2}{3} \\ x, & 0 \leq x \leq \frac{1}{3} \end{cases}.$$

于是由 Cauchy 不等式, 我们有

$$\begin{aligned} \int_0^1 |f'(x)|^2 dx \int_0^1 |g(x)|^2 dx &\geq \left(\int_0^1 f'(x)g(x) dx\right)^2 \xrightarrow{\text{分部积分}} \left(\int_0^1 f(x)g'(x) dx\right)^2 \\ &= \left(\int_0^{\frac{1}{3}} f(x) dx - 2 \int_{\frac{1}{3}}^{\frac{2}{3}} f(x) dx + \int_{\frac{2}{3}}^1 f(x) dx\right)^2 = \left(\int_0^{\frac{1}{3}} f(x) dx + \int_{\frac{1}{3}}^{\frac{2}{3}} f(x) dx + \int_{\frac{2}{3}}^1 f(x) dx\right)^2 = \left(\int_0^1 f(x) dx\right)^2, \end{aligned}$$

结合 $\int_0^1 |g(x)|^2 dx = \frac{1}{27}$, 这就完成了证明. \square

例题 7.7 设 $f \in C[a, b] \cap D(a, b)$ 且 $f(a) = f(b) = 0$ 且 f 不恒为 0, 证明存在一点 $\xi \in (a, b)$ 使得

$$|f'(\xi)| > \frac{4}{(b-a)^2} \int_a^b |f(x)| dx. \quad (7.7)$$

注 不妨设 $\int_a^b f(x) dx > 0$ 的原因: 若 $\int_a^b f(x) dx < 0$ 则用 $-f$ 代替 f , $\int_a^b f(x) dx = 0$ 是平凡的.

证明 反证, 若 $|f'(x)| \leq \frac{4}{(b-a)^2} \int_a^b |f(x)| dx \triangleq M$, 则不妨设 $\int_a^b f(x) dx > 0$, 由 Hermite 插值定理可知, 存在 $\theta_1 \in (a, x), \theta_2 \in (x, b)$, 使得

$$f(x) = f(a) + f'(\theta_1)(x-a) \leq M(x-a), \forall x \in \left[a, \frac{a+b}{2}\right].$$

$$f(x) = f(b) + f'(\theta_2)(x-b) \leq -M(x-b) = M(b-x), \forall x \in \left[\frac{a+b}{2}, b\right].$$

从而

$$\int_a^b |f(x)|dx \leq \int_a^{\frac{a+b}{2}} M(x-a)dx + \int_{\frac{a+b}{2}}^b M(b-x)dx = \frac{M(b-a)^2}{4} = \int_a^b |f(x)|dx.$$

于是结合 f 的连续性及 $M(x-a) - f(x), M(b-x) - f(x) \geq 0 (\forall x \in [a, b])$ 可得

$$\int_a^{\frac{a+b}{2}} f(x)dx = \int_a^{\frac{a+b}{2}} M(x-a)dx \implies \int_a^{\frac{a+b}{2}} [M(x-a) - f(x)]dx = 0 \implies f(x) = M(x-a), \forall x \in \left[a, \frac{a+b}{2}\right].$$

$$\int_{\frac{a+b}{2}}^b f(x)dx = \int_{\frac{a+b}{2}}^b M(b-x)dx \implies \int_{\frac{a+b}{2}}^b [M(b-x) - f(x)]dx = 0 \implies f(x) = M(b-x), \forall x \in \left[\frac{a+b}{2}, b\right].$$

故 f 在 $x = \frac{a+b}{2}$ 处不可导, 这与 $f \in D(a, b)$ 矛盾!

□

例题 7.8 设 $f \in C^1[0, \pi]$ 且满足 $\int_0^\pi f(x)dx = 0$, 证明:

$$|f(x)| \leq \sqrt{\frac{\pi}{3} \int_0^\pi |f'(t)|^2 dt}, \forall x \in [0, \pi].$$

注 原不等式等价于

$$f^2(x) \leq \frac{\pi}{3} \int_0^\pi |f'(t)|^2 dt, \forall x \in [0, \pi].$$

显然要利用 Cauchy 不等式, 先待定 $g(x)$, 由 Cauchy 不等式可得

$$\int_0^\pi |f'(t)|^2 dt \int_0^\pi g^2(t)dt \geq \left(\int_0^\pi f'(t)g(t)dt \right)^2, \forall x \in [0, \pi]. \quad (7.8)$$

此时, 我们希望对 $\forall x \in [0, \pi]$, 固定 x , 都有 $\int_0^\pi f'(t)g(t)dt = kf(x)$, 其中 k 为某一常数. 因此 $g(t)$ 必和 x 有关, 于是令

$$g(t) = \begin{cases} t - \pi, & t \in [x, \pi] \\ t, & t \in [0, x] \end{cases},$$

再代入(7.8)式验证即可.

实际上, 回忆定理 4.3 中的 Green 函数, 可以发现上述构造的 $g(x) = \frac{dk(x, t)}{dx}$, $x, t \in [0, \pi]$.

希望 $\int_0^\pi f(t)g'(t)dt = f(x)$, 考虑广义导数, 使得 $g'(x) = \delta(x)$. 实际上, 这里的 g 就是 H 函数 (详细参考 rudin 的泛函分析).

证明 对 $\forall x \in [0, \pi]$, 令

$$g(t) = \begin{cases} t - \pi, & t \in [x, \pi] \\ t, & t \in [0, x] \end{cases},$$

则

$$\begin{aligned} \left(\int_0^\pi f'(t)g(t)dt \right)^2 &= \left(\int_x^\pi (t - \pi)f'(t)dt + \int_0^x tf(t)dt \right)^2 \\ &\stackrel{\text{分部积分}}{=} \left(-(x - \pi)f'(x) - \int_x^\pi f(t)dt + xf(x) - \int_0^x f(t)dt \right)^2 \\ &= \pi^2 |f(x)|^2. \end{aligned}$$

$$\int_0^\pi g^2(t)dt = \int_x^\pi (t - \pi)^2 dt + \int_0^x t^2 dt = \frac{\pi}{3}(3x^2 - 3\pi x + \pi^2).$$

故由 Cauchy 不等式可得

$$\frac{\pi}{3}(3x^2 - 3\pi x + \pi^2) \int_0^\pi |f'(t)|^2 dt = \int_0^\pi |f'(t)|^2 dt \int_0^\pi g^2(t)dt \geq \left(\int_0^\pi f'(t)g(t)dt \right)^2 = \pi^2 |f(x)|^2, \forall x \in [0, \pi]$$

即

$$|f(x)|^2 \leq \frac{1}{3\pi} (3x^2 - 3\pi x + x^2) \int_0^\pi |f'(t)|^2 dt \leq \frac{\pi}{3} \int_0^\pi |f'(t)|^2 dt, \forall x \in [0, \pi]$$

□

命题 7.1 (反向 Cauchy 不等式)

设 $f, g \in R[a, b]$, $g \geq 0, 0 < m \leq f \leq M$, 证明

$$\left(\int_a^b g(x) dx \right)^2 \leq \int_a^b \frac{g(x)}{f(x)} dx \int_a^b f(x) g(x) dx \leq \frac{1}{4} \left(\sqrt{\frac{M}{m}} + \sqrt{\frac{m}{M}} \right)^2 \left(\int_a^b g(x) dx \right)^2.$$

◆

证明 由 Cauchy 不等式可得

$$\left(\int_a^b g(x) dx \right)^2 = \left(\int_a^b \sqrt{f(x)g(x)} \cdot \sqrt{\frac{g(x)}{f(x)}} dx \right)^2 \leq \int_a^b \left[\sqrt{f(x)g(x)} \right]^2 dx \int_a^b \left[\sqrt{\frac{g(x)}{f(x)}} \right]^2 dx = \int_a^b f(x)g(x) dx \int_a^b \frac{g(x)}{f(x)} dx.$$

故第一个不等式成立. 下证第二个不等式. 由条件和均值不等式可知

$$\begin{aligned} \int_a^b \frac{[f(x) - m][M - f(x)]}{f(x)} g(x) dx &\geq 0 \iff \int_a^b \frac{Mf(x) + mf(x) - mM - f^2(x)}{f(x)} g(x) dx \geq 0 \\ &\iff (M+m) \int_a^b g(x) dx \geq mM \int_a^b \frac{g(x)}{f(x)} dx + \int_a^b f(x)g(x) dx \geq 2\sqrt{mM} \sqrt{\int_a^b \frac{g(x)}{f(x)} dx \int_a^b f(x)g(x) dx}. \end{aligned}$$

故

$$\int_a^b \frac{g(x)}{f(x)} dx \int_a^b f(x)g(x) dx \leq \left[\frac{(M+m)}{2\sqrt{mM}} \int_a^b g(x) dx \right]^2.$$

即

$$\int_a^b \frac{g(x)}{f(x)} dx \int_a^b f(x)g(x) dx \leq \frac{1}{4} \left(\sqrt{\frac{M}{m}} + \sqrt{\frac{m}{M}} \right)^2 \left(\int_a^b g(x) dx \right)^2.$$

□

例题 7.9 设 $f, g \in R[a, b]$ 满足

$$0 < m \leq f(x) \leq M, \quad \int_a^b g(x) dx = 0.$$

证明:

$$\left(\int_a^b f(x)g(x) dx \right)^2 \leq \left(\frac{M-m}{M+m} \right)^2 \int_a^b f^2(x) dx \int_a^b g^2(x) dx.$$

注 待定常数 k , 由条件 $\int_a^b g(x) dx = 0$ 和 Cauchy 不等式可得

$$\left(\int_a^b f(x)g(x) dx \right)^2 = \left(\int_a^b (f(x) - k)g(x) dx \right)^2 \leq \int_a^b (f(x) - k)^2 dx \int_a^b g^2(x) dx.$$

于是我们希望

$$\int_a^b (f(x) - k)^2 dx \int_a^b g^2(x) dx \leq \left(\frac{M-m}{M+m} \right)^2 \int_a^b f^2(x) dx \int_a^b g^2(x) dx.$$

从而希望

$$(f(x) - k)^2 \leq \left(\frac{M-m}{M+m} \right)^2 f^2(x).$$

又因为 $m \leq f(x) \leq M$, 所以只需要下式成立即可

$$(t - k)^2 \leq \left(\frac{M-m}{M+m} \right)^2 t^2, \quad \forall t \in [m, M]. \quad (7.9)$$

我们只需要找到出一个合适的 k , 使这个 k 满足上式即可.

现在, 我们先求不等式 $(t-k)^2 \leq Ct^2, \forall t \in [m, M]$ 的最佳系数 C . 即求最小的 $C > 0$, 存在 $k \in \mathbb{R}$, 使得

$$(t-k)^2 \leq Ct^2, \quad \forall t \in [m, M].$$

上式等价于

$$\left(1 - \frac{k}{t}\right)^2 \leq C, \quad \forall t \in [m, M] \iff \left(1 - \frac{k}{M}\right)^2, \left(1 - \frac{k}{m}\right)^2 \leq C.$$

令 $h(x) \triangleq \max \left\{ \left(1 - \frac{x}{M}\right)^2, \left(1 - \frac{x}{m}\right)^2 \right\}$, 则 $C = \min_{x \in \mathbb{R}} h(x), k$ 是 $h(x)$ 的最小值点.

(画图) 易知 $h(x)$ 的最小值就在 $\left(1 - \frac{x}{M}\right)^2$ 和 $\left(1 - \frac{x}{m}\right)^2$ 中间的一个交点处取到, 即 $k \in \left(\frac{1}{M}, \frac{1}{m}\right)$. 于是由 $\left(1 - \frac{x}{M}\right)^2 = \left(1 - \frac{x}{m}\right)^2$ 可得

$$(i) \quad 1 - \frac{x}{M} = 1 - \frac{x}{m} \implies x = 0, \quad h(0) = 1,$$

$$(ii) \quad 1 - \frac{x}{M} = \frac{x}{m} - 1 \implies 2 = \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{M}\right)x \implies x = \frac{2mM}{M+m}, \quad h\left(\frac{2mM}{M+m}\right) = \left(\frac{M-m}{M+m}\right)^2.$$

故 $k = \frac{2mM}{M+m}, C = \left(\frac{M-m}{M+m}\right)^2$. 再结合 (7.9) 式, 可知原不等式的系数就是最佳系数, 并且此时我们找到了证明需要的 $k = \frac{2mM}{M+m}$. 证明只需要将 $k = \frac{2mM}{M+m}$ 代入上述步骤验证即可.

证明 由条件 $\int_a^b g(x) dx = 0$ 和 Cauchy 不等式可得

$$\begin{aligned} \left(\int_a^b f(x)g(x) dx \right)^2 &= \left(\int_a^b \left(f(x) - \frac{2mM}{M+m} \right) g(x) dx \right)^2 \\ &\leq \int_a^b \left(f(x) - \frac{2mM}{M+m} \right)^2 dx \int_a^b g^2(x) dx. \end{aligned} \tag{7.10}$$

注意到

$$\left(t - \frac{2mM}{M+m} \right)^2 - \left(\frac{M-m}{M+m} \right)^2 t = \frac{4mM(t-M)(m-t)}{(m+M)^2} \leq 0, \quad \forall t \in [m, M].$$

因此由 $f(x) \in [m, M], \forall x \in \mathbb{R}$ 可得

$$\left(f(x) - \frac{2mM}{M+m} \right)^2 \leq \left(\frac{M-m}{M+m} \right)^2 f^2(x), \quad \forall x \in \mathbb{R}.$$

于是再结合 (7.10) 式可得

$$\left(\int_a^b f(x)g(x) dx \right)^2 \leq \int_a^b \left(f(x) - \frac{2mM}{M+m} \right)^2 dx \int_a^b g^2(x) dx \leq \left(\frac{M-m}{M+m} \right)^2 \int_a^b f^2(x) dx \int_a^b g^2(x) dx, \forall x \in \mathbb{R}.$$

□

例题 7.10 设 $f \in C^2[0, 1]$ 满足 $f(0) = f(1) = f'(0) = 0, f'(1) = 1$. 证明

$$\int_0^1 |f''(x)|^2 dx \geq 4.$$

注 待定 $g(x)$, 由 Cauchy 不等式及条件可得

$$\begin{aligned} \int_0^1 |f''(x)|^2 dx \int_0^1 g^2(x) dx &\geq \left(\int_0^1 f''(x)g(x) dx \right)^2 \\ &\stackrel{\text{分部积分}}{=} \left(g(1) - \int_0^1 f'(x)g'(x) dx \right)^2 \\ &\stackrel{\text{分部积分}}{=} \left(g(1) + \int_0^1 f(x)g''(x) dx \right)^2. \end{aligned}$$

将上式两边与要证不等式对比, 我们希望 $g''(x) \equiv 0$, 从而 $\int_0^1 f(x)g''(x) dx = 0$, 于是上式可化为

$$\begin{aligned} \int_0^1 |f''(x)|^2 dx \int_0^1 g^2(x) dx &\geq g^2(1) \\ \iff \int_0^1 |f''(x)|^2 dx &\geq \frac{g^2(1)}{\int_0^1 g^2(x) dx}. \end{aligned} \quad (7.11)$$

因此只要 $g(x)$ 还满足 $\frac{g^2(1)}{\int_0^1 g^2(x) dx} \geq 4$ 即可.

因为 $g''(x) \equiv 0$, 所以我们可以设 $g(x)$ 为一次函数, 即 $g(x) = ax + b, a \neq 0$. 又因为 $\frac{g^2(1)}{\int_0^1 g^2(x) dx}$ 越大, 不等式 (7.11) 越强, 所以现在我们想要找到一个一次函数 $g(x)$ 使得 $\frac{g^2(1)}{\int_0^1 g^2(x) dx}$ 达到最大值.

不妨设 $g(x) = ax - 1, a \neq 0$, 否则用 $-bg(x)$ 代替 $g(x)$, 不改变 $\frac{g^2(1)}{\int_0^1 g^2(x) dx}$ 的取值. 此时, 我们有

$$\frac{g^2(1)}{\int_0^1 g^2(x) dx} = 3 \cdot \frac{a^2 - 2a + 1}{a^2 - 3a + 3} = 3 \left(1 + \frac{a}{a^2 - 3a + 3}\right).$$

令 $h(a) = \frac{a}{a^2 - 3a + 3}$, 则由 $h'(a) = \frac{3 - a^2}{(a^2 - 3a + 3)^2} = 0$ 可得 h 的极大值点为 $a = \sqrt{3}$. 又因为

$$\lim_{a \rightarrow -\infty} h(a) = \lim_{a \rightarrow -\infty} \frac{a}{a^2 - 3a + 3} = 0, \quad h(\sqrt{3}) = \frac{\sqrt{3}}{6 - 3\sqrt{3}} = \frac{3 + 2\sqrt{3}}{3}.$$

所以 $\max_{a \in \mathbb{R}} h(a) = \frac{2\sqrt{3} + 3}{3}$. 从而

$$\max_{a \in \mathbb{R}} \frac{g^2(1)}{\int_0^1 g^2(x) dx} = \max_{a \in \mathbb{R}} 3 \left(1 + \frac{a}{a^2 - 3a + 3}\right) = 3 \left(1 + \max_{a \in \mathbb{R}} h(a)\right) = 6 + 2\sqrt{3} > 4.$$

综上, 取 $g(x) = \sqrt{3}x - 1$, 就能得到

$$\int_0^1 |f''(x)|^2 dx \geq \frac{g^2(1)}{\int_0^1 g^2(x) dx} = 6 + 2\sqrt{3} > 4.$$

实际上, $6 + 2\sqrt{3}$ 就是原不等式的最佳下界. 只需要再将 $g(x) = \sqrt{3}x - 1$ 代入最开始的 Cauchy 不等式验证即可.

证明 令 $g(x) = \sqrt{3}x - 1$, 则

$$g''(x) \equiv 0, \quad g(1) = \sqrt{3} - 1.$$

于是由 Cauchy 不等式及条件可得

$$\begin{aligned} \int_0^1 |f''(x)|^2 dx \int_0^1 g^2(x) dx &\geq \left(\int_0^1 f''(x)g(x) dx\right)^2 \\ \stackrel{\text{分部积分}}{=} \left(g(1) - \int_0^1 f'(x)g'(x) dx\right)^2 &\stackrel{\text{分部积分}}{=} \left(g(1) + \int_0^1 f(x)g''(x) dx\right)^2. \end{aligned}$$

从而

$$\int_0^1 |f''(x)|^2 dx \geq \frac{g^2(1)}{\int_0^1 g^2(x) dx} = \frac{(\sqrt{3} - 1)^2}{\int_0^1 (\sqrt{3}x - 1)^2 dx} = 6 + 2\sqrt{3} > 4.$$

□

例题 7.11 设 $f \in C^2[0, 2]$, 证明:

$$\int_0^2 |f''(x)|^2 dx \geq \frac{3}{2} [f(0) + f(2) - 2f(1)]^2.$$

注 不妨设 $f(0) = f(2) = 0, f(1) = 1$ 的原因:

(1) 当 $f(0) + f(2) - 2f(1) = 0$ 时, 结论显然成立.

(2) 当 $f(0) + f(2) - 2f(1) \neq 0$ 时, 则待定 a, b, c , 令 $g(x) = c_0 f(x) - a_0 x - b_0$, 希望 $g(0) = g(2) = 0, g(1) = 1$, 即

$$\begin{pmatrix} -2 & -1 & f(2) \\ 0 & -1 & f(0) \\ -1 & -1 & f(1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (7.12)$$

注意到上述方程的系数行列式为

$$\begin{vmatrix} -2 & -1 & f(2) \\ 0 & -1 & f(0) \\ -1 & -1 & f(1) \end{vmatrix} = f(0) + f(2) - 2f(1) \neq 0.$$

故由 Cramer 法则可知, 存在唯一的解 $a = a_0, b = b_0, c = c_0$ 满足方程组 (7.12). 即 $g(x) = c_0 f(x) - a_0 x - b_0$ 满足 $g(0) = g(2) = 0, g(1) = 1$.

下证不妨设成立. 假设原不等式已经对 $f(0) = f(2) = 0, f(1) = 1$ 的情况成立, 则对一般的 $f(x)$ 而言, 令 $g(x) = c_0 f(x) - a_0 x - b_0$, 显然 $g''(x) = c_0 f''(x)$, 并且由上述推导可知 $g(0) = g(2) = 0, g(1) = 1$. 从而此时由假设可得

$$\int_0^2 |g''(x)|^2 dx \geq \frac{3}{2} [g(0) + g(2) - 2g(1)]^2.$$

于是

$$\begin{aligned} |c_0|^2 \int_0^2 |f''(x)|^2 dx &= \int_0^2 |g''(x)|^2 dx \geq \frac{3}{2} [g(0) + g(2) - 2g(1)]^2 \\ &= \frac{3}{2} [(c_0 f(0) - b_0) + (c_0 f(2) - 2a_0 - b_0) - 2(c_0 f(1) - a_0 - b_0)]^2 \\ &= \frac{3 |c_0|^2}{2} [f(0) + f(2) - 2f(1)]^2. \end{aligned}$$

故

$$\int_0^2 |f''(x)|^2 dx \geq \frac{3}{2} [f(0) + f(2) - 2f(1)]^2.$$

因此不妨设成立.

于是我们可以不妨设 $f(0) = f(2) = 0, f(1) = 1$, 否则用 $c_0 f(x) - a_0 x - b_0$ 代替即可. 从而只须证

$$\int_0^2 |f''(x)|^2 dx \geq \frac{3}{2} [f(0) + f(2) - 2f(1)]^2 = 6.$$

显然要利用 Cauchy 不等式, 因此待定 $g(x)$, 由 Cauchy 不等式可得

$$\int_0^2 |f''(x)|^2 dx \int_0^2 g^2(x) dx \geq \left(\int_0^2 f''(x)g(x) dx \right)^2.$$

对上式右边分部积分可得

$$\left(\int_0^2 f''(x)g(x) dx \right)^2 = \left(f'(2)g(2) - f'(0)g(0) - \int_0^2 f'(x)g'(x) dx \right)^2. \quad (7.13)$$

于是我们希望 $g'(x) \equiv C$, 其中 C 为某一常数, $g(2) = g(0) = 0$, 从而设 $g(x)$ 为一次函数, 即设 $g(x) = px + q$. 从而由 $g(2) = g(0) = 0$ 可得 $q = p = 0$, 进而 $g \equiv 0$, 显然不行!

因此我们猜测 $g(x)$ 为满足 $g(2) = g(0) = 0$ 的分段一次函数, 则待定 m , 令

$$g(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq 1 \\ m(x-2), & 1 < x \leq 2 \end{cases}.$$

(因为有 $f(1) = 1$ 这个条件, 所以选先 $x = 1$ 为分段点) 又由 (7.13) 式可知需要 f 和 g 都连续才能分部积分, 因此 g 在 $x = 1$ 处要连续, 故 $m = -1$, 即

$$g(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq 1 \\ 2-x, & 1 < x \leq 2 \end{cases}.$$

再代入 (7.13) 式中验证即可得到证明.

证明 不妨设 $f(0) = f(2) = 0, f(1) = 1$, 否则用 $c_0 f(x) - a_0 x - b_0$ 代替即可. 令

$$g(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq 1 \\ 2-x, & 1 < x \leq 2 \end{cases},$$

则

$$\int_0^2 g^2(x) dx = \frac{2}{3}, \quad \left(\int_0^2 f'(x)g'(x) dx \right)^2 = (f(1) - f(0) - f(2) + f(1))^2 = 4.$$

于是由 Cauchy 不等式可得

$$\begin{aligned} \int_0^2 |f''(x)|^2 dx \int_0^2 g^2(x) dx &\geq \left(\int_0^2 f''(x)g(x) dx \right)^2 \xrightarrow{\text{分部积分}} \left(\int_0^2 f'(x)g'(x) dx \right)^2 \\ \iff \frac{2}{3} \int_0^2 |f''(x)|^2 dx &\geq 4 \iff \int_0^2 |f''(x)|^2 dx \geq 6. \end{aligned}$$

□

例题 7.12 设 $f \in C^1[0, 1], f(0) = f(1) = -\frac{1}{6}$, 证明

$$\int_0^1 |f'(x)|^2 dx \geq 2 \int_0^1 f(x) dx + \frac{1}{4}.$$

 **笔记** 注意到不等式左右不是齐次的, 不是自然的不等式, 但我们一定可以得到一个自然的不等式.

注 显然要利用 Cauchy 不等式, 待定 $g(x)$, 由 Cauchy 不等式和条件可得

$$\int_0^1 |f'(x)|^2 dx \int_0^1 g^2(x) dx \geq \left(\int_0^1 f'(x)g(x) dx \right)^2 \xrightarrow{\text{分部积分}} \left(-\frac{1}{6}g(1) + \frac{1}{6}g(0) - \int_0^1 f(x)g'(x) dx \right)^2. \quad (7.14)$$

将上式与要证不等式对比, 于是我们希望 $g'(x) = C$, 其中 C 为某一常数. 这样才能使

$$\int_0^1 f(x)g'(x) dx = C \int_0^1 f(x) dx,$$

进而不等式右边才会出现我们需要的 $\int_0^1 f(x) dx$. 从而待定的 $g(x)$ 为线性函数. 设 $g(x) = ax + c, a \neq 0$, 进而不妨设 $g(x) = x + c$, 否则用 $\frac{1}{a}g$ 代替 g 仍有不等式 (7.14)(因为不等式两边齐次). 于是不等式 (7.14) 可化为

$$\begin{aligned} \frac{3c^2 + 3c + 1}{3} \int_0^1 |f'(x)|^2 dx &= \int_0^1 |f'(x)|^2 dx \int_0^1 (x + c)^2 dx \\ &\geq \left(-\frac{1}{6}(1+c) + \frac{1}{6}c - \int_0^1 f(x) dx \right)^2 \\ &= \left(\frac{1}{6} + \int_0^1 f(x) dx \right)^2 \\ \iff \int_0^1 |f'(x)|^2 dx &\geq \frac{3}{3c^2 + 3c + 1} \left(\frac{1}{6} + \int_0^1 f(x) dx \right)^2. \end{aligned} \quad (7.15)$$

因此只需要找到一个合适的 c , 使得上述不等式右边满足

$$\frac{3}{3c^2 + 3c + 1} \left(\frac{1}{6} + \int_0^1 f(x) dx \right)^2 \geq 2 \int_0^1 f(x) dx + \frac{1}{4}. \quad (7.16)$$

即对 $\forall t = \int_0^1 f(x) dx \in \mathbb{R}$, 找到一个 c , 记 $K = \frac{3}{3c^2 + 3c + 1} \in \mathbb{R}$, 使得

$$K \left(\frac{1}{6} + t \right)^2 \geq 2t + \frac{1}{4} \iff \Delta = \frac{12 - K}{3} \leq 0 \iff K \geq 12.$$

因此取 $c = -\frac{1}{2}$, 得 $K = \frac{3}{3c^2 + 3c + 1} = 12$.

综上, 令 $g(x) = x - \frac{1}{2}$, 则由(7.15)和(7.16)式可知

$$\int_0^1 |f'(x)|^2 dx \geq \frac{3}{3c^2 + 3c + 1} \left(\frac{1}{6} + \int_0^1 f(x) dx \right)^2 \geq 2 \int_0^1 f(x) dx + \frac{1}{4}.$$

只需要将 $g(x) = x - \frac{1}{2}$ 代入上述步骤进行验证即可得到证明.

证明 令 $g(x) = x - \frac{1}{2}$, 则

$$\int_0^1 g^2(x) dx = \frac{1}{12}, \quad g(1) = \frac{1}{2}, \quad g(0) = -\frac{1}{2}.$$

于是由 Cauchy 不等式和条件可得

$$\begin{aligned} \int_0^1 |f'(x)|^2 dx \int_0^1 g^2(x) dx &\geq \left(\int_0^1 f'(x)g(x) dx \right)^2 \stackrel{\text{分部积分}}{=} \left(\frac{1}{6} + \int_0^1 f(x) dx \right)^2 \\ \iff \int_0^1 |f'(x)|^2 dx &\geq 12 \left(\frac{1}{6} + \int_0^1 f(x) dx \right)^2. \end{aligned}$$

注意到 $12 \left(\frac{1}{6} + t \right)^2 \geq 2t + \frac{1}{4}$ 对 $\forall t \in \mathbb{R}$ 恒成立, 故

$$\int_0^1 |f'(x)|^2 dx \geq 12 \left(\frac{1}{6} + \int_0^1 f(x) dx \right)^2 \geq 2 \int_0^1 f(x) dx + \frac{1}{4}.$$

□

例题 7.13(一类)Hilbert 不等式

1. 设 $f(x), g(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 中可积, 证明:

$$\iint_{[0,+\infty)} \frac{f(x)g(y)}{(\sqrt{x} + \sqrt{y})^2} dx dy \leq 2 \sqrt{\int_0^\infty f^2(x) dx \int_0^\infty g^2(x) dx}.$$

2. 设 N 为正整数, a_k, b_k 为实数, 证明:

$$\sum_{m,n=1}^N \frac{a_m b_n}{(\sqrt{m} + \sqrt{n})^2} \leq 2 \sqrt{\sum_{m=1}^N a_m^2 \cdot \sum_{n=1}^N b_n^2}.$$

证明

- 1.
- 2.

□

7.3 重积分方法

定理 7.7 (Chebeshev 不等式积分形式)

设 $p \in R[a, b]$ 且非负, f, g 在 $[a, b]$ 上是单调函数, 则

$$\left(\int_a^b p(x)f(x) dx \right) \left(\int_a^b p(x)g(x) dx \right) \leq \left(\int_a^b p(x) dx \right) \left(\int_a^b p(x)f(x)g(x) dx \right), f, g \text{ 单调性相同}$$

$$\left(\int_a^b p(x)f(x) dx \right) \left(\int_a^b p(x)g(x) dx \right) \geq \left(\int_a^b p(x) dx \right) \left(\int_a^b p(x)f(x)g(x) dx \right), f, g \text{ 单调性相反}$$

♡



笔记 本不等式要牢记于心, 它是很多不等式的基本模型, 其特征就是出现单调性.

注 证法二中的 $d\mu$ 应该看作测度.

证明 证法一：

$$\begin{aligned}
 & \left(\int_a^b p(x)f(x)dx \right) \left(\int_a^b p(x)g(x)dx \right) - \left(\int_a^b p(x)dx \right) \left(\int_a^b p(x)f(x)g(x)dx \right) \\
 &= \left(\int_a^b p(x)f(x)dx \right) \left(\int_a^b p(y)g(y)dy \right) - \left(\int_a^b p(x)dx \right) \left(\int_a^b p(y)f(y)g(y)dy \right) \\
 &= \iint_{[a,b]^2} p(x)p(y)g(y)[f(x) - f(y)]dxdy \\
 &\stackrel{\text{对称性}}{=} \iint_{[a,b]^2} p(y)p(x)g(x)[f(y) - f(x)]dxdy \\
 &= \frac{1}{2} \iint_{[a,b]^2} p(x)p(y)[g(y) - g(x)][f(x) - f(y)]dxdy,
 \end{aligned}$$

故结论得证.

证法二：令 $\frac{p(x)}{\int_a^b p(x)dx} dx = d\mu$, 则 $\int_a^b d\mu = \int_a^b \frac{p(x)}{\int_a^b p(x)dx} dx = 1$. 于是原不等式等价于

$$\begin{aligned}
 & \int_a^b f(x)d\mu \int_a^b g(x)d\mu - \int_a^b f(x)g(x)d\mu \\
 &= \int_a^b f(x)d\mu \int_a^b g(y)d\mu - \int_a^b \int_a^b f(y)g(y)d\mu(y)d\mu(x) \\
 &= \int_a^b \int_a^b [f(x) - f(y)]g(y)d\mu(y)d\mu(x) \\
 &= \int_a^b \int_a^b [f(y) - f(x)]g(x)d\mu(y)d\mu(x) \\
 &= \frac{1}{2} \int_a^b \int_a^b [f(x) - f(y)][g(y) - g(x)]
 \end{aligned}$$

故结论得证.

□

例题 7.14 设 $f \in C[0, 1]$ 递减恒正, 证明

$$\frac{\int_0^1 f^2(x)dx}{\int_0^1 f(x)dx} \geq \frac{\int_0^1 xf^2(x)dx}{\int_0^1 xf(x)dx}.$$

证明

$$\frac{\int_0^1 f^2(x)dx}{\int_0^1 f(x)dx} \geq \frac{\int_0^1 xf^2(x)dx}{\int_0^1 xf(x)dx}.$$

原不等式等价于

$$\left(\int_0^1 f^2(x)dx \right) \left(\int_0^1 xf(x)dx \right) \geq \left(\int_0^1 xf^2(x)dx \right) \left(\int_0^1 f(x)dx \right).$$

令 $\frac{f(x)}{\int_0^1 f(x)dx} dx = d\mu$, 则上式等价于

$$\int_0^1 f(x)d\mu \int_0^1 x d\mu \geq \int_0^1 xf(x)d\mu.$$

上式由 Chebyshev 不等式积分形式可直接得到.

□

命题 7.2 (反向切比雪夫不等式)

设 $f, g \in R[a, b]$ 且 $m_1 \leq f(x) \leq M_1, m_2 \leq g(x) \leq M_2$, 证明

$$\left| \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x)g(x)dx - \frac{1}{(b-a)^2} \int_a^b f(x)dx \int_a^b g(x)dx \right| \leq \frac{(M_2 - m_2)(M_1 - m_1)}{4}.$$

◆

注 不妨设 $a = 0, b = 1$ 的原因: 假设当 $a = 0, b = 1$ 时,

$$\left| \int_0^1 f(x)g(x)dx - \int_0^1 f(x)dx \int_0^1 g(x)dx \right| \leq \frac{(M_2 - m_2)(M_1 - m_1)}{4}$$

成立. 则对一般的 $[a, b]$, 原不等式等价于

$$\left| \int_0^1 f(a + (b - a)x)g(a + (b - a)x)dx - \int_0^1 f(a + (b - a)x)dx \int_0^1 g(a + (b - a)x)dx \right| \leq \frac{(M_2 - m_2)(M_1 - m_1)}{4}. \quad (7.17)$$

又注意到 $f(a + (b - a)x), g(a + (b - a)x) \in R[0, 1]$, 且 $f(x) \in [m_1, M_1]$, $g(x) \in [m_2, M_2]$. 故由假设可知(7.17)式成立. 因此不妨设也成立.

笔记 积累本题的想法.

证明 不妨设 $a = 0, b = 1$, 则记 $A = \int_0^1 f(x)dx, B = \int_0^1 g(x)dx$. 于是

$$\begin{aligned} & \left| \int_0^1 f(x)g(x)dx - \int_0^1 f(x)dx \int_0^1 g(x)dx \right|^2 = \left| \int_0^1 (f(x) - A)(g(x) - B)dx \right|^2 \\ & \stackrel{\text{Cauchy 不等式}}{\leq} \int_0^1 |f(x) - A|^2 dx \cdot \int_0^1 |g(x) - B|^2 dx \\ & = \left(\int_0^1 |f(x)|^2 dx - \left(\int_0^1 f(x)dx \right)^2 \right) \cdot \left(\int_0^1 |g(x)|^2 dx - \left(\int_0^1 g(x)dx \right)^2 \right). \end{aligned}$$

注意到

$$\int_0^1 (M_1 - f)(f - m_1)dx = M_1 A + m_1 A - M_1 m_1 - \int_0^1 |f(x)|^2 dx,$$

于是我们有

$$\begin{aligned} \int_0^1 |f(x)|^2 dx - \left(\int_0^1 f(x)dx \right)^2 &= \int_0^1 |f(x)|^2 dx - A^2 = (M_1 - A)(A - m_1) - \int_0^1 (M_1 - f)(f - m_1)dx \\ &\leq (M_1 - A)(A - m_1) \leq \frac{(M_1 - m_1)^2}{4}. \end{aligned}$$

最后一个不等号可由均值不等式或看出二次函数取最值得到. 类似的有

$$\int_0^1 |g(x)|^2 dx - \left(\int_0^1 g(x)dx \right)^2 \leq \frac{(M_2 - m_2)^2}{4},$$

这就证明了

$$\left| \int_0^1 f(x)g(x)dx - \int_0^1 f(x)dx \int_0^1 g(x)dx \right|^2 \leq \frac{(M_1 - m_1)^2}{4} \frac{(M_2 - m_2)^2}{4},$$

即原不等式成立. □

例题 7.15 设 $f \in C[a, b]$ 且

$$0 \leq f(x) \leq M, \forall x \in [a, b].$$

证明

$$\left(\int_a^b f(x) \cos x dx \right)^2 + \left(\int_a^b f(x) \sin x dx \right)^2 + \frac{M^2(b - a)^4}{12} \geq \left(\int_a^b f(x) dx \right)^2. \quad (7.18)$$

注 由 Taylor 公式可得不等式:

$$\cos x \geq 1 - \frac{x^2}{2}, \forall x \in \mathbb{R}. \quad (7.19)$$

$\sin x < x$ 两边同时在 $[0, 1]$ 上积分也可得 $1 - \cos x \leq \frac{x^2}{2}$.

证明 一方面

$$\begin{aligned} & \left(\int_a^b f(x) \cos x dx \right)^2 + \left(\int_a^b f(x) \sin x dx \right)^2 = \int_a^b f(x) \cos x dx \int_a^b f(y) \cos y dy + \int_a^b f(x) \sin x dx \int_a^b f(y) \sin y dy \\ &= \iint_{[a,b]^2} f(x)f(y)[\cos x \cos y + \sin x \sin y] dx dy = \iint_{[a,b]^2} f(x)f(y) \cos(x-y) dx dy. \end{aligned}$$

另一方面

$$\left(\int_a^b f(x) dx \right)^2 = \int_a^b f(x) dx \int_a^b f(y) dy = \iint_{[a,b]^2} f(x)f(y) dx dy.$$

于是不等式(7.18)变为

$$\iint_{[a,b]^2} f(x)f(y)[1 - \cos(x-y)] dx dy \leq \frac{M^2(b-a)^4}{12}. \quad (7.20)$$

事实上

$$\iint_{[a,b]^2} f(x)f(y)[1 - \cos(x-y)] dx dy \stackrel{(7.19)}{\leq} M^2 \iint_{[a,b]^2} \frac{(x-y)^2}{2} dx dy = \frac{M^2(b-a)^4}{12},$$

这就得到了不等式(7.20). \square

例题 7.16 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续可微, 记

$$\delta = \min_{x \in [a,b]} |f'(x)|, \Delta = \max_{x \in [a,b]} |f'(x)|.$$

证明:

$$\frac{1}{12}(b-a)^2 \delta^2 \leq \frac{1}{b-a} \int_a^b f^2(x) dx - \left(\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \right)^2 \leq \frac{1}{12}(b-a)^2 \Delta^2$$

证明 不妨设 $a = 0, b = 1$, 否则用 $f(bx + a(1-x))$ 代替 f . 再不妨设 $\int_0^1 f(x) dx = 1$, 否则用 $\frac{f(x)}{\int_0^1 f(x) dx}$ 代替 f . 于是只需证

$$\frac{1}{12} \left(\min_{x \in [0,1]} |f'| \right)^2 \leq \int_0^1 f^2(x) dx - 1 \leq \frac{1}{12} \left(\max_{x \in [0,1]} |f'| \right)^2.$$

由 Lagrange 中值定理可知, 对 $\forall x, y \in [0, 1]$, 都存在 $\xi \in [0, 1]$, 使得

$$\min_{x \in [0,1]} |f'| \cdot |x-y| \leq |f(x) - f(y)| = |f'(\xi)| \cdot |x-y| \leq \max_{x \in [0,1]} |f'| \cdot |x-y|$$

从而

$$\left(\min_{x \in [0,1]} |f'| \right)^2 (x-y)^2 \leq [f(x) - f(y)]^2 \leq \left(\max_{x \in [0,1]} |f'| \right)^2 (x-y)^2$$

对上式取二重积分得

$$\left(\min_{x \in [0,1]} |f'| \right)^2 \int_0^1 dx \int_0^1 (x-y)^2 dy \leq \int_0^1 dx \int_0^1 [f(x) - f(y)]^2 dy \leq \left(\max_{x \in [0,1]} |f'| \right)^2 \int_0^1 dx \int_0^1 (x-y)^2 dy \quad (7.21)$$

经计算得

$$\int_0^1 dx \int_0^1 (x-y)^2 dy = \int_0^1 \left(x^2 - x + \frac{1}{3} \right) dx = \frac{1}{6}$$

$$\begin{aligned} \int_0^1 dx \int_0^1 [f(x) - f(y)]^2 dy &= \int_0^1 \left[f^2(x) + \int_0^1 f^2(y) dy - 2f(x) \int_0^1 f(y) dy \right] dx \\ &= \int_0^1 f^2(x) dx + \int_0^1 f^2(y) dy - 2 \int_0^1 \left(f(x) \int_0^1 f(y) dy \right) dx \\ &= 2 \int_0^1 f^2(x) dx - 2 \int_0^1 f(x) dx \\ &= 2 \int_0^1 f^2(x) dx - 2 \end{aligned}$$

因此(7.21)式等价于

$$\begin{aligned} \frac{1}{6} \left(\min_{x \in [0,1]} |f'| \right)^2 &\leq 2 \int_0^1 f^2(x) dx - 2 \leq \frac{1}{6} \left(\max_{x \in [0,1]} |f'| \right)^2 \\ \iff \frac{1}{12} \left(\min_{x \in [0,1]} |f'| \right)^2 &\leq \int_0^1 f^2(x) dx - 1 \leq \frac{1}{12} \left(\max_{x \in [0,1]} |f'| \right)^2 \end{aligned}$$

故结论得证. \square

7.4 直接求导法

例题 7.17

1. 设 $f \in C^1[0, 1]$, $f(0) = 0$, $0 \leq f'(x) \leq 1$, 证明

$$\left[\int_0^1 f(x) dx \right]^2 \geq \int_0^1 f^3(x) dx,$$

并判断取等条件.

2. 设 f 在 $[0, a]$ 可导且 $f(0) = 0$, $0 \leq f'(x) \leq \lambda$, $\lambda > 0$ 为常数, 证明

$$\left[\int_0^a f(x) dx \right]^m \geq \frac{m}{(2\lambda)^{m-1}} \int_0^a f^{2m-1}(x) dx, \quad (7.22)$$

并判断取等条件.

证明

1. 由 $0 < f'(x)$ ($x > 0$) 及 $f(0) = 0$ 可知 $f(x) > 0$ ($0 < x \leq 1$). 设

$$g(t) = \int_0^t f^3(x) dx - \left(\int_0^t f(x) dx \right)^2 \quad (t \in [0, 1]),$$

则

$$g'(t) = f(t) \left(f^2(t) - 2 \int_0^t f(x) dx \right).$$

令 $h(t) = f^2(t) - 2 \int_0^t f(x) dx$, 则由 $0 < f'(x) \leq 1$ ($x > 0$) 可知

$$h'(t) = 2f(t)[f'(t) - 1] \leq 0, \forall t \in [0, 1].$$

从而 $h(t) \leq h(0) = 0$, $\forall t \in [0, 1]$. 于是 $g'(t) \leq 0$, $\forall t \in [0, 1]$. 因而 g 在 $[0, 1]$ 上单调递减. 由 $g(0) = 0$ 知 $g \leq 0$. 若

$$\int_0^1 f^3(x) dx = \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2,$$

则 $g(1) = 0$, 因而 $g(t) \equiv 0$. 所以

$$g'(t) = f(t) \left(f^2(t) - 2 \int_0^t f(x) dx \right) = 0.$$

这推出 $f \equiv 0$ 或 $f^2(t) = 2 \int_0^t f(x) dx$. 因而

$$2f(t)f'(t) = 2f(t) \quad (0 < t \leq 1).$$

这推出 $f'(t) = 1$, 即 $f(t) = t$. 故当 $f(t) \equiv 0$ 或 $f(t) = t$ 时等号成立.

2. 定义

$$g(x) = \left(\int_0^x f(t) dt \right)^m - \frac{m}{(2\lambda)^{m-1}} \int_0^x f^{2m-1}(t) dt.$$

求导得

$$g'(x) = mf(x) \left(\int_0^x f(t) dt \right)^{m-1} - \frac{m}{(2\lambda)^{m-1}} f^{2m-1}(x)$$

$$= mf(x) \left[\left(\int_0^x f(t) dt \right)^{m-1} - \frac{1}{(2\lambda)^{m-1}} f^{2m-2}(x) \right].$$

令 $h(x) = \int_0^x f(t) dt - \frac{f^2(x)}{2\lambda}$, 则

$$h'(x) = \left[\int_0^x f(t) dt - \frac{f^2(x)}{2\lambda} \right]' = f(x) - \frac{f(x)f'(x)}{\lambda} = \frac{f(x)}{\lambda} [\lambda - f'(x)] \geq 0,$$

从而 $h(x) \geq h(0) = 0$. 进而

$$h^{m-1}(x) \geq \left(\int_0^x f(t) dt \right)^{m-1} - \frac{1}{(2\lambda)^{m-1}} f^{2m-2}(x) \geq 0.$$

于是我们有

$$g'(x) \geq g'(0) = 0,$$

从而 g 递增且

$$g(a) \geq g(0) = 0,$$

这就是不等式(7.22). 要使得等号成立, 我们需要 g 为常数, 因此需要 $g' \equiv 0$, 故需要 $f \equiv 0$ 或者

$$\int_0^x f(t) dt - \frac{f^2(x)}{2\lambda} \equiv 0,$$

令 $y = \int_0^x f(t) dt$, 则上式等价于

$$y - \frac{(y')^2}{2\lambda} = 0$$

从而解上述微分方程得到取等条件是

$$f(x) = 0 \text{ 或者 } f(x) = \lambda x.$$

□

例题 7.18 设 $f, g \in C[a, b]$ 使得 f 递增且 $0 \leq g \leq 1$, 证明

$$\int_a^{a+\int_a^b g(t) dt} f(x) dx \leq \int_a^b f(x) g(x) dx \leq \int_{b-\int_a^b g(t) dt}^b f(x) dx. \quad (7.23)$$

证明 考虑

$$h(y) = \int_a^{a+\int_a^y g(t) dt} f(x) dx - \int_a^y f(x) g(x) dx.$$

则利用

$$a + \int_a^y g(x) dx \leq a + \int_a^y 1 dx = y,$$

再结合 f 递增, 我们有

$$h'(y) = g(y) f \left(a + \int_a^y g(t) dt \right) - f(y) g(y) \leq 0 \rightarrow h(b) \leq h(a) = 0,$$

故不等式(7.23)左侧得证. 另一侧不等式同理可得, 这就证明了不等式(7.23).

□

命题 7.3

设 f 是 $[a, b]$ 上单调递增的连续函数. 求证

$$\int_a^b x f(x) dx \geq \frac{a+b}{2} \int_a^b f(x) dx.$$



笔记 许多有关连续函数积分的不等式可以通过变上限积分的性质来证明.

证明 令

$$F(t) = \int_a^t xf(x)dx - \frac{a+t}{2} \int_a^t f(x)dx.$$

只需证明 $F(b) \geq 0$. 由于 f 是连续函数, F 在 $[a, b]$ 上可微, 且

$$\begin{aligned} F'(t) &= tf(t) - \frac{1}{2} \int_a^t f(x)dx - \frac{a+t}{2} f(t) \\ &= \frac{t-a}{2} f(t) - \frac{1}{2} \int_a^t f(x)dx \\ &\geq \frac{t-a}{2} f(t) - \frac{1}{2} (t-a) f(t) = 0. \end{aligned}$$

这说明 f 在 $[a, b]$ 上单调递增. 因为 $F(a) = 0$, 所以 $F(b) \geq 0$.

□

例题 7.19 设 f 是 $[0, 1]$ 上正的可导函数, 且满足 $|f'| \leq 1$. 记

$$m = \min f(x), \quad M = \max f(x), \quad \beta = \int_0^1 \frac{1}{f(x)} dx. \quad (7.24)$$

1. 求证: $M \leq me^\beta$.

2. 求证: 对 $n > -1$, 有

$$\int_0^1 f^n(x) dx \leq \frac{m^{n+1}}{n+1} (e^{(n+1)\beta} - 1). \quad (7.25)$$

注 第 2 问中, 令 $n = 0$, 可得 $\frac{m+1}{m} \leq e^\beta$. 式 (7.25) 两边开 n 次方根, 再令 $n \rightarrow +\infty$, 可得 $M \leq me^\beta$.

证明

1. 设 $m = f(x), M = f(y)$, 则有

$$\ln M - \ln m = \ln f(y) - \ln f(x) = \int_x^y \frac{f'(t)}{f(t)} dt \leq \int_0^1 \frac{1}{f(t)} dt = \beta.$$

因而有 $M \leq me^\beta$.

2. 设

$$h_1(t) = \frac{e^{(n+1)\beta_1(t)} - 1}{n+1} f^{n+1}(t) - \int_0^t f^n(x) dx, \quad t \in [0, 1],$$

$$h_2(t) = \frac{e^{(n+1)\beta_2(t)} - 1}{n+1} f^{n+1}(t) - \int_t^1 f^n(x) dx, \quad t \in [0, 1],$$

其中

$$\beta_1(t) = \int_0^t \frac{1}{f(x)} dx, \quad \beta_2(t) = \int_t^1 \frac{1}{f(x)} dx,$$

则有 $\beta_1 \geq 0, \beta_2 \geq 0, h_1(0) = 0, h_2(1) = 0$, 且

$$\begin{aligned} h_1'(t) &= e^{(n+1)\beta_1(t)} f^n(t) + (e^{(n+1)\beta_1(t)} - 1) f^n(t) f'(t) - f^n(t) \\ &= f^n(t) (e^{(n+1)\beta_1(t)} - 1) (1 + f'(t)) \geq 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_2'(t) &= -e^{(n+1)\beta_2(t)} f^n(t) + (e^{(n+1)\beta_2(t)} - 1) f^n(t) f'(t) + f^n(t) \\ &= f^n(t) (e^{(n+1)\beta_2(t)} - 1) (-1 + f'(t)) \leq 0, \end{aligned}$$

这说明 h_1 在 $[0, 1]$ 上单调递增, 而 h_2 在 $[0, 1]$ 上单调递减. 于是 h_1 和 h_2 都是非负函数, 即

$$\int_0^t f^n(x) dx \leq \frac{e^{(n+1)\beta_1(t)} - 1}{n+1} f^{n+1}(t), \quad (7.26)$$

$$\int_t^1 f^n(x) dx \leq \frac{e^{(n+1)\beta_2(t)} - 1}{n+1} f^{n+1}(t). \quad (7.27)$$

将以上两式相加, 可得

$$\int_0^1 f^n(x) dx \leq \frac{e^{(n+1)\beta_1(t)} + e^{(n+1)\beta_2(t)} - 2}{n+1} f^{n+1}(t). \quad (7.28)$$

容易证明对任意 $x > 0, y > 0$ 有

$$e^x + e^y - 2 < e^{x+y} - 1.$$

因此从式 (7.28) 可得

$$\int_0^1 f^n(x) dx \leq \frac{e^{(n+1)(\beta_1(t)+\beta_2(t))} - 1}{n+1} f^{n+1}(t) = \frac{e^{(n+1)\beta} - 1}{n+1} f^{n+1}(t),$$

这里 $t \in [0, 1]$ 是任意的. 故式 (7.25) 成立. \square

例题 7.20 设 $f \in C[a, b]$ 是一个正的连续函数, 且满足 Lipschitz 条件

$$|f(x) - f(y)| \leq L|x - y|.$$

对于区间 $[c, d] \subset [a, b]$, 记

$$\beta = \int_a^b \frac{1}{f(x)} dx, \quad \alpha = \int_c^d \frac{1}{f(x)} dx.$$

求证:

$$\int_a^b f(x) dx \leq \frac{e^{2L\beta} - 1}{2L\alpha} \int_c^d f(x) dx. \quad (7.29)$$

证明 只需证明对任意的 $t \in [a, b]$, 有

$$\int_a^b f(x) dx \leq \frac{e^{2L\beta} - 1}{2L} f^2(t), \quad (7.30)$$

这是因为将式 (7.30) 两端除以 $f(t)$, 然后关于变量 t 在区间 $[c, d]$ 上积分, 即得式 (7.29). 不妨假设 $a = 0, b = 1$, 不然考虑新的函数 $g(t) = (b-a)f(a(1-t)+bt) = (b-a)f(a+(b-a)t)$, $t \in [0, 1]$. g 满足 Lipschitz 条件 $|g(x_1) - g(x_2)| \leq L_1|x_1 - x_2|$, $L_1 = (b-a)^2L$. 由于 f 的 Bernstein 多项式 $B_n(f)$ 保持 f 的 Lipschitz 常数, 而且在 $[0, 1]$ 上一致收敛于 f , 我们一开始就可以假设 f 是可导的, 此时 $|f'| \leq L$.

以下就在 $a = 0, b = 1$ 且 $|f'| \leq L$ 的条件下证明式 (7.30). 设

$$\begin{aligned} h_1(t) &= \frac{e^{2L\beta_1(t)} - 1}{2L} f^2(t) - \int_0^t f(x) dx, \quad t \in [0, 1], \\ h_2(t) &= \frac{e^{2L\beta_2(t)} - 1}{2L} f^2(t) - \int_t^1 f(x) dx, \quad t \in [0, 1], \end{aligned}$$

其中

$$\beta_1(t) = \int_0^t \frac{1}{f(x)} dx, \quad \beta_2(t) = \int_t^1 \frac{1}{f(x)} dx.$$

则有 $h_1(0) = 0, h_2(1) = 0$, 且

$$\begin{aligned} h_1'(t) &= e^{2L\beta_1(t)} f(t) + \frac{e^{2L\beta_1(t)} - 1}{L} f(t) f'(t) - f(t) \\ &= \frac{e^{2L\beta_1(t)} - 1}{L} f(t)(L + f'(t)) \geq 0, \\ h_2'(t) &= -e^{2L\beta_2(t)} f(t) + \frac{e^{2L\beta_2(t)} - 1}{L} f(t) f'(t) + f(t) \\ &= \frac{e^{2L\beta_2(t)} - 1}{L} f(t)(f'(t) - L) \leq 0. \end{aligned}$$

这说明 h_1 在 $[0, 1]$ 上单调递增, 而 h_2 在 $[0, 1]$ 上单调递减. 于是 h_1 和 h_2 都是非负函数, 即

$$\int_0^t f(x) dx \leq \frac{e^{2L\beta_1(t)} - 1}{2L} f^2(t), \quad (7.31)$$

$$\int_t^1 f(x)dx \leq \frac{e^{2L\beta_2(t)} - 1}{2L} f^2(t). \quad (7.32)$$

将此两式相加, 可得

$$\int_0^1 f(x)dx \leq \frac{e^{2L\beta_1(t)} + e^{2L\beta_2(t)} - 2}{2L} f^2(t). \quad (7.33)$$

容易证明对任意 $x > 0, y > 0$ 有

$$e^x + e^y - 2 < e^{x+y} - 1.$$

因此从式 (7.33) 可得

$$\int_0^1 f(x)dx \leq \frac{e^{2L(\beta_1(t)+\beta_2(t))} - 1}{2L} f^2(t) = \frac{e^{2L\beta} - 1}{2L} f^2(t).$$

即式 (7.30) 成立. □

7.5 凸性相关积分不等式

命题 7.4

设 f 是 $[0, 1]$ 上的下凸函数, 则有

$$\begin{aligned} f(t) &\leq \frac{1-t}{t} \int_0^t f(x)dx + \frac{t}{1-t} \int_t^1 f(x)dx \\ \iff t(1-t)f(t) &\leq (1-t)^2 \int_0^t f(x)dx + t^2 \int_t^1 f(x)dx. \end{aligned}$$

 **笔记** 记忆这不等式以及这个不等式的证明!

证明 设 $t \in (0, 1)$, 对于 $x \in [0, 1]$, 有

$$t = (1-t)(tx) + t(1-x+tx).$$

因此根据下凸函数的性质, 得

$$f(t) \leq (1-t)f(tx) + t f(1-x+tx).$$

上式对变量 x 在 $[a, b]$ 上积分, 得

$$\begin{aligned} f(t) &\leq (1-t) \int_0^1 f(tx)dx + t \int_0^1 f(1-x+tx)dx \\ &= \frac{1-t}{t} \int_0^t f(x)dx + \frac{t}{1-t} \int_t^1 f(x)dx. \end{aligned}$$

□

例题 7.21 设 f 是 $[0, 1]$ 上的下凸函数, 求证:

$$\int_0^1 t(1-t)f(t)dt \leq \frac{1}{3} \int_0^1 (t^3 + (1-t)^3) f(t)dt.$$

 **笔记** 利用凸函数积分不等式命题 7.4.

证明 设 $t \in (0, 1)$, 对于 $x \in [0, 1]$, 有

$$t = (1-t)(tx) + t(1-x+tx).$$

因此根据下凸函数的性质, 得

$$f(t) \leq (1-t)f(tx) + t f(1-x+tx).$$

上式对变量 x 在 $[0, 1]$ 上积分, 得

$$\begin{aligned} f(t) &\leq (1-t) \int_0^1 f(tx) dx + t \int_0^1 f(1-x+tx) dx \\ &= \frac{1-t}{t} \int_0^t f(x) dx + \frac{t}{1-t} \int_t^1 f(x) dx. \end{aligned}$$

因而

$$t(1-t)f(t) \leq (1-t)^2 \int_0^t f(x) dx + t^2 \int_t^1 f(x) dx, \quad t \in [0, 1].$$

积分可得

$$\begin{aligned} \int_0^1 t(1-t)f(t) dt &\leq \int_0^1 \left[(1-t)^2 \int_0^t f(x) dx \right] dt + \int_0^1 \left[t^2 \int_t^1 f(x) dx \right] dt \\ &= \int_0^1 \left[f(x) \int_x^1 (1-t)^2 dt \right] dx + \int_0^1 \left[f(x) \int_0^x t^2 dt \right] dx \\ &= \frac{1}{3} \int_0^1 (x^3 + (1-x)^3) f(x) dx. \end{aligned}$$

□

命题 7.5

设 f 是 $[a, b]$ 上的非负上凸函数. 证明对任何 $x \in [a, b]$, 都有

$$f(x) \leq \frac{2}{b-a} \int_a^b f(y) dy. \quad (7.34)$$

注 Step 2 中的 $g(x)$ 的构造可以类比 Lagrange 中值定理的构造函数 (关键是这个构造函数的几何直观).

笔记 这种只考虑函数端点函数值同为 0 的情形, 再通过构造 $g(x) = f(x) - p(x)$ (其中 $p(x)$ 是 f 过两个端点的直线), 将其推广到一般情况的想法很重要!

证明 证法一: 利用割线不等式可得, 对 $\forall x \in [a, b]$, 都有

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &= \int_a^x f(y) dy + \int_x^b f(y) dy \\ &\geq \int_a^x \left[\frac{f(x) - f(a)}{x-a} (y-a) + f(a) \right] dy + \int_x^b \left[\frac{f(b) - f(x)}{b-x} (y-b) + f(b) \right] dy \\ &= \frac{f(x) + f(a)}{2} (x-a) + \frac{f(x) + f(b)}{2} (b-x) \\ &= \frac{b-a}{2} f(x) + \frac{(x-a)f(a) + (b-x)f(b)}{2} \\ &\geq \frac{b-a}{2} f(x). \end{aligned}$$

证法二: 由开集上的凸函数必连续可知, 开集上的上凸函数连续且有限个点不影响积分值. 又由凸函数单调性的刻画, 我们知道

$$\lim_{x \rightarrow a^+} f(x), \lim_{x \rightarrow b^-} f(x)$$

是存在的. 因此不妨设 $f \in C[a, b]$. 不妨设 $a = 0, b = 1$, 否则用 $f(a + (b-a)x)$ 代替 $f(x)$ 即可.

Step 2 当

$$f(a) = f(b) = 0, x_0 \text{ 是 } f(x) \text{ 最大值点}, x_0 \in (a, b),$$

我们利用上凸函数一定在割线上放缩得不等式

$$\begin{cases} f(x) \geq \frac{f(x_0)}{x_0} x, & x \in [0, x_0] \\ f(x) \geq \frac{f(x_0)}{x_0 - 1} (x - 1), & x \in [x_0, 1] \end{cases}.$$

运用得到的不等式就有

$$\int_0^1 f(x)dx \geq \int_0^{x_0} \frac{f(x_0)}{x_0} x dx + \int_{x_0}^1 \frac{f(x_0)}{x_0 - 1} (x - 1) dx = \frac{1}{2} f(x_0),$$

这就相当于得到了不等式(7.34).

当 $x_0 = a$ 或 b 时, 由 $f(a) = f(b) = 0$ 且 f 非负可知, 此时 $f(x) \equiv 0$ 结论显然成立.

Step 2 一般情况可设

$$g(x) = f(x) - [f(1) - f(0)]x - f(0),$$

从而 $g(0) = g(1) = 0$, 于是 g 就满足 **Step 1** 中的条件. 因此由(7.34)知

$$g(x) \leq 2 \int_0^1 g(y) dy, \forall x \in [0, 1]. \quad (7.35)$$

于是利用(7.35)知

$$f(x) - [(f(1) - f(0))x + f(0)] \leq 2 \int_0^1 f(y) dy - 2 \int_0^1 [(f(1) - f(0))y + f(0)] dy, \forall x \in [0, 1].$$

从而

$$f(x) - 2 \int_0^1 f(y) dy \leq [(f(1) - f(0))x + f(0)] - 2 \int_0^1 [(f(1) - f(0))y + f(0)] dy, \forall x \in [0, 1].$$

注意到对 $\forall x \in [0, 1]$, 都有

$$\begin{aligned} & [(f(1) - f(0))x + f(0)] - 2 \int_0^1 [(f(1) - f(0))y + f(0)] dy \leq 0 \\ \Leftrightarrow & [f(1) - f(0)]x + f(0) \leq 2 \int_0^1 [(f(1) - f(0))x + f(0)] dx \\ \Leftrightarrow & [f(1) - f(0)]x + f(0) \leq f(1) + f(0) \\ \Leftrightarrow & [f(1) - f(0)]x \leq f(1) \\ \Leftrightarrow & f(1)(1 - x) + f(0)x \geq 0 \end{aligned}$$

上述最后一个不等式可由 $x \in [0, 1], f(1), f(0) \geq 0$ 直接得到. 于是我们完成了证明. □

例题 7.22 设 $f \in C^2[0, 1]$ 是下凸函数且满足 $\int_0^1 f(x)dx = 0$, 证明:

$$|f(x)| \leq \max\{f(0), f(1)\}, \forall x \in [0, 1].$$

证明 因为 $f \in C^2[0, 1]$ 且下凸, 所以由下凸函数的单调性刻画知 f 的单调性只可能是递增、递减、先减后增其中一种. 无论是哪种情况, 都有 f 的最大值一定在端点 $0, 1$ 处取到. 记 f 的最大值点为 $c \in \{0, 1\}$, f 的最小值点 $d \in [0, 1]$, 则 $f(c) = \max\{f(0), f(1)\}$. 由 $\int_0^1 f(x)dx = 0$ 及积分中值定理知, 存在 $\xi \in (0, 1)$, 使得 $f(\xi) = 0$, 故 $f(c) \geq 0$. 于是利用命题 7.5 可得, 有

$$f(c) - f(d) \leq f(c) - 2 \int_0^1 f(x) dx = f(c) \implies f(d) \geq 0 \geq -f(c).$$

故对 $\forall x \in [0, 1]$, 都有

$$\begin{aligned} -\max\{f(0), f(1)\} &= -f(c) \leq f(x) \leq f(c) = \max\{f(0), f(1)\} \\ \iff |f(x)| &\leq \max\{f(0), f(1)\}. \end{aligned}$$
□

命题 7.6

设 g 是 $[-1, 1]$ 上的下凸函数, $h(x) = g(x) + g(-x)$, 则 h 在 $[0, 1]$ 上单调递增.

证明 证法一: 由 Bernstein 多项式的性质知 g 的 Bernstein 多项式 $B_n(g, x)$ 可导且 $B_n(g, x) \rightrightarrows g(x)$, $B'_n(g, x) \rightrightarrows g'(x)$,

并且 $B_n(g, x)$ 仍是 $[-1, 1]$ 上的下凸函数. 故可不妨设 $g \in D[-1, 1]$. 再由 g 的下凸性知, $g'(x)$ 递增. 故

$$h'(x) = g'(x) - g'(-x) \geq 0, \quad \forall x \in [0, 1].$$

因此 h 在 $[0, 1]$ 上递增.

证法二: 对 $\forall 0 \leq a < b \leq 1$, 固定 a, b .

(i) 当 $a > 0$ 时, 由 g 的下凸性知

$$\frac{g(a) - g(0)}{a} \leq \frac{g(b) - g(a)}{b - a}. \quad (7.36)$$

注意到 $-b < -a < 0$, 再利用 g 的下凸性知

$$\frac{g(-a) - g(-b)}{-a - (-b)} \leq \frac{g(0) - g(-a)}{0 - (-a)} \iff \frac{g(-a) - g(-b)}{b - a} \leq \frac{g(0) - g(-a)}{a}. \quad (7.37)$$

由 g 的下凸性还有

$$g(0) \leq \frac{g(a) + g(-a)}{2} \iff g(a) - g(0) \geq g(0) - g(-a). \quad (7.38)$$

由(7.36)(7.37)(7.38)式可得

$$\frac{g(b) - g(a)}{b - a} \geq \frac{g(a) - g(0)}{a} \geq \frac{g(0) - g(-a)}{a} \geq \frac{g(-a) - g(-b)}{b - a}.$$

故

$$g(b) - g(a) \geq g(-a) - g(-b) \iff g(b) + g(-b) \geq g(a) + g(-a).$$

即 $h(b) \geq h(a)$.

(ii) 当 $a = 0$ 时, 由 g 的下凸性知

$$h(0) = 2g(0) \leq g(b) + g(-b) = h(b).$$

综上可知 h 在 $[0, 1]$ 上递增.

□

例题 7.23 设 $f : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ 为偶函数, f 在 $[0, 1]$ 上单调递增, 又设 g 是 $[-1, 1]$ 上的下凸函数, 即对任意 $x, y \in [-1, 1]$ 及 $t \in (0, 1)$ 有

$$g(tx + (1-t)y) \leq tg(x) + (1-t)g(y).$$

求证:

$$2 \int_{-1}^1 f(x)g(x)dx \geq \int_{-1}^1 f(x)dx \int_{-1}^1 g(x)dx$$

证明 由于 f 为偶函数, 可得

$$\int_{-1}^1 f(x)g(x)dx = \int_{-1}^1 f(x)g(-x)dx.$$

因而

$$2 \int_{-1}^1 f(x)g(x)dx = \int_{-1}^1 f(x)(g(x) + g(-x))dx = 2 \int_0^1 f(x)(g(x) + g(-x))dx \quad (7.39)$$

令 $h(x) = g(x) + g(-x)$, 则由 **命题 7.6** 知 h 在 $[0, 1]$ 上递增. 故对任意 $x, y \in [0, 1]$, 有

$$(f(x) - f(y))(h(x) - h(y)) \geq 0$$

因而

$$\int_0^1 \int_0^1 (f(x) - f(y))(h(x) - h(y))dxdy \geq 0$$

由此可得

$$2 \int_0^1 f(x)h(x)dx \geq 2 \int_0^1 f(x)dx \cdot \int_0^1 h(x)dx = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 f(x)dx \cdot \int_{-1}^1 h(x)dx = \int_{-1}^1 f(x)dx \cdot \int_{-1}^1 g(x)dx.$$

结合(7.39)即得结论.

□

7.6 数值比较类

例题 7.24 证明如下积分不等式:

1. $\int_0^{\sqrt{2}\pi} \sin x^2 dx > 0.$
2. $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos x}{1+x^2} dx \geq \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin x}{1+x^2} dx.$
3. $\int_0^1 \frac{\cos x}{\sqrt{1-x^2}} dx > \int_0^1 \frac{\sin x}{\sqrt{1-x^2}} dx.$

笔记 此类问题都是考虑分母更小的时候正的更多, 通过换元把负的区间转化到正的同一个区间.

证明

1.

$$\begin{aligned} \int_0^{\sqrt{2}\pi} \sin x^2 dx &\stackrel{x=\sqrt{y}}{=} \int_0^{2\pi} \frac{\sin y}{2\sqrt{y}} dy = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} \frac{\sin y}{2\sqrt{y}} dy + \frac{1}{2} \int_{\pi}^{2\pi} \frac{\sin y}{2\sqrt{y}} dy \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{\pi} \frac{\sin y}{2\sqrt{y}} dy + \frac{1}{2} \int_0^{\pi} \frac{\sin(y+\pi)}{2\sqrt{y+\pi}} dy \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{\pi} \sin y \left(\frac{1}{2\sqrt{y}} - \frac{1}{2\sqrt{y+\pi}} \right) dy > 0. \end{aligned}$$

2.

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos x - \sin x}{1+x^2} dx &= \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{\cos x - \sin x}{1+x^2} dx + \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos x - \sin x}{1+x^2} dx = \sqrt{2} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{\sin(\frac{\pi}{4} - x)}{1+x^2} dx + \sqrt{2} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin(\frac{\pi}{4} - x)}{1+x^2} dx \\ &= \sqrt{2} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{\sin y}{1 + (\frac{\pi}{4} - y)^2} dy + \sqrt{2} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin(-y)}{1 + (\frac{\pi}{4} + y)^2} dy \\ &= \sqrt{2} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin y \left[\frac{1}{1 + (\frac{\pi}{4} - y)^2} - \frac{1}{1 + (\frac{\pi}{4} + y)^2} \right] dy > 0. \end{aligned}$$

3. 本题稍有不同, 注意到

$$\int_0^1 \frac{\cos x}{\sqrt{1-x^2}} dx \stackrel{x=\sin y}{=} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(\sin y) dy, \int_0^1 \frac{\sin x}{\sqrt{1-x^2}} dx \stackrel{x=\cos y}{=} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(\cos y) dy.$$

现在利用 $\sin x < x, \forall x \in (0, \frac{\pi}{2})$ 可得不等式链 $\cos \sin x > \cos x > \sin \cos x, \forall x \in (0, \frac{\pi}{2})$, 于是

$$\int_0^1 \frac{\cos x}{\sqrt{1-x^2}} dx > \int_0^1 \frac{\sin x}{\sqrt{1-x^2}} dx.$$

□

定理 7.8 (Jordan 不等式)

$$\sin x \geq \frac{2}{\pi}x, \forall x \in [0, \frac{\pi}{2}]$$

♥

证明 利用 $\sin x$ 的上凸性及割线放缩可得

$$\frac{\sin x - \sin 0}{x - 0} \geq \frac{\sin \frac{\pi}{2} - \sin x}{\frac{\pi}{2} - x}, \forall x \in [0, \frac{\pi}{2}].$$

□

例题 7.25 证明如下积分不等式

1. $\frac{\pi}{6} < \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{4-x^2-x^3}} dx < \frac{\pi}{4\sqrt{2}}.$
2. $\int_0^{\pi} e^{\sin^2 x} dx \geq \sqrt{e}\pi.$
3. $\frac{\pi}{2}e^{-R} < \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-R \sin x} dx < \frac{\pi(1-e^{-R})}{2R}, R > 0.$

$$4. \int_0^{n\pi} \frac{|\sin x|}{x} dx > \frac{2}{\pi} \ln(n+1), n \geq 2.$$

注 $(2n)!! = 2^n \cdot n!$.

证明

1.

$$\frac{\pi}{6} = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{4-x^2}} dx < \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{4-x^2-x^3}} dx < \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{4-x^2-x^2}} dx = \frac{\pi}{4\sqrt{2}}.$$

2.

$$\begin{aligned} \int_0^\pi e^{\sin^2 x} dx &= \int_0^\pi \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin^{2n} x}{n!} dx = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \int_0^\pi \sin^{2n} x dx \\ &= \pi \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)!!}{n!(2n)!!} \right] = \pi \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)!!}{2^n (n!)^2} \right] \\ &\stackrel{(2n-1)!! \geq n!}{\geq} \pi \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2^n n!} = \sqrt{e}\pi. \end{aligned}$$

3.

$$\frac{\pi}{2} e^{-R} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-R} dx < \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-R \sin x} dx \stackrel{\text{Jordan 不等式}}{<} \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{2R}{\pi} x} dx = \frac{\pi(1-e^{-R})}{2R}, R > 0.$$

4.

$$\begin{aligned} \int_0^{n\pi} \frac{|\sin x|}{x} dx &= \sum_{k=0}^{n-1} \int_{k\pi}^{(k+1)\pi} \frac{|\sin x|}{x} dx \stackrel{x=k\pi+y}{=} \sum_{k=0}^{n-1} \int_0^\pi \frac{|\sin y|}{k\pi+y} dy \\ &> \sum_{k=0}^{n-1} \int_0^\pi \frac{|\sin y|}{(k+1)\pi} dy = \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k+1} \\ &> \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \ln \left(1 + \frac{1}{k+1} \right) = \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{n-1} [\ln(k+2) - \ln(k+1)] \\ &= \frac{2}{\pi} \ln(n+1). \end{aligned}$$

还可以使用积分放缩法处理 $\frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k+1}$, 如下所示:

$$\frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k+1} = \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \int_k^{k+1} \frac{1}{k+1} dx \geq \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \int_k^{k+1} \frac{1}{x+1} dx = \frac{2}{\pi} \int_0^n \frac{1}{x+1} dx = \frac{2}{\pi} \ln(n+1).$$

□

7.7 Fourier 积分不等式

定理 7.9 (Fourier 型积分不等式)

若 $f(x) \in C^1[a, b]$, 则

(1)

$$\int_a^b |f(x)|^2 dx - \frac{1}{b-a} \left(\int_a^b f(x) dx \right)^2 \leq \frac{(b-a)^2}{\pi^2} \int_a^b |f'(x)|^2 dx,$$

等号成立条件为

$$f(x) = c_1 + c_2 \cos \left(\frac{\pi(x-a)}{b-a} \right), c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

(2) 若 $f(a) = f(b)$, 则

$$\int_a^b |f(x)|^2 dx - \frac{1}{b-a} \left(\int_a^b f(x) dx \right)^2 \leq \frac{(b-a)^2}{4\pi^2} \int_a^b |f'(x)|^2 dx,$$

等号成立条件是

$$f(x) = c_1 + c_2 \cos \left(\frac{2\pi x}{b-a} \right) + c_3 \sin \left(\frac{2\pi x}{b-a} \right), c_1, c_2, c_3 \in \mathbb{R}.$$

(3) 若 $f(a) = f(b) = 0$, 则

$$\int_a^b |f(x)|^2 dx \leq \frac{(b-a)^2}{\pi^2} \int_a^b |f'(x)|^2 dx,$$

等号成立条件是

$$f(x) = c \sin \left(\frac{\pi(x-a)}{b-a} \right), c \in \mathbb{R}.$$



注 (1) 中对 f 进行偶延拓的原因是: 使延拓后的区间端点函数值相等, 从而就能利用 Fourier 级数的逐项微分定理.

(2) 已经有区间端点函数值相等的条件了, 所以不需要进行延拓.

(3) 中对 f 进行奇延拓的原因是: f 满足 $f(a) = f(b) = 0$, 此时对 f 做奇延拓后能使得 $f \in C^1[2a-b, b]$, 进而就能得到更好的结论.(如果只有 $f(a) = f(b) \neq 0$, 那么 f 奇延拓后在 $x = a$ 处间断.)

证明

(1) 把 $f(x)$ 延拓到 $[2a-b, b]$, 使得 $f(x) = f(2a-x), x \in [a, b]$, 则 $f(b) = f(2a-b), f \in C[2a-b, b]$ 且分段可微, 并且此时 f 关于 $x = a$ 轴对称. 因此设 $f(x)$ 有傅立叶级数

$$f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \left(\frac{\pi n(x-a)}{b-a} \right),$$

进而由 Fourier 级数的逐项微分定理可得

$$f'(x) \sim -\frac{\pi}{b-a} \sum_{n=1}^{\infty} [na_n \sin \left(\frac{\pi n(x-a)}{b-a} \right)].$$

这里

$$a_n = \frac{1}{b-a} \int_{2a-b}^b f(x) \cos \left(\frac{\pi n(x-a)}{b-a} \right) dx, n \in \mathbb{N}_0.$$

我们由 Parseval 恒等式可得

$$\begin{aligned} \int_{2a-b}^b |f(x)|^2 dx &= (b-a) \left[\frac{a_0^2}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 \right], \\ \int_{2a-b}^b |f'(x)|^2 dx &= \frac{\pi^2}{b-a} \sum_{n=1}^{\infty} n^2 a_n^2. \end{aligned}$$

从而有

$$\begin{aligned} \int_{2a-b}^b |f(x)|^2 dx - (b-a) \frac{a_0^2}{2} &= (b-a) \sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 \leq (b-a) \sum_{n=1}^{\infty} n^2 a_n^2 = \frac{(b-a)^2}{\pi^2} \int_{2b-a}^b |f'(x)|^2 dx \\ \iff \int_{2a-b}^b |f(x)|^2 dx - \frac{1}{2(b-a)} \left(\int_{2a-b}^b f(x) dx \right)^2 &\leq \frac{(b-a)^2}{\pi^2} \int_{2b-a}^b |f'(x)|^2 dx. \end{aligned}$$

利用对称性, 就有

$$\int_a^b |f(x)|^2 dx - \frac{1}{(b-a)} \left(\int_a^b f(x) dx \right)^2 \leq \frac{(b-a)^2}{\pi^2} \int_a^b |f'(x)|^2 dx,$$

等号成立条件为

$$f(x) = c_1 + c_2 \cos \left(\frac{\pi(x-a)}{b-a} \right), c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

(2) 设

$$f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \left(\frac{2\pi nx}{b-a} \right) + b_n \sin \left(\frac{2\pi nx}{b-a} \right) \right),$$

由Fourier 级数的逐项微分定理可得

$$f'(x) \sim \frac{2\pi}{b-a} \sum_{n=1}^{\infty} \left(-na_n \sin \left(\frac{2\pi nx}{b-a} \right) + nb_n \cos \left(\frac{2\pi nx}{b-a} \right) \right).$$

这里

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{b-a} \int_a^b f(x) \cos \left(\frac{2\pi nx}{b-a} \right) dx, \\ b_n &= \frac{2}{b-a} \int_a^b f(x) \sin \left(\frac{2\pi nx}{b-a} \right) dx. \end{aligned}$$

由Parseval 恒等式, 我们有

$$\begin{aligned} \int_a^b |f(x)|^2 dx &= \frac{b-a}{2} \left[\frac{a_0^2}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2) \right], \\ \int_a^b |f'(x)|^2 dx &= \frac{2\pi^2}{b-a} \sum_{n=1}^{\infty} n^2 (a_n^2 + b_n^2). \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} \int_a^b |f(x)|^2 dx - \frac{(b-a)a_0^2}{4} &= \frac{b-a}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2) \leq \frac{b-a}{2} \sum_{n=1}^{\infty} n^2 (a_n^2 + b_n^2) = \frac{(b-a)^2}{4\pi^2} \int_a^b |f'(x)|^2 dx \\ \iff \int_a^b |f(x)|^2 dx - \frac{1}{b-a} \left(\int_a^b f(x) dx \right)^2 &\leq \frac{(b-a)^2}{4\pi^2} \int_a^b |f'(x)|^2 dx, \end{aligned}$$

等号成立条件是

$$f(x) = c_1 + c_2 \cos \left(\frac{2\pi x}{b-a} \right) + c_3 \sin \left(\frac{2\pi x}{b-a} \right).$$

(3) 令

$$f(x) = -f(2a-x), x \in [2a-b, a],$$

则 $f(x) \in C^1[2a-b, b]$, 并且此时 f 关于 $(a, 0)$ 点中心对称. 设 $f(x)$ 有傅立叶级数

$$f(x) \sim \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \left(\frac{\pi n(x-a)}{b-a} \right),$$

由Fourier 级数的逐项微分定理可得

$$f'(x) \sim \frac{\pi}{b-a} \sum_{n=1}^{\infty} nb_n \cos \left(\frac{\pi n(x-a)}{b-a} \right).$$

这里

$$b_n = \frac{1}{b-a} \int_{2a-b}^b f(x) \sin \left(\frac{\pi n(x-a)}{b-a} \right) dx, n \in \mathbb{N}_0.$$

我们由Parseval 恒等式可得

$$\begin{aligned} \int_{2a-b}^b |f(x)|^2 dx &= (b-a) \sum_{n=1}^{\infty} b_n^2, \\ \int_{2a-b}^b |f'(x)|^2 dx &= \frac{\pi^2}{b-a} \sum_{n=1}^{\infty} n^2 b_n^2. \end{aligned}$$

从而有

$$\int_{2a-b}^b |f(x)|^2 dx = (b-a) \sum_{n=1}^{\infty} b_n^2 \leq (b-a) \sum_{n=1}^{\infty} n^2 b_n^2 = \frac{(b-a)^2}{\pi^2} \int_{2b-a}^b |f'(x)|^2 dx$$

$$\iff \int_{2a-b}^b |f(x)|^2 dx \leq \frac{(b-a)^2}{\pi^2} \int_{2b-a}^b |f'(x)|^2 dx.$$

利用对称性, 我们有

$$\int_a^b |f(x)|^2 dx \leq \frac{(b-a)^2}{\pi^2} \int_a^b |f'(x)|^2 dx,$$

等号成立条件是

$$f(x) = c \sin\left(\frac{\pi(x-a)}{b-a}\right).$$

□

7.8 局部展开和能量积分法

命题 7.7

设 $\alpha > 0, g \in C^1(\mathbb{R})$. 存在 $a \in \mathbb{R}$ 使得 $g(a) = \min_{x \in \mathbb{R}} g(x)$, 如果

$$|g'(x) - g'(y)| \leq M|x - y|^\alpha, \forall x, y \in \mathbb{R}, \quad (7.40)$$

证明

$$|g'(x)|^{\alpha+1} \leq \left(\frac{\alpha+1}{\alpha}\right)^\alpha [g(x) - g(a)]^\alpha M, \forall x \in \mathbb{R}. \quad (7.41)$$

◆

证明 不妨设 $g(a) = 0$, 否则用 $g(x) - g(a)$ 代替 $g(x)$. 当 $M = 0$, 则不等式(7.41)显然成立. 当 $M \neq 0$ 可以不妨设 $M = 1$.

现在对非负函数 g , 当 $g'(x_0) = 0$, 不等式(7.41)显然成立. 当 $g'(x_0) > 0$, 则利用(7.40)有

$$\begin{aligned} g(x_0) &\geq g(x_0) - g(h) = \int_h^{x_0} g'(t) dt \\ &\geq \int_h^{x_0} [g'(x_0) - |t - x_0|^\alpha] dt \\ &= g'(x_0)(x_0 - h) - \frac{(x_0 - h)^{\alpha+1}}{\alpha + 1}, \end{aligned}$$

取 $h = x_0 - |g'(x_0)|^{\frac{1}{\alpha}}$, 就得到了 $g(x_0) > \frac{\alpha}{\alpha+1}|g'(x_0)|^{1+\frac{1}{\alpha}}$, 即不等式(7.41)成立. 类似的考虑 $g'(x_0) < 0$ 可得(7.41).

当 $g'(x_0) < 0$, 则利用(7.40)有

$$\begin{aligned} g(x_0) &\geq -g(h) + g(x_0) = - \int_{x_0}^h g'(t) dt \\ &\geq - \int_{x_0}^h [g'(x_0) + |t - x_0|^\alpha] dt \\ &= -g'(x_0)(h - x_0) - \frac{(h - x_0)^{\alpha+1}}{\alpha + 1}, \end{aligned}$$

取 $h = x_0 + |g'(x_0)|^{\frac{1}{\alpha}}$, 就得到了 $g(x_0) > \frac{\alpha}{\alpha+1}|g'(x_0)|^{1+\frac{1}{\alpha}}$, 即不等式(7.41)成立.

□

推论 7.2

设 $f : \mathbb{R} \rightarrow (0, +\infty)$ 是一可微函数, 且对所有 $x, y \in \mathbb{R}$, 有

$$|f'(x) - f'(y)| \leq |x - y|^\alpha,$$

其中 $\alpha \in (0, 1]$ 是常数. 求证: 对所有 $x \in \mathbb{R}$, 有

$$|f'(x)|^{\frac{\alpha+1}{\alpha}} < \frac{\alpha+1}{\alpha} f(x).$$

◆

证明 对 $\forall x \in \mathbb{R}$, 固定 x .

(i) 若 $f'(x) = 0$, 则结论显然成立.

(ii) 若 $f'(x) < 0$, 则令 $h = (-f'(x))^{\frac{1}{\alpha}} > 0$. 由微积分基本定理可得

$$\begin{aligned} 0 < f(x+h) &= f(x) + \int_x^{x+h} f'(t) dt = f(x) + \int_x^{x+h} [f'(t) - f'(x)] dt + f'(x)h \\ &\leq f(x) + \int_x^{x+h} (t-x)^\alpha dt + f'(x)h = f(x) + \frac{h^{\alpha+1}}{\alpha+1} + f'(x)h \\ &= f(x) + \frac{(-f'(x))^{\frac{\alpha+1}{\alpha}}}{\alpha+1} + f'(x) (-f'(x))^{\frac{1}{\alpha}}. \end{aligned}$$

于是

$$\left[f'(x) - \frac{1}{\alpha+1} f'(x) \right] (-f'(x))^{\frac{1}{\alpha}} < f(x) \iff f'(x) (-f'(x))^{\frac{1}{\alpha}} < \frac{\alpha+1}{\alpha} f(x).$$

从而

$$|f'(x)|^{\frac{\alpha+1}{\alpha}} < \frac{\alpha+1}{\alpha} f(x).$$

(iii) 若 $f'(x) > 0$, 则令 $h = (f'(x))^{\frac{1}{\alpha}} > 0$. 由 Newton-Leibniz 公式可得

$$\begin{aligned} 0 < f(x-h) &= - \int_{x-h}^x f'(t) dt + f(x) = \int_{x-h}^x [f'(x) - f'(t)] dt + f(x) - f'(x)h \\ &\leq \int_{x-h}^x (x-t)^\alpha dt + f(x) - f'(x)h = \frac{h^{\alpha+1}}{\alpha+1} + f(x) - f'(x)h \\ &= \frac{(f'(x))^{\frac{\alpha+1}{\alpha}}}{\alpha+1} + f(x) - f'(x) (f'(x))^{\frac{1}{\alpha}}. \end{aligned}$$

于是

$$\left[f'(x) - \frac{1}{\alpha+1} f'(x) \right] (f'(x))^{\frac{1}{\alpha}} < f(x) \iff (f'(x))^{\frac{\alpha+1}{\alpha}} < \frac{\alpha+1}{\alpha} f(x).$$

从而

$$|f'(x)|^{\frac{\alpha+1}{\alpha}} < \frac{\alpha+1}{\alpha} f(x).$$

□

例题 7.26 设 $f(x)$ 是 $(-\infty, +\infty)$ 上具有连续导数的非负函数, 且存在 $M > 0$ 使得对任意的 $x, y \in (-\infty, +\infty)$, 有

$$|f'(x) - f'(y)| \leq M|x - y|.$$

证明: 对于任意实数 x , 恒有 $(f'(x))^2 \leq 2Mf(x)$.

证明 对 $\forall x \in \mathbb{R}$, 固定 x . 由 $f \geq 0$ 可得, 对 $\forall h > 0$, 有

$$\int_{x-h}^x [f'(x) - f'(t)] dt = f'(x)h - [f(x) - f(x-h)] \geq f'(x)h - f(x).$$

又由条件可得, 对 $\forall h > 0$, 有

$$\int_{x-h}^x |f'(x) - f'(t)| dt \leq M \int_{x-h}^x |x-t| dt = \frac{M}{2} h^2.$$

于是对 $\forall h > 0$, 有

$$f'(x)h - f(x) \leq \int_{x-h}^x [f'(x) - f'(t)] dt \leq \int_{x-h}^x |f'(x) - f'(t)| dt \leq \frac{M}{2} h^2.$$

故对 $\forall h > 0$, 都有

$$\frac{M}{2} h^2 - f'(x)h + f(x) \geq 0.$$

因此

$$\Delta = (f'(x))^2 - 2Mf(x) \leq 0 \iff (f'(x))^2 \leq 2Mf(x).$$

再由 x 的任意性可知结论成立.

□

例题 7.27 设 f 在 \mathbb{R} 上三阶可导, 且 $\forall x \in \mathbb{R}$ 成立

$$f(x), f'(x), f''(x), f'''(x) > 0, \quad f'''(x) \leq f(x).$$

证明: $\forall x \in \mathbb{R}$ 成立

$$f'(x) < 2f(x).$$

证明 证法一: 由 Taylor 定理可知, 对 $\forall x, t \in \mathbb{R}$, 都存在 ξ 在 x 与 $x+t$ 之间, 使得

$$0 < f(x+t) = f(x) + f'(x)t + \frac{f''(x)}{2}t^2 + \frac{f'''(\xi)}{6}t^3. \quad (7.42)$$

当 $t \leq 0$ 时, 由(7.42)式和条件可得

$$0 < f(x) + f'(x)t + \frac{f''(x)}{2}t^2 + \frac{f'''(\xi)}{6}t^3 \leq f(x) + f'(x)t + \frac{f''(x)}{2}t^2.$$

当 $t > 0$ 时, 由条件可得

$$f(x) + f'(x)t + \frac{f''(x)}{2}t^2 > 0.$$

故

$$f(x) + f'(x)t + \frac{f''(x)}{2}t^2 > 0, \quad \forall t \in \mathbb{R}.$$

由二次函数的性质可知

$$\Delta = [f'(x)]^2 - 2f''(x)f(x) < 0 \implies [f'(x)]^2 < 2f''(x)f(x), \quad \forall x \in \mathbb{R}. \quad (7.43)$$

同理, 由 Taylor 定理可知, 对 $\forall x, t \in \mathbb{R}$, 都存在 η 在 x 与 $x+t$ 之间, 使得

$$0 < f'(x+t) = f'(x) + f''(x)t + \frac{f'''(\eta)}{2}t^2.$$

由 $f' > 0$ 知 f 递增, 再结合 $f'''(x) < f(x)$, 由上式可得, 对 $\forall x, t \in \mathbb{R}$, 都有

$$0 < f'(x) + f''(x)t + \frac{f'''(\eta)}{2}t^2 < f'(x) + f''(x)t + \frac{f(\eta)}{2}t^2 \leq f'(x) + f''(x)t + \frac{f(x)}{2}t^2.$$

于是由二次函数的性质可知

$$\Delta' = [f''(x)]^2 - 2f'(x)f(x) < 0 \implies [f''(x)]^2 < 2f'(x)f(x), \quad \forall x \in \mathbb{R}. \quad (7.44)$$

由(7.43)(7.44)式可得, 对 $\forall x \in \mathbb{R}$, 有

$$[f'(x)]^4 < 4[f''(x)]^2 f^2(x) < 8f'(x)f^3(x) \implies [f'(x)]^3 < 8f^3(x) \implies f'(x) < 2f(x).$$

证法二 (能量积分法): 由条件知 f, f', f'' 都是递增函数且有下界 0, 故

$$f(-\infty), f'(-\infty), f''(-\infty) \in [0, +\infty).$$

若 $f'(-\infty) = A > 0$, 则存在 $-M < 0$, 使得

$$f'(x) > \frac{A}{2}, \quad \forall x \leq -M.$$

于是对 $\forall x < -M$, 有

$$\begin{aligned} f(x) &= f(-M) + \int_{-M}^x f'(t) dt = f(-M) - \int_x^{-M} f'(t) dt \\ &< f(-M) - \int_x^{-M} \frac{A}{2} dt = f(-M) - \frac{A}{2}(-M - x) \\ &= f(-M) + \frac{A}{2}(x + M). \end{aligned}$$

令 $x \rightarrow -\infty$ 得 $f(-\infty) = -\infty$, 这与 $f(-\infty) \in [0, +\infty)$ 矛盾! 故 $f'(-\infty) = 0$. 同理可证 $f''(-\infty) = 0$. 由条件可得

$$\frac{1}{2}[(f''(x))^2]' = f'''(x)f''(x) < f(x)f''(x) = [f(x)f'(x)]' - [f'(x)]^2 < [f(x)f'(x)]'.$$

两边同时积分得, 对 $\forall x \in \mathbb{R}$, 都有

$$\int_{-\infty}^x \frac{1}{2}[(f''(x))^2]' dt < \int_{-\infty}^x [f(x)f'(x)]' dt \iff [f''(x)]^2 < 2f(x)f'(x). \quad (7.45)$$

同理, 由条件可得

$$[f''(x)f'(x)]' - [f''(x)]^2 = f'''(x)f'(x) < f(x)f'(x) = \frac{1}{2} [f(x)]^2.$$

从而

$$[f''(x)f'(x)]' < \frac{3}{2} [(f(x))^2]'.$$

两边同时积分得, 对 $\forall x \in \mathbb{R}$, 都有

$$\int_{-\infty}^x [f''(t)f'(t)]' dt < \int_{-\infty}^x \frac{3}{2} [(f(t))^2]' dt \iff f''(x)f'(x) < \frac{3}{2} f^2(x). \quad (7.46)$$

将(7.45)(7.46)两式相乘得

$$[f''(x)]^3 < 3f^3(x) \implies f''(x) < \sqrt[3]{3}f(x) \implies f''(x)f'(x) < \sqrt[3]{3}f(x)f'(x), \quad \forall x \in \mathbb{R}.$$

两边再同时积分得

$$\int_{-\infty}^x f''(t)f'(t) dt < \sqrt[3]{3} \int_{-\infty}^x f(t)f'(t) dt \iff [f'(x)]^2 < \sqrt[3]{3}f^2(x) \iff f'(x) < \sqrt[4]{3}f(x), \quad \forall x \in \mathbb{R}.$$

□

7.9 其他

例题 7.28 设 $f \in C^2[0, 1]$, 证明

(1)

$$|f'(x)| \leq 4 \int_0^1 |f(x)| dx + \int_0^1 |f''(x)| dx. \quad (7.47)$$

(2)

$$\int_0^1 |f'(x)| dx \leq 4 \int_0^1 |f(x)| dx + \int_0^1 |f''(x)| dx. \quad (7.48)$$

(3) 若 $f(0)f(1) \geq 0$, 则

$$\int_0^1 |f'(x)| dx \leq 2 \int_0^1 |f(x)| dx + \int_0^1 |f''(x)| dx. \quad (7.49)$$

 **笔记** 对于 $[a, b]$ 的情况, 考虑 $f(a + (b - a)x), x \in [0, 1]$, 我们有

$$|f'(x)| \leq \frac{4}{(b - a)^2} \int_a^b |f(x)| dx + \int_a^b |f''(x)| dx,$$

以及

$$\int_a^b |f'(x)| dx \leq \frac{4}{b - a} \int_a^b |f(x)| dx + (b - a) \int_a^b |f''(x)| dx.$$

当 $f(a)f(b) \geq 0$, 我们有

$$\int_a^b |f'(x)| dx \leq \frac{2}{b - a} \int_a^b |f(x)| dx + (b - a) \int_a^b |f''(x)| dx.$$

证明

(1) 注意到对任何 $\theta \in [0, 1]$, 我们有

$$\begin{aligned} |f'(x)| &\leq |f'(x) - f'(\theta)| + |f'(\theta)| \leq \left| \int_{\theta}^x f''(y) dy \right| + |f'(\theta)| \\ &\leq \int_0^1 |f''(y)| dy + |f'(\theta)|. \end{aligned}$$

于是只需证明存在 $\theta \in [0, 1]$ 使得

$$|f'(\theta)| \leq 4 \int_0^1 |f(x)| dx. \quad (7.50)$$

如果 f' 有零点, 则显然存在 $\theta \in [0, 1]$, 使得 $f'(\theta) = 0$, 从而满足(7.50)式. 下设 f' 没有零点. 由 f' 的介值性

可知, f' 要么恒正, 要么恒负. 不妨设 f 严格递增. 若 f 没有零点, 不妨设 $f > 0$, 则由 Lagrange 中值定理可得

$$f(x) = f(0) + xf'(\eta) \geq xf'(\eta) \geq x \min_{[0,1]} |f'| \implies \int_0^1 |f(x)| dx \geq \min_{[0,1]} |f'| \geq \frac{1}{4} \min_{[0,1]} |f'|,$$

这也给出了 (7.50) 式. 若存在 $t \in [0, 1]$, 使得 $f(t) = 0$. 由 Lagrange 中值定理可知

$$f(x) = f'(\theta)(x - t) \implies |f(x)| = |f'(\theta)| |x - t| \geq \min_{[0,1]} |f'| |x - t|, \quad \forall x \in [0, 1].$$

从而

$$\int_0^1 |f(x)| dx \geq \min_{[0,1]} |f'| \cdot \int_0^1 |x - t| dx \stackrel{\text{命题7.10}}{\geq} \min_{[0,1]} |f'| \cdot \int_0^1 \left| x - \frac{1}{2} \right| dx = \frac{1}{4} \min_{[0,1]} |f'|.$$

这也给出了 (7.50) 式. 于是我们证明了不等式(7.47)式.

(2) 直接对(7.47)式两边关于 x 在 $[0, 1]$ 上积分得(7.48)式.

(3) 由 (a) 同理只需证明存在 $\theta \in [0, 1]$ 使得

$$|f'(\theta)| \leq 2 \int_0^1 |f(x)| dx. \quad (7.51)$$

不妨假定 f' 没有零点且 $f(0) \geq 0$, 则当 f 递增, 由 Lagrange 中值定理, 我们有

$$f(x) = f(0) + xf'(\eta) \geq xf'(\eta) \geq x \cdot \min_{[0,1]} |f'| \implies \int_0^1 |f(x)| dx \geq \min_{[0,1]} |f'| \geq \frac{1}{2} \min_{[0,1]} |f'|.$$

当 f 递减, 由 Lagrange 中值定理, 我们有

$$f(x) = f(1) + (x - 1)f'(\alpha) \geq (1 - x) \min_{[0,1]} |f'| \implies \int_0^1 |f(x)| dx \geq \frac{1}{2} \min_{[0,1]} |f'|.$$

于是必有 (7.51) 式成立, 这就给出了(7.49)式. □

例题 7.29 设 $f : [0, 1] \rightarrow (0, +\infty)$ 是连续递增函数, 记 $s = \frac{\int_0^1 xf(x) dx}{\int_0^1 f(x) dx}$. 证明

$$\int_0^s f(x) dx \leq \int_s^1 f(x) dx \leq \frac{s}{1-s} \int_0^s f(x) dx.$$

笔记 看到函数复合积分就联想Jensen 不等式(积分形式), 不过Jensen 不等式(积分形式)考试中不能直接使用. 因此仍需要利用函数的凸性相关不等式进行证明.

证明 令 $F(t) = \int_0^t f(x) dx$, 则 $F'(t) = f(t)$ 连续递增, 故 F 是下凸的. 显然 $s \in [0, 1]$, 于是

$$F(x) \geq F(s) + F'(s)(x - s) = F(s) + f(s)(x - s), \quad \forall x \in [0, 1].$$

从而

$$\begin{aligned} \int_0^1 F(x) f(x) dx &\geq \int_0^1 [F(s) f(x) + f(s) f(x)(x - s)] dx \\ &= F(s) \int_0^1 f(x) dx + f(s) \int_0^1 [xf(x) - sf(x)] dx \\ &= F(s) \int_0^1 f(x) dx + f(s) \left[\int_0^1 xf(x) dx - \frac{\int_0^1 xf(x) dx}{\int_0^1 f(x) dx} \int_0^1 f(x) dx \right] \\ &= F(s) \int_0^1 f(x) dx. \end{aligned}$$

又注意到

$$\int_0^1 F(x) f(x) dx = \int_0^1 F(x) dF(x) = \frac{1}{2} \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2.$$

故

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{2} \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2 &\geq F(s) \int_0^1 f(x) dx \implies \frac{1}{2} \int_0^1 f(x) dx \geq F(s) = \int_0^s f(x) dx \\
 \implies \int_0^s f(x) dx + \int_s^1 f(x) dx &= \int_0^1 f(x) dx \geq 2 \int_0^s f(x) dx \\
 \implies \int_0^s f(x) dx &\leq \int_s^1 f(x) dx.
 \end{aligned}$$

由分部积分可得

$$s = \frac{\int_0^1 x f(x) dx}{\int_0^1 f(x) dx} = \frac{\int_0^1 x dF(x)}{F(1)} = 1 - \frac{\int_0^1 F(x) dx}{F(1)},$$

即 $\int_0^1 F(x) dx = (1-s)F(1)$. 又由 F 的下凸性可知

$$F(x) \leq \begin{cases} \frac{F(1) - F(s)}{1-s}(x-s) + F(s), & x \in [s, 1] \\ \frac{F(s) - F(0)}{s}x + F(0), & x \in [0, s] \end{cases}.$$

于是

$$\begin{aligned}
 (1-s)F(1) &= \int_0^1 F(x) dx \leq \int_0^s \left[\frac{F(1) - F(s)}{1-s}(x-s) + F(s) \right] dx + \int_s^1 \left[\frac{F(s) - F(0)}{s}x + F(0) \right] dx \\
 &= \frac{1}{2}F(s) + \frac{1-s}{2}F(1).
 \end{aligned}$$

因此

$$\frac{1-s}{2}F(1) \leq \frac{1}{2}F(s) \implies F(1) \leq \frac{1}{1-s}F(s),$$

故

$$\int_s^1 f(x) dx = F(1) - F(s) \leq \left(\frac{1}{1-s} - 1 \right) F(s) = \frac{s}{1-s} F(s) = \frac{s}{1-s} \int_0^s f(x) dx.$$

□

例题 7.30 求最小实数 C , 使得对一切满足 $\int_0^1 |f(x)| dx = 1$ 的连续函数 f , 都有

$$\int_0^1 |f(\sqrt{x})| dx \leq C.$$

注 这类证明最佳系数的问题, 我们一般只需要找一个函数列, 是其达到逼近取等即可.

本题将要找的函数列需要满足其积分值集中在 $x = 1$ 处, 联想到 Laplace 方法章节具有类似性质的被积函数 (即指数部分是 n 的函数), 类似进行构造函数列即可.

证明 显然有

$$\int_0^1 |f(\sqrt{x})| dx = 2 \int_0^1 t |f(t)| dt \leq 2 \int_0^1 |f(t)| dt = 2.$$

令 $f_n(t) = (n+1)t^n$, 则 $\int_0^1 f_n(t) dt = 1$. 于是

$$\int_0^1 |f_n(\sqrt{x})| dx = 2 \int_0^1 t |f_n(t)| dt = 2 \int_0^1 t(n+1)t^n dt = 2(n+1) \int_0^1 t^{n+1} dt = \frac{2(n+1)}{n+2} \rightarrow 2, n \rightarrow \infty.$$

因此若 $C < 2$, 都存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得 $\int_0^1 |f_N(\sqrt{x})| dx > C$. 故 $C = 2$ 就是最佳上界.

□

命题 7.8

设 $f \in C[0, 1]$ 使得 $\int_0^1 x^k f(x) dx = 1, k = 0, 1, 2, \dots, n-1$. 证明

$$\int_0^1 |f(x)|^2 dx \geq n^2.$$

笔记 也可以利用命题 9.53 得到

$$\sup_{a \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}} \frac{a^T J a}{a^T H a} = \lambda_{\max}(J H^{-1}) = n^2.$$

证明 设 $a = (a_0, a_1, \dots, a_{n-1})^T \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$. 由 Cauchy 不等式及条件可知

$$\begin{aligned} \int_0^1 |f(x)|^2 dx \int_0^1 (a_0 + a_1 x + \dots + a_{n-1} x^{n-1})^2 dx &\geq \left[\int_0^1 f(x) (a_0 + a_1 x + \dots + a_{n-1} x^{n-1}) dx \right]^2 \\ &= (a_0 + a_1 + \dots + a_{n-1})^2 = \left(\sum_{j=0}^{n-1} a_j \right)^2. \end{aligned}$$

注意到

$$\begin{aligned} \int_0^1 (a_0 + a_1 x + \dots + a_{n-1} x^{n-1})^2 dx &= \int_0^1 \left(\sum_{j=0}^{n-1} a_j x^j \right)^2 dx = \int_0^1 \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} a_j a_i x^{i+j} dx \\ &= \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} a_j a_i \int_0^1 x^{i+j} dx = \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{a_j a_i}{i+j+1}. \end{aligned}$$

因此

$$\int_0^1 |f(x)|^2 dx \geq \frac{\left(\sum_{j=0}^{n-1} a_j \right)^2}{\sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{a_j a_i}{i+j+1}} = \frac{a^T J a}{a^T H a},$$

其中

$$J = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}_{n \times n}, \quad H = \begin{pmatrix} 1 \\ i+j+1 \end{pmatrix}_{n \times n}.$$

显然 J 半正定, 由例题 8.18(3) 可知 H 正定. 于是我们只需求 $\sup_{a \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}} \frac{a^T J a}{a^T H a}$. 注意到

$$\sup_{a \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}} \frac{a^T J a}{a^T H a} = \sup_{a \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}} \frac{\left(\frac{a}{\|a\|} \right)^T J \frac{a}{\|a\|}}{\left(\frac{a}{\|a\|} \right)^T H \frac{a}{\|a\|}} = \sup_{a \in \{\alpha \in \mathbb{R}^n : \|\alpha\|=1\}} \frac{a^T J a}{a^T H a},$$

又 $\frac{a^T J a}{a^T H a}$ 是定义在单位球面的 n 元连续函数, 故由单位球面的紧性和 H 的正定性以及 J 的半正定性知

$$0 < \sup_{a \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}} \frac{a^T J a}{a^T H a} = \sup_{a \in \{\alpha \in \mathbb{R}^n : \|\alpha\|=1\}} \frac{a^T J a}{a^T H a} < +\infty.$$

又 H 正定, 故

$$\begin{aligned} \lambda \text{ 为 } \frac{a^T J a}{a^T H a} \text{ 的一个上界} &\iff \lambda \geq \frac{a^T J a}{a^T H a}, \forall a \in \mathbb{R}^n \\ &\iff a^T J a \leq \lambda a^T H a, \forall a \in \mathbb{R}^n \\ &\iff a^T (\lambda H - J) a \geq 0, \forall a \in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

$\iff \lambda H - J$ 半正定.

因此 $\sup_{a \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}} \frac{a^T J a}{a^T H a} = \inf\{\lambda > 0 \mid \lambda H - J \text{ 半正定}\}$. 设 H_k, J_k 分别为 H, J 的 k 阶主子阵, 再设 $\lambda > 0$. 根据打洞原理及例题 2.41(1) 可得

$$|\lambda H_k - J_k| = |H_k| |\lambda I_k - H_k^{-1} J_k| = |H_k| |\lambda I_k - H_k^{-1} \mathbb{1}_k \mathbb{1}_k^T| = \lambda^{k-1} |H_k| (\lambda - \mathbb{1}_k^T H_k^{-1} \mathbb{1}_k).$$

其中 $\mathbb{1}_k^T = (1, 1, \dots, 1)_{1 \times k}$. 由 H 正定可知 $|H_k| > 0$, 又因为 $\lambda > 0$, 所以

$$|\lambda H_k - J_k| \geq 0 \iff \lambda \geq \mathbb{1}_k^T H_k^{-1} \mathbb{1}_k \stackrel{\text{引理 6.3}}{=} n^2.$$

因此

λ 为 $\frac{a^T J a}{a^T H a}$ 的一个上界 $\iff \lambda H - J$ 半正定 $\iff \lambda H - J$ 的主子式都大于等于 0 $\iff \lambda \geq n^2$.

故

$$\sup_{a \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}} \frac{a^T J a}{a^T H a} = \inf\{\lambda \mid \lambda H - J \text{ 半正定}\} = \inf [n^2, +\infty) = n^2.$$

结论得证. □

命题 7.9 (Heisenberg(海森堡) 不等式)

设 $f \in C^1(\mathbb{R})$, 证明不等式

$$\left(\int_{\mathbb{R}} |f(x)|^2 dx \right)^2 \leq 4 \int_{\mathbb{R}} x^2 |f(x)|^2 dx \cdot \int_{\mathbb{R}} |f'(x)|^2 dx. \quad (7.52)$$

注 直观上, 直接 Cauchy 不等式, 我们有

$$\left(\int_{\mathbb{R}} |f(x)|^2 dx \right)^2 \stackrel{\text{分部积分}}{=} 4 \left(\int_{\mathbb{R}} x f(x) f'(x) dx \right)^2 \leq 4 \int_{\mathbb{R}} x^2 |f(x)|^2 dx \cdot \int_{\mathbb{R}} |f'(x)|^2 dx.$$

但是上述分部积分部分需要零边界条件 (即需要 $\lim_{x \rightarrow \infty} x |f(x)|^2 = 0$ 上式才成立). 但是其实专业数学知识告诉我们 \mathbb{R} 上只要可积其实就可以分部积分的. 且看我们两种操作.

证明 Method 1 专业技术: 对一般的 $f \in C^1(\mathbb{R})$, 假定

$$4 \int_{\mathbb{R}} x^2 |f(x)|^2 dx \cdot \int_{\mathbb{R}} |f'(x)|^2 dx < \infty.$$

取紧化序列 $h_n, n \in \mathbb{N}$, 则对每一个 $n \in \mathbb{N}$, 都有

$$\begin{aligned} \left(\int_{\mathbb{R}} |h_n(x) f(x)|^2 dx \right)^2 &\leq 4 \int_{\mathbb{R}} x^2 |h_n(x) f(x)|^2 dx \cdot \int_{\mathbb{R}} |(h_n f)'(x)|^2 dx \\ &= 4 \int_{\mathbb{R}} x^2 |h_n(x) f(x)|^2 dx \cdot \int_{\mathbb{R}} |h_n'(x) f(x) + h_n(x) f'(x)|^2 dx. \end{aligned}$$

右边让 $n \rightarrow +\infty$, 就有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[4 \int_{\mathbb{R}} x^2 |h_n(x) f(x)|^2 dx \cdot \int_{\mathbb{R}} |h_n'(x) f(x) + h_n(x) f'(x)|^2 dx \right] = \left[4 \int_{\mathbb{R}} x^2 |f(x)|^2 dx \cdot \int_{\mathbb{R}} |f'(x)|^2 dx \right].$$

但是左边暂时不知道是否有 $\left(\int_{\mathbb{R}} |f(x)|^2 dx \right)^2 < \infty$, 因此不能直接换序. 但是 Fatou 引理 告诉我们

$$\begin{aligned} \left(\int_{\mathbb{R}} |f(x)|^2 dx \right)^2 &= \left(\int_{\mathbb{R}} \lim_{n \rightarrow \infty} |h_n(x) f(x)|^2 dx \right)^2 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\int_{\mathbb{R}} |h_n(x) f(x)|^2 dx \right)^2 \\ &\leq 4 \int_{\mathbb{R}} x^2 |f(x)|^2 dx \cdot \int_{\mathbb{R}} |f'(x)|^2 dx, \end{aligned}$$

从而不等式(7.52)成立.

Method 2 正常方法: 对一般的 $f \in C^1(\mathbb{R})$, 假定

$$4 \int_{\mathbb{R}} x^2 |f(x)|^2 dx \cdot \int_{\mathbb{R}} |f'(x)|^2 dx < \infty.$$

从分部积分需要看到, 我们只需证明

$$\lim_{x \rightarrow \infty} x|f(x)|^2 = 0.$$

我们以正无穷为例. 注意到

$$\infty > \sqrt{\int_x^\infty y^2 f^2(y) dy \cdot \int_x^\infty |f'(y)|^2 dy} \stackrel{\text{Cauchy 不等式}}{\geq} \int_x^\infty y|f'(y)f(y)| dy \geq x \int_x^\infty |f'(y)f(y)| dy, \quad (7.53)$$

于是 $\int_x^\infty f(y)f'(y) dy = \lim_{y \rightarrow +\infty} \frac{1}{2}|f(y)|^2 - \frac{1}{2}|f(x)|^2$ 收敛. 因此 $\lim_{y \rightarrow +\infty} \frac{1}{2}|f(y)|^2$ 存在. 注意 $\int_{\mathbb{R}} x^2 |f(x)|^2 dx < \infty$, 因此由积分收敛必有子列趋于 0 可知, 存在 $x_n \rightarrow \infty$, 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n |f(x_n)| = 0$, 于是再结合 $\lim_{y \rightarrow +\infty} \frac{1}{2}|f(y)|^2$ 存在可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = 0 \Rightarrow \lim_{y \rightarrow +\infty} f(y) = 0.$$

现在继续用(7.53), 我们知道

$$\sqrt{\int_x^\infty y^2 f^2(y) dy \cdot \int_x^\infty |f'(y)|^2 dy} \geq x \int_x^\infty |f'(y)f(y)| dy = \frac{x}{2} |f(x)|^2,$$

令 $x \rightarrow +\infty$, 由 Cauchy 收敛准则即得 $\sqrt{\int_x^\infty y^2 f^2(y) dy \cdot \int_x^\infty |f'(y)|^2 dy} \rightarrow 0$, 从而 $\lim_{x \rightarrow +\infty} x|f(x)|^2 = 0$, 这就完成了证明. 于是由分部积分和 Cauchy 不等式可知, 对 $f \in C^\infty(\mathbb{R})$, 我们有

$$\left(\int_{\mathbb{R}} |f(x)|^2 dx \right)^2 \stackrel{\text{分部积分}}{=} 4 \left(\int_{\mathbb{R}} x f(x) f'(x) dx \right)^2 \leq 4 \int_{\mathbb{R}} x^2 |f(x)|^2 dx \cdot \int_{\mathbb{R}} |f'(x)|^2 dx,$$

即不等式(7.52)成立. □

例题 7.31 设 $f : [0, +\infty) \rightarrow (0, 1)$ 是内闭 Riemann 可积函数, 若 $\int_0^{+\infty} f(x) dx$ 与 $\int_0^{+\infty} x f(x) dx$ 均收敛, 证明

$$\left(\int_0^{+\infty} f(x) dx \right)^2 < 2 \int_0^{+\infty} x f(x) dx. \quad (7.54)$$

证明 记 $a = \int_0^\infty f(x) dx > 0$, 待定 $s > 0$, 则不等式(7.54)等价于

$$\int_0^\infty x f(x) dx = \int_0^s x f(x) dx + \int_s^\infty x f(x) dx > \frac{a^2}{2}.$$

于是

$$\begin{aligned} \int_0^s x f(x) dx + s \int_s^\infty f(x) dx &\geq \frac{a^2}{2} \iff \int_0^s x f(x) dx + s \left(a - \int_0^s f(x) dx \right) \geq \frac{a^2}{2} \\ \iff \frac{a^2}{2} - sa + s \int_0^s f(x) dx - \int_0^s x f(x) dx &\leq 0 \iff \frac{a^2}{2} - sa + \int_0^s (s-x) f(x) dx \leq 0. \end{aligned}$$

利用 $f < 1$, 取 $s = a$, 则我们有

$$\frac{a^2}{2} - sa + \int_0^s (s-x) f(x) dx = -\frac{a^2}{2} + \int_0^a (a-x) f(x) dx < -\frac{a^2}{2} + \int_0^a (a-x) dx = 0.$$

从而

$$\int_0^a x f(x) dx + a \int_a^\infty f(x) dx > \frac{a^2}{2}$$

成立. 因此

$$\int_0^\infty x f(x) dx = \int_0^a x f(x) dx + \int_a^\infty x f(x) dx \geq \int_0^a x f(x) dx + a \int_a^\infty f(x) dx > \frac{a^2}{2}.$$

这就证明了不等式(7.54). □

命题 7.10

设 f 是 $[0, 1]$ 上的单调函数. 求证: 对任意实数 a 有

$$\int_0^1 |f(x) - a| dx \geq \int_0^1 \left| f(x) - f\left(\frac{1}{2}\right) \right| dx. \quad (7.55)$$

证明 不妨设 f 是单调递增函数. 注意到 $\frac{1}{2}$ 是积分区间的中点, 将式 (7.55) 右端的积分从 $\frac{1}{2}$ 处分成两部分来处理.

$$\begin{aligned} \int_0^1 \left| f(x) - f\left(\frac{1}{2}\right) \right| dx &= \int_0^{\frac{1}{2}} \left(f\left(\frac{1}{2}\right) - f(x) \right) dx + \int_{\frac{1}{2}}^1 \left(f(x) - f\left(\frac{1}{2}\right) \right) dx \\ &= \int_0^{\frac{1}{2}} (-f(x)) dx + \int_{\frac{1}{2}}^1 f(x) dx \\ &= \int_0^{\frac{1}{2}} (a - f(x)) dx + \int_{\frac{1}{2}}^1 (f(x) - a) dx \\ &\leq \int_0^{\frac{1}{2}} |a - f(x)| dx + \int_{\frac{1}{2}}^1 |f(x) - a| dx \\ &= \int_0^1 |f(x) - a| dx. \end{aligned}$$

故式 (7.55) 成立. □

例题 7.32 若 $[a, b]$ 上的可积函数列 $\{f_n\}$ 在 $[a, b]$ 上一致收敛于函数 f , 则 f 在 $[a, b]$ 上可积.

证明 由已知条件, 对任意正数 ε , 存在正整数 k 使得

$$|f_k(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{4(b-a)}, \quad x \in [a, b].$$

因为 $f_k \in R([a, b])$, 所以存在 $[a, b]$ 的一个分割

$$T : a = x_0 < x_1 < \cdots < x_n = b$$

使得

$$\sum_{j=1}^n \omega_j(f_k)(x_j - x_{j-1}) < \frac{\varepsilon}{2},$$

这里 $\omega_j(f_k)$ 是 f_k 在区间 $[x_{j-1}, x_j]$ 上的振幅. 因为

$$\begin{aligned} |f(x) - f(y)| &\leq |f(x) - f_k(x)| + |f_k(x) - f_k(y)| + |f_k(y) - f(y)| \\ &\leq \frac{\varepsilon}{2(b-a)} + |f_k(x) - f_k(y)|, \end{aligned}$$

所以

$$\omega_j(f) \leq \frac{\varepsilon}{2(b-a)} + \omega_j(f_k).$$

于是

$$\sum_{j=1}^n \omega_j(f)(x_j - x_{j-1}) \leq \frac{\varepsilon}{2} + \sum_{j=1}^n \omega_j(f_k)(x_j - x_{j-1}) < \varepsilon.$$

故 f 在 $[a, b]$ 上可积. □

例题 7.33 设 f 在 $[a, b]$ 上非负可积. 求证: 数列 $I_n = \left(\frac{1}{b-a} \int_a^b f^n(x) dx \right)^{\frac{1}{n}}$ 是单调递增的.

注 当 f 是连续函数时, 可以进一步证明 $\lim_{n \rightarrow +\infty} I_n = \max_{x \in [a, b]} f(x)$ (见例题 2.116).

证明 要比较 I_n 与 I_{n+1} 的大小, 就要比较 f^n 的积分与 f^{n+1} 之间的关系. 这可以利用 Hölder 不等式:

$$\begin{aligned} \int_a^b f^n(x)dx &= \int_a^b 1 \cdot f^n(x)dx \\ &\leq \left(\int_a^b 1^{n+1}dx \right)^{\frac{1}{n+1}} \left(\int_a^b (f^n(x))^{\frac{n+1}{n}} dx \right)^{\frac{n}{n+1}} \\ &= (b-a)^{\frac{1}{n+1}} \left(\int_a^b f^{n+1}(x)dx \right)^{\frac{n}{n+1}}, \end{aligned}$$

即

$$\left(\frac{1}{b-a} \int_a^b f^n(x)dx \right)^{\frac{1}{n}} \leq \left(\frac{1}{b-a} \int_a^b f^{n+1}(x)dx \right)^{\frac{1}{n+1}}.$$

故 $\{I_n\}$ 是单调递增数列.

□

例题 7.34 设 f 在 $[a, b]$ 上连续可导, 且 $f(a) = 0$. 求证: 对 $p \geq 1$ 有

$$\int_a^b |f(x)|^p dx \leq \frac{1}{p} \int_a^b [(b-a)^p - (x-a)^p] |f'(x)|^p dx.$$

证明 为了建立 $|f|^p$ 的积分与 $|f'|^p$ 的积分之间的关系, 先建立 $|f|$ 与 $|f'|$ 的积分的关系. 根据 Newton-Leibniz 公式, 有

$$f(x) = f(x) - f(a) = \int_a^x f'(t)dt, \quad x \in [a, b].$$

所以对于 $p > 1$ 应用 Hölder 积分不等式, 可得

$$\begin{aligned} |f(x)| &= \left| \int_a^x f'(t)dt \right| \leq \left(\int_a^x 1^q dt \right)^{\frac{1}{q}} \left(\int_a^x |f'(t)|^p dt \right)^{\frac{1}{p}} \\ &= (x-a)^{\frac{1}{q}} \left(\int_a^x |f'(t)|^p dt \right)^{\frac{1}{p}}. \end{aligned}$$

其中 $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. 因而

$$|f(x)|^p \leq (x-a)^{p-1} \int_a^x |f'(t)|^p dt, \quad x \in [a, b].$$

注意到上式对 $p = 1$ 也是成立的. 上式两边在 $[a, b]$ 上积分, 可得

$$\int_a^b |f(x)|^p dx \leq \int_a^b (x-a)^{p-1} \left(\int_a^x |f'(t)|^p dt \right) dx.$$

注意到 $\int_a^x |f'(t)|^p dt$ 是 $|f'|^p$ 的一个原函数. 对上式右端分部积分, 可得

$$\begin{aligned} \int_a^b |f(x)|^p dx &\leq \frac{1}{p} (x-a)^p \int_a^x |f'(t)|^p dt \Big|_a^b - \frac{1}{p} \int_a^b (x-a)^p |f'(x)|^p dx \\ &= \frac{1}{p} (b-a)^p \int_a^b |f'(t)|^p dt - \frac{1}{p} \int_a^b (x-a)^p |f'(x)|^p dx \\ &= \frac{1}{p} \int_a^b [(b-a)^p - (x-a)^p] |f'(x)|^p dx. \end{aligned}$$

□

例题 7.35 设 f 是 $[0, a]$ 上的连续函数, 且存在正常数 M, c 使得

$$|f(x)| \leq M + c \int_0^x |f(t)| dt,$$

求证: $|f(x)| \leq M e^{cx}$ ($\forall x \in [0, a]$).

证明 证明注意对于包含变上限积分的不等式常可以转化为微分的不等式. 令

$$F(x) = \int_0^x |f(t)| dt,$$

则条件中的不等式就是

$$F'(x) \leq M + cF(x).$$

令

$$G(x) = F(x)e^{-cx} + \frac{M}{c}e^{-cx},$$

则有

$$\begin{aligned} G'(x) &= F'(x)e^{-cx} - cF(x)e^{-cx} - M e^{-cx} \\ &= |f(x)|e^{-cx} - cF(x)e^{-cx} - M e^{-cx} \\ &\leq (M + cF(x))e^{-cx} - cF(x)e^{-cx} - M e^{-cx} = 0. \end{aligned}$$

这说明 G 在 $[0, a]$ 上单调递减. 因为 $G(0) = \frac{M}{c}$, 所以 $G \leq \frac{M}{c}$. 因而

$$F(x) + \frac{M}{c} \leq \frac{M}{c}e^{cx}.$$

再结合条件可得 $|f(x)| \leq M + cF(x) \leq M e^{cx}$.

□

例题 7.36 设 f 在区间 $[0, 1]$ 上连续且对任意 $x, y \in [0, 1]$, 有

$$xf(y) + yf(x) \leq 1.$$

求证: $\int_0^1 f(x)dx \leq \frac{\pi}{4}$.

注 结论中的 $\frac{\pi}{4}$ 是最佳的, 这只要取 $f(x) = \sqrt{1-x^2}$ 即可验证.

证明 结论中出现 π 且条件中要求 $x, y \in [0, 1]$. 因此将条件中的 x, y 分别换成 $\sin t$ 和 $\cos t$, 有

$$f(\cos t)\sin t + f(\sin t)\cos t \leq 1, \quad t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right].$$

将此式在 $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ 上积分, 得

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\cos t)\sin t dt + \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\sin t)\cos t dt \leq \frac{\pi}{2}.$$

由区间再现恒等式可知上式左端的两个积分相等. 因而

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\sin t)\cos t dt \leq \frac{\pi}{4}.$$

作变换 $\sin t = x$ 即得 $\int_0^1 f(x)dx \leq \frac{\pi}{4}$.

□

例题 7.37 设 f 在区间 $[0, 1]$ 上有可积的导函数且满足 $f(0) = 0, f(1) = 1$. 求证: 对任意 $a \geq 0$ 有

$$\int_0^1 |af(x) + f'(x)|dx \geq 1.$$

证明 因为 $e^{-ax} \geq e^{-a}$ ($0 \leq x \leq 1$), 所以

$$\begin{aligned} \int_0^1 |af(x) + f'(x)|dx &= \int_0^1 |(e^{ax}f(x))'e^{-ax}|dx \geq e^{-a} \int_0^1 |(e^{ax}f(x))'|dx \\ &\geq e^{-a} \left| \int_0^1 (e^{ax}f(x))'dx \right| = e^{-a} |e^a f(1) - f(0)| = 1. \end{aligned}$$

□

例题 7.38 设 f 在 $[0, 2]$ 上可导且 $|f'| \leq 1, f(0) = f(2) = 1$. 求证:

$$1 \leq \int_0^2 f(x)dx \leq 3$$

证明 由 Taylor 中值定理可知, 存在 $\xi_1 \in [0, 1], \xi_2 \in [1, 2]$, 使得

$$f(x) = 1 + f'(\xi_1)x, \forall x \in [0, 1].$$

$$f(x) = 1 + f'(\xi_2)(x - 2), \forall x \in [1, 2].$$

于是

$$\begin{aligned} \int_0^2 f(x) dx &= \int_0^1 f(x) dx + \int_1^2 f(x) dx \\ &= \int_0^1 [1 + f'(\xi_1)x] dx + \int_1^2 [1 + f'(\xi_2)(x - 2)] dx \\ &= 2 + \frac{f'(\xi_1)}{2} - \frac{1}{2}f'(\xi_2). \end{aligned}$$

由 $|f'| \leq 1$ 可知

$$1 = 2 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \leq 2 + \frac{f'(\xi_1)}{2} - \frac{1}{2}f'(\xi_2) \leq 2 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 3.$$

故

$$1 \leq \int_0^2 f(x) dx \leq 3.$$

□

例题 7.39 设 f 在区间 $[0, 1]$ 上连续可导, 且 $f(0) = f(1) = 0$. 求证:

$$\left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2 \leq \frac{1}{12} \int_0^1 (f'(x))^2 dx$$

且等号成立当且仅当 $f(x) = Ax(1 - x)$, 其中 A 是常数.

笔记 对于在两个端点取零值的连续可导函数, 可以考虑 $(ax + b)f'(x)$ 的积分, 并利用分部积分公式得到一些结果.

证明 设 t 是任意常数, 有

$$\int_0^1 (x + t)f'(x) dx = (x + t)f(x) \Big|_0^1 - \int_0^1 f(x) dx = - \int_0^1 f(x) dx.$$

于是利用 Cauchy 积分不等式, 可得

$$\begin{aligned} \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2 &= \left(\int_0^1 (x + t)f'(x) dx \right)^2 \\ &\leq \int_0^1 (x + t)^2 dx \int_0^1 (f'(x))^2 dx \\ &= \left(\frac{1}{3} + t + t^2 \right) \int_0^1 (f'(x))^2 dx. \end{aligned}$$

取 $t = -\frac{1}{2}$, 即得所证不等式. 当所证不等式成为等式时, 上面所用的 Cauchy 不等式应为等式. 因此, 存在常数 C 使得 $f'(x) = C \left(x - \frac{1}{2} \right)$. 注意到 $f(0) = f(1) = 0$, 可得 $f(x) = Ax(1 - x)$, 这里 A 为任意常数.

□

例题 7.40 设 f, g 是区间 $[0, 1]$ 上的连续函数, 使得对 $[0, 1]$ 上任意满足 $\varphi(0) = \varphi(1) = 0$ 的连续可导函数 φ 有

$$\int_0^1 [f(x)\varphi'(x) + g(x)\varphi(x)] dx = 0$$

求证: f 可导, 且 $f' = g$.

证明 设

$$c = \int_0^1 f(t) dt - \int_0^1 g(t) dt + \int_0^1 tg(t) dt$$

考察函数

$$G(x) = \int_0^x g(t) dt + c$$

显然 G 可导且 $G'(x) = g(x)$, $G(1) = \int_0^1 g(t)dt + c$. 只需证明 $f = G$. 令

$$\varphi(x) = \int_0^x [f(t) - G(t)] dt$$

则 φ 可导, 且 $\varphi(0) = 0$,

$$\begin{aligned}\varphi(1) &= \int_0^1 f(t)dt - \int_0^1 G(t)dt = \int_0^1 f(t)dt - \left[tG(t) \Big|_0^1 - \int_0^1 tg(t)dt \right] = \int_0^1 f(t)dt - G(1) + \int_0^1 tg(t)dt \\ &= \int_0^1 f(t)dt - \int_0^1 g(t)dt - c + \int_0^1 tg(t)dt = 0\end{aligned}$$

根据条件有

$$\int_0^1 [f(x)\varphi'(x) + g(x)\varphi(x)] dx = 0$$

因为

$$\int_0^1 g(x)\varphi(x)dx = G(x)\varphi(x) \Big|_0^1 - \int_0^1 G(x)\varphi'(x)dx = - \int_0^1 G(x)\varphi'(x)dx$$

所以

$$\int_0^1 [f(x) - G(x)] \varphi'(x) dx = 0$$

注意到 $\varphi' = f - G$. 我们有

$$\int_0^1 [f(x) - G(x)]^2 dx = 0$$

于是 $f = G$.

□

命题 7.11

设 f 是区间 $[a, b]$ 上的严格单调递减连续函数, $f(a) = b, f(b) = a$, g 是 f 的反函数. 求证:

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^b g(x) dx.$$

特别地, 对 $p > 0, q > 0$ 取 $f(x) = (1 - x^q)^{\frac{1}{p}}, g(x) = (1 - x^p)^{\frac{1}{q}}$, 可得

$$\int_0^1 (1 - x^p)^{\frac{1}{q}} dx = \int_0^1 (1 - x^q)^{\frac{1}{p}} dx.$$

◆

证明 因为可以用在 a, b 分别插值于 $f(a), f(b)$ 的严格单调递减的多项式 (也可以用 Bernstein 多项式) 在 $[a, b]$ 上一致逼近 $f(x)$, 所以只需对 f 是连续可微函数的情况证明.

作变换 $x = f(t)$, 有

$$\begin{aligned}\int_a^b g(x) dx &= \int_b^a g(f(t))f'(t) dt = \int_b^a t f'(t) dt \\ &= t f(t) \Big|_b^a - \int_b^a f(t) dt = \int_a^b f(t) dt\end{aligned}$$

故所证等式成立.

□

例题 7.41 设 f 是区间 $[a, b]$ 上的连续可微函数. 求证:

$$\max_{a \leq x \leq b} f(x) \leq \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx + \int_a^b |f'(x)| dx.$$

证明 由于有限闭区间上连续函数可取到最大值, 可设 $\max_{a \leq x \leq b} f(x) = f(y)$. 因此对任意 $x \in [a, b]$, 有

$$\max_{a \leq x \leq b} f(x) - f(x) = f(y) - f(x) = \int_x^y f'(t) dt \leq \int_a^b |f'(t)| dt$$

关于 x 在 $[a, b]$ 上积分, 即得

$$(b-a) \max_{a \leq x \leq b} f(x) - \int_a^b f(x) dx \leq (b-a) \int_a^b |f'(t)| dt.$$

两边除以 $b-a$ 即得所证. \square

例题 7.42 设 $\alpha \in \left[0, \frac{1}{2}\right]$, $f \in C^1[0, 1]$ 且满足 $f(1) = 0$. 求证:

$$\int_0^1 |f(x)|^2 dx + \left(\int_0^1 |f(x)| dx \right)^2 \leq \frac{4}{3-4\alpha} \int_0^1 x^{2\alpha+1} |f'(x)|^2 dx.$$

证明 设 $\alpha \in [0, 1)$ 且 $\alpha \neq \frac{1}{2}$. 根据 Newton-Leibniz 公式和 Cauchy 不等式, 对 $x \in [0, 1]$ 有

$$\begin{aligned} f^2(x) &= \left(\int_x^1 f'(t) dt \right)^2 = \left(\int_x^1 t^{-\alpha} \cdot t^\alpha f'(t) dt \right)^2 \\ &\leq \int_x^1 t^{-2\alpha} dt \int_x^1 t^{2\alpha} |f'(t)|^2 dt = \frac{1}{1-2\alpha} (1-x^{1-2\alpha}) \int_x^1 t^{2\alpha} |f'(t)|^2 dt \end{aligned}$$

因此, 由分部积分得

$$\begin{aligned} \int_0^1 f^2(x) dx &\leq \frac{1}{1-2\alpha} \int_0^1 (1-x^{1-2\alpha}) \left(\int_x^1 t^{2\alpha} |f'(t)|^2 dt \right) dx \\ &= \frac{1}{1-2\alpha} \left[\left(x - \frac{x^{2-2\alpha}}{2-2\alpha} \right) \int_x^1 t^{2\alpha} |f'(t)|^2 dt \Big|_0^1 \right. \\ &\quad \left. + \int_0^1 \left(x - \frac{x^{2-2\alpha}}{2-2\alpha} \right) x^{2\alpha} |f'(x)|^2 dx \right] \end{aligned}$$

即

$$\int_0^1 f^2(x) dx \leq \frac{1}{1-2\alpha} \int_0^1 x^{2\alpha+1} |f'(x)|^2 dx - \frac{1}{(1-2\alpha)(2-2\alpha)} \int_0^1 x^2 |f'(x)|^2 dx. \quad (7.56)$$

另一方面, 有

$$\begin{aligned} \int_0^1 |f(x)| dx &= \int_0^1 \left| \int_1^x f'(t) dt \right| dx \leq \int_0^1 \left(\int_x^1 |f'(t)| dt \right) dx \\ &= x \left(\int_x^1 |f'(t)| dt \right) \Big|_0^1 + \int_0^1 x |f'(x)| dx \end{aligned}$$

因此

$$\int_0^1 |f(x)| dx \leq \int_0^1 x |f'(x)| dx. \quad (7.57)$$

再由 Cauchy 不等式, 有

$$\begin{aligned} \left(\int_0^1 |f(x)| dx \right)^2 &\leq \left(\int_0^1 x^{\frac{1-2\alpha}{2}} \cdot x^{\frac{2\alpha+1}{2}} |f'(x)| dx \right)^2 \\ &\leq \left(\int_0^1 x^{1-2\alpha} dx \right) \left(\int_0^1 x^{2\alpha+1} |f'(x)|^2 dx \right) \\ &= \frac{1}{2-2\alpha} \int_0^1 x^{2\alpha+1} |f'(x)|^2 dx \end{aligned}$$

结合式 (7.56), 可得

$$\int_0^1 |f(x)|^2 dx + \left(\int_0^1 |f(x)| dx \right)^2 \leq \frac{1}{(2\alpha-1)(2-2\alpha)} \int_0^1 x^2 |f'(x)|^2 dx - \frac{3-4\alpha}{(2\alpha-1)(2-2\alpha)} \int_0^1 x^{2\alpha+1} |f'(x)|^2 dx \quad (7.58)$$

在上式中取 $\alpha = \frac{3}{4}$, 即得

$$\int_0^1 |f(x)|^2 dx + \left(\int_0^1 |f(x)| dx \right)^2 \leq 4 \int_0^1 x^2 |f'(x)|^2 dx. \quad (7.59)$$

对 $\alpha \in \left[0, \frac{1}{2}\right)$, 将式 (7.58) 两边乘以 $4(1-2\alpha)(2-2\alpha)$ 再与式 (7.59) 相加可得

$$\int_0^1 |f(x)|^2 dx + \left(\int_0^1 |f(x)| dx \right)^2 \leq \frac{4}{3-4\alpha} \int_0^1 x^{2\alpha+1} |f'(x)|^2 dx.$$

□

例题 7.43 设 f 在 $[0, 1]$ 上非负且连续可导. 求证:

$$\left| \int_0^1 f^3(x) dx - f^2(0) \int_0^1 f(x) dx \right| \leq \max_{0 \leq x \leq 1} |f'(x)| \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2$$

证明 记 $M = \max_{0 \leq x \leq 1} |f'(x)|$, 则有

$$-Mf(x) \leq f(x)f'(x) \leq Mf(x), \quad \forall x \in [0, 1]$$

因此

$$-M \int_0^x f(t) dt \leq \frac{1}{2} f^2(x) - \frac{1}{2} f^2(0) \leq M \int_0^x f(t) dt, \quad \forall x \in [0, 1]$$

上式两边乘以 f 得

$$-Mf(x) \int_0^x f(t) dt \leq \frac{1}{2} f^3(x) - \frac{1}{2} f^2(0)f(x) \leq Mf(x) \int_0^x f(t) dt, \quad \forall x \in [0, 1]$$

将上式关于变量 x 在 $[0, 1]$ 上积分, 得

$$-M \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2 \leq \int_0^1 f^3(x) dx - f^2(0) \int_0^1 f(x) dx \leq M \left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2$$

结论得证.

□

例题 7.44 设 f 在 $[0, 1]$ 上非负单调递增连续函数, $0 < \alpha < \beta < 1$. 求证:

$$\int_0^1 f(x) dx \geq \frac{1-\alpha}{\beta-\alpha} \int_\alpha^\beta f(x) dx$$

并且 $\frac{1-\alpha}{\beta-\alpha}$ 不能换为更大的数.

注 当函数具有单调性时, 小区间上的积分与整体区间上的积分可比较大小.

证明 根据积分中值定理, 存在 $\xi \in (\alpha, \beta)$ 使得

$$\int_\alpha^\beta f(x) dx = f(\xi)(\beta - \alpha)$$

因而由 f 的递增性, 有

$$\int_\alpha^\beta f(x) dx \leq (\beta - \alpha)f(\beta)$$

于是

$$\begin{aligned} \int_0^1 f(x) dx &= \int_0^\alpha f(x) dx + \int_\alpha^\beta f(x) dx + \int_\beta^1 f(x) dx \\ &\geq \int_\alpha^\beta f(x) dx + \int_\beta^1 f(x) dx \geq \int_\alpha^\beta f(x) dx + \int_\beta^1 f(\beta) dx \\ &= \int_\alpha^\beta f(x) dx + (1-\beta)f(\beta) \geq \int_\alpha^\beta f(x) dx + \frac{1-\beta}{\beta-\alpha} \int_\alpha^\beta f(x) dx \\ &= \frac{1-\alpha}{\beta-\alpha} \int_\alpha^\beta f(x) dx. \end{aligned}$$

取正整数 n 使得 $\alpha + \frac{1}{n} < \beta$. 构造函数

$$f_n(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq \alpha, \\ n(x - \alpha), & \alpha < x \leq \alpha + \frac{1}{n}, \\ 1, & \alpha + \frac{1}{n} < x \leq 1. \end{cases}$$

显然这是一个连续函数, 且

$$\int_0^1 f_n(x) dx = 1 - \alpha - \frac{1}{2n}, \quad \int_\alpha^\beta f_n(x) dx = \beta - \alpha - \frac{1}{2n}.$$

因而

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^1 f_n(x) dx}{\int_\alpha^\beta f_n(x) dx} = \frac{1 - \alpha}{\beta - \alpha}$$

故题中 $\frac{1 - \alpha}{\beta - \alpha}$ 不能换成更大的数.

□

例题 7.45 设函数 f 在 $[0, 1]$ 上连续的二阶导函数, $f(0) = f(1) = 0, f'(1) = \frac{a}{2}$. 求证:

$$\int_0^1 x(f''(x))^2 dx \geq \frac{a^2}{2}$$

并求上式成为等式的 f .

注 当 f 在端点的值为零, f' 在端点的值确定时, 可以考虑 f'' 与线性函数的乘积的积分.

证明 根据分部积分, Newton-Leibniz 公式和题设条件, 有

$$\begin{aligned} 0 &\leq \int_0^1 x(f''(x) - a)^2 dx = \int_0^1 x(f''(x))^2 dx - 2a \int_0^1 x f''(x) dx + a^2 \int_0^1 x dx \\ &= \int_0^1 x(f''(x))^2 dx - 2a \left(x f'(x) \Big|_0^1 - \int_0^1 f'(x) dx \right) + \frac{a^2}{2} \\ &= \int_0^1 x(f''(x))^2 dx - 2a (f'(1) - f(1) + f(0)) + \frac{a^2}{2} \\ &= \int_0^1 x(f''(x))^2 dx - \frac{a^2}{2} \end{aligned}$$

所以

$$\int_0^1 x(f''(x))^2 dx \geq \frac{a^2}{2}$$

等式成立时, 有

$$f''(x) = a$$

即 $f(x) = \frac{1}{2}ax^2 + bx + c$. 因为 $f(0) = f(1) = 0, f'(1) = \frac{a}{2}$, 所以 $c = 0, b = -\frac{a}{2}$. 因此

$$f(x) = \frac{1}{2}ax(x - 1).$$

□

例题 7.46 设 n 是正整数, 且 $m > 2$. 求证:

$$\int_0^{\pi/2} t \left| \frac{\sin nt}{\sin t} \right|^m dt \leq \left(\frac{m \cdot n^{m-2}}{8(m-2)} - \frac{1}{4(m-2)} \right) \pi^2.$$

注 当利用积分的可加性把区间 $[a, b]$ 上的积分分为区间 $[a, c]$ 和区间 $[c, b]$ 上的积分之和时, 为了得到较好的估计, 可以根据情况选择适当的 c .

证明 用数学归纳法容易证明 $|\sin nt| \leq n \sin t, t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$. 另外又有

$$|\sin nt| \leq 1, \quad \sin t \geq \frac{2t}{\pi}, \quad t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right].$$

设 $a \in (0, \frac{\pi}{2})$. 则有

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi/2} t \left| \frac{\sin nt}{\sin t} \right|^m dt &= \int_0^a t \left(\frac{\sin nt}{\sin t} \right)^m dt + \int_a^{\pi/2} t \left(\frac{\sin nt}{\sin t} \right)^m dt \\ &\leq \int_0^a tn^m dt + \int_a^{\pi/2} t \left(\frac{1}{2t/\pi} \right)^m dt \\ &= \frac{1}{2} n^m a^2 + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\pi}{2} \right)^m \left(\frac{1}{a^{m-2}} - \frac{1}{(\pi/2)^{m-2}} \right). \end{aligned}$$

易知函数 $g(a) = \frac{1}{2} n^m a^2 + \frac{1}{m-2} \left(\frac{\pi}{2} \right)^m \frac{1}{a^{m-2}}$ 当 $a = \frac{\pi}{2n}$ 时取最小值. 于是将上面的 a 换成 $\frac{\pi}{2n}$ 可得

$$\int_0^{\pi/2} t \left| \frac{\sin nt}{\sin t} \right|^m dt \leq \left(\frac{m \cdot n^{m-2}}{8(m-2)} - \frac{1}{4(m-2)} \right) \pi^2.$$

□

例题 7.47 设 $n \geq 1$ 是自然数. 求证:

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{|\sin(2n+1)t|}{\sin t} dt < \frac{2n^2+1}{2n^2+n} + \frac{1}{2} \ln n.$$

证明 注意到

$$\int_0^{\pi/2} \frac{|\sin(2n+1)t|}{\sin t} dt = \int_0^{\pi/2n} \frac{|\sin(2n+1)t|}{\sin t} dt + \int_{\pi/2n}^{\pi/2} \frac{|\sin(2n+1)t|}{\sin t} dt.$$

因为当 $x \in (0, \frac{\pi}{2})$ 时, $\sin x > \frac{2x}{\pi}$, 所以

$$\int_{\pi/2n}^{\pi/2} \frac{|\sin(2n+1)t|}{\sin t} dt < \int_{\pi/2n}^{\pi/2} \frac{1}{2t/\pi} dt = \frac{\pi}{2} \ln n.$$

另一方面,

$$\int_0^{\pi/2n} \frac{|\sin(2n+1)t|}{\sin t} dt = \int_0^{\pi/(2n+1)} \frac{\sin(2n+1)t}{\sin t} dt - \int_{\pi/(2n+1)}^{\pi/2n} \frac{\sin(2n+1)t}{\sin t} dt.$$

用数学归纳法容易证明当 $t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ 时, 有 $|\sin nt| \leq n \sin t$. 因此

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi/(2n+1)} \frac{\sin(2n+1)t}{\sin t} dt &= \int_0^{\pi/(2n+1)} \left(\frac{\sin 2nt \cos t}{\sin t} + \cos 2nt \right) dt = \int_0^{\pi/(2n+1)} \frac{\sin 2nt \cos t}{\sin t} dt + \frac{1}{2n} \sin \frac{2n\pi}{2n+1} \\ &= \int_0^{\pi/(2n+1)} 2n \cos t dt + \frac{1}{2n} \sin \frac{2n\pi}{2n+1} < 2n \sin \frac{\pi}{2n+1} + \frac{1}{2n} \sin \frac{2n\pi}{2n+1} \\ &= \left(2n + \frac{1}{2n} \right) \sin \frac{\pi}{2n+1}, \end{aligned}$$

$$-\int_{\pi/(2n+1)}^{\pi/2n} \frac{\sin(2n+1)t}{\sin t} dt = -\int_{\pi/(2n+1)}^{\pi/2n} \left(\frac{\sin 2nt \cos t}{\sin t} + \cos 2nt \right) dt < -\int_{\pi/(2n+1)}^{\pi/2n} \cos 2nt dt = \frac{1}{2n} \sin \frac{\pi}{2n+1}.$$

因此

$$\int_0^{\pi/2n} \frac{|\sin(2n+1)t|}{\sin t} dt < \left(2n + \frac{1}{2n} \right) \sin \frac{\pi}{2n+1} < \left(2n + \frac{1}{2n} \right) \frac{\pi}{2n+1} = \frac{2n^2+1}{2n^2+n} \pi.$$

于是

$$\int_0^{\pi/2} \frac{|\sin(2n+1)t|}{\sin t} dt < \frac{2n^2+1}{2n^2+n} \pi + \frac{\pi}{2} \ln n.$$

两边同时除以 π 得:

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{|\sin(2n+1)t|}{\sin t} dt < \frac{2n^2+1}{2n^2+n} + \frac{1}{2} \ln n.$$

□

命题 7.12

设 f 在区间 $[0, a)$ 上有二阶连续导数, 满足 $f(0) = f'(0) = 0$ 且 $f''(x) > 0$ ($0 < x < a$). 求证: 对任意 $x \in (0, a)$, 有

$$\int_0^x \sqrt{1 + (f'(t))^2} dt < x + \frac{f(x)f'(x)}{\sqrt{1 + (f'(x))^2} + 1}. \quad (7.60)$$



注 式(7.60)左端是弧长计算公式, 不等式(7.60)的几何意义是: 光滑下凸曲线段的起点 A 和终点 B 处的切线在曲线凸出的一侧相交于 C 点, 则直线段 AC 与 BC 的长度之和大于这条曲线段的长度.

证明 将式(7.60)右端第一项 x 移到左端, 有

$$\int_0^x \left(\sqrt{1 + (f'(t))^2} - 1 \right) dt = \int_0^x \frac{f'(t)}{\sqrt{1 + (f'(t))^2} + 1} \cdot f'(t) dt.$$

因为 $f'(t)$ 和 $\frac{t}{\sqrt{1+t^2}+1}$ 都是单调递增函数, 所以 $\frac{f'(t)}{\sqrt{1+(f'(t))^2}+1}$ 是单调递增函数. 因此

$$\int_0^x \left(\sqrt{1 + (f'(t))^2} - 1 \right) dt < \frac{f'(x)}{\sqrt{1 + (f'(x))^2} + 1} \cdot \int_0^x f'(t) dt = \frac{f(x)f'(x)}{\sqrt{1 + (f'(x))^2} + 1}.$$



例题 7.48 f 是区间 $[0, 1]$ 上的正连续函数, $k \geq 1$. 求证:

$$\int_0^1 \frac{1}{1+f(x)} dx \int_0^1 f(x) dx \leq \int_0^1 \frac{f^{k+1}(x)}{1+f(x)} dx \int_0^1 \frac{1}{f^k(x)} dx, \quad (7.61)$$

并讨论等号成立的条件.

证明 当 $k \geq 1$ 时, 函数 $\frac{t^k}{1+t}$ 和 t^{k+1} 都是单调递增的. 因此对于任意 $x, y \in [0, 1]$, 有

$$\frac{1}{f^k(x)f^k(y)} \left(\frac{f^k(x)}{1+f(x)} - \frac{f^k(y)}{1+f(y)} \right) (f^{k+1}(x) - f^{k+1}(y)) \geq 0, \quad (7.62)$$

即

$$\frac{f(x)}{1+f(y)} + \frac{f(y)}{1+f(x)} \leq \frac{f^{k+1}(x)}{1+f(x)} \cdot \frac{1}{f^k(y)} + \frac{f^{k+1}(y)}{1+f(y)} \cdot \frac{1}{f^k(x)}.$$

在上式两端分别关于变量 x, y 在区间 $[0, 1]$ 上积分, 即得所证.

要使式(7.61)成为等式, 必须式(7.62)成为等式. 因此对任意 $x, y \in [0, 1]$, 有 $f(x) = f(y)$, 即 f 在 $[0, 1]$ 上为常数.



例题 7.49 设 $b \geq a + 2$. 函数 f 在 $[a, b]$ 上为正连续函数, 且

$$\int_a^b \frac{1}{1+f(x)} dx = 1.$$

求证:

$$\int_a^b \frac{f(x)}{b-a-1+f^2(x)} dx \leq 1. \quad (7.63)$$

并求式(7.63)成为等式的条件.

证明 令 $g(x) = \frac{b-a}{1+f(x)}$, 则 g 在 $[a, b]$ 上连续且 $\int_a^b g(x) dx = b-a$. 从 g 的定义可得 $f(x) = \frac{b-a-g(x)}{g(x)}$. 因此

$$\begin{aligned} \frac{f(x)}{b-a-1+f^2(x)} &= \frac{\frac{b-a-g(x)}{g(x)}}{b-a-1+\left(\frac{b-a-g(x)}{g(x)}\right)^2} = \frac{1}{b-a} \cdot \frac{g(x)(b-a-g(x))}{g^2(x)-2g(x)+b-a} \\ &= \frac{1}{b-a} \left[-1 + \frac{(b-a-2)g(x)+b-a}{(g(x)-1)^2+b-a-1} \right] \leq \frac{1}{b-a} \left[-1 + \frac{(b-a-2)g(x)+b-a}{b-a-1} \right] \\ &= \frac{1}{b-a} \cdot \frac{(b-a-2)g(x)+1}{b-a-1}, \end{aligned}$$

故

$$\begin{aligned} \int_a^b \frac{f(x)}{b-a-1+f^2(x)} dx &\leq \int_a^b \frac{1}{b-a} \cdot \frac{(b-a-2)g(x)+1}{b-a-1} dx \\ &= \frac{1}{b-a} \cdot \frac{(b-a-2)(b-a)+b-a}{b-a-1} = 1. \end{aligned}$$

等号成立当且仅当 $g(x) = 1$, 即 $f(x) = b-a-1$ 时成立.

□

例题 7.50 设 f 是 $(-\infty, +\infty)$ 上连续函数, 且在 $(-\infty, a] \cup [b, +\infty)$ 上等于零. 又设

$$\varphi(x) = \frac{1}{2h} \int_{x-h}^{x+h} f(t) dt \quad (h > 0).$$

求证:

$$\int_a^b |\varphi(x)| dx \leq \int_a^b |f(x)| dx.$$

证明 作变换 $u = t - x$, 得

$$\int_{x-h}^{x+h} |f(t)| dt = \int_{-h}^h |f(u+x)| du.$$

因此

$$\int_a^b \int_{-h}^h |f(u+x)| du dx = \int_{-h}^h \int_a^b |f(u+x)| dx du.$$

作变换 $v = u + x$, 得

$$\int_a^b |f(u+x)| dx = \int_{a+u}^{b+u} |f(v)| dv = \begin{cases} \int_{a+u}^b |f(v)| dv, & u \geq 0, \\ \int_a^{b+u} |f(v)| dv, & u < 0 \end{cases} \leq \int_a^b |f(v)| dv.$$

由此可知

$$\begin{aligned} \int_a^b |\varphi(x)| dx &= \int_a^b \left| \frac{1}{2h} \int_{x-h}^{x+h} f(t) dt \right| dx \leq \frac{1}{2h} \int_a^b \int_{x-h}^{x+h} |f(t)| dt dx \\ &= \frac{1}{2h} \int_a^b \int_{-h}^h |f(u+x)| du dx = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h \int_a^b |f(u+x)| dx du \\ &\leq \frac{1}{2h} \int_{-h}^h \int_a^b |f(v)| dv du = \int_a^b |f(v)| dv. \end{aligned}$$

□

例题 7.51 设 f 在区间 $[1, +\infty)$ 上连续并满足

$$x \int_1^x f(t) dt = (x+1) \int_1^x t f(t) dt. \quad (7.64)$$

求 f .

解 假设 f 是满足条件的连续函数, 则对式 (7.64) 两边求导得

$$\int_1^x f(t) dt = \int_1^x t f(t) dt + x^2 f(x). \quad (7.65)$$

由此可知, $f(1) = 0$, 且当 $x \geq 1$ 时, f 可导. 对式 (7.65) 两边求导得

$$f(x) = x f(x) + 2x f(x) + x^2 f'(x),$$

即

$$f'(x) = \frac{1-3x}{x^2} f(x), \quad x \geq 1. \quad (7.66)$$

所以

$$|f'(x)| \leq 2|f(x)|. \quad (7.67)$$

令 $g(x) = e^{-4x} f^2(x)$, 则有

$$g'(x) = 2e^{-4x} (f(x)f'(x) - 2f^2(x)).$$

结合式(7.67)可知 $g' \leq 0$, 这说明 g 单调递减. 因为 $g(1) = 0$, 所以 $g \leq 0$. 但从 g 的定义知 $g \geq 0$. 于是 $g = 0$, 从而 $f = 0$.

实际上, 由(7.66)可解得 $f(x) = Ce^{\int_1^x \frac{1-3t}{t^2} dt} = Ce^{1-\frac{1}{x}-3\ln x}$, 再将 $f(1) = 0$ 代入得 $C = 0$. 故 $f \equiv 0$.

总之, 原方程(7.64)的解只有 $f \equiv 0$.

□

例题 7.52 设 f 在任意有限区间上可积, 且对任意 x 及任意 $a \neq 0$ 满足

$$\frac{1}{2a} \int_{x-a}^{x+a} f(t) dt = f(x).$$

试求函数 f .

解 易知线性函数满足上面的式子. 下面证明满足上式的函数必是线性函数. 由条件知, 对任意 x 和 a , 有

$$\int_{x-a}^{x+a} f(t) dt = 2af(x).$$

因此

$$2af(x+y) = \int_{x+y-a}^{x+y+a} f(t) dt = \int_{y+x-a}^{y+a-x} f(t) dt + \int_{y+a-x}^{x+y+a} f(t) dt = 2(a-x)f(y) + 2x f(y+a).$$

取 $a = 1, y = 0$ 就得

$$f(x) = (f(1) - f(0))x + f(0),$$

即 f 是线性函数.

□

例题 7.53 设 f 是 \mathbb{R} 上有下界的连续函数. 若存在常数 $a \in (0, 1]$ 使得

$$f(x) - a \int_x^{x+1} f(t) dt$$

为常数, 则 f 无穷可微且它的任意阶导函数都是非负的.

证明 不妨设 $m = \inf_{x \in \mathbb{R}} f(x) = 0$ (不然将 f 换为 $f - m$ 之后再证明). 此时 $f \geq 0$. 记

$$A = f(x) - a \int_x^{x+1} f(t) dt, \quad (7.68)$$

则 $f \geq A$. 因此, $A \leq 0$. 由式(7.68)知 f 无穷可微, 且

$$f'(x) = af(x+1) - af(x). \quad (7.69)$$

记 $a_1 = a$, 则

$$f'(x) + a_1 f(x) \geq 0.$$

假设存在 $a_n > 0$ 使得

$$f'(x) + a_n f(x) \geq 0. \quad (7.70)$$

则 $(e^{a_n x} f(x))' \geq 0$. 这说明函数 $e^{a_n x} f(x)$ 是递增的. 由式(7.68)可得

$$\begin{aligned} f(x) &\leq a \int_x^{x+1} f(t) dt = a \int_x^{x+1} e^{a_n t} f(t) e^{-a_n t} dt \\ &\leq a e^{a_n(x+1)} f(x+1) \int_x^{x+1} e^{-a_n t} dt \\ &= \frac{e^{a_n} - 1}{a_n} a f(x+1) \\ &= \frac{e^{a_n} - 1}{a_n} (f'(x) + a f(x)). \end{aligned}$$

由此可得

$$f'(x) + a_{n+1}f(x) \geq 0, \quad (7.71)$$

其中

$$a_{n+1} = a - \frac{a_n}{e^{a_n} - 1}.$$

若 $a_{n+1} \leq 0$, 则由 (7.71) 得 $f' \geq 0$. 若 $a_{n+1} > 0$, 则接着可构造 a_{n+2} . 若 $\{a_n\}$ 均为正的, 则 $\{a_n\}$ 为递减正数列, 设其极限为 $r \geq 0$. 若 $r > 0$, 则从上式得 $r = a - \frac{r}{e^r - 1}$, 即 $a = \frac{re^r}{e^r - 1} > 1$. 这与条件不符, 因此必有 $r = 0$. 在式 (7.70) 中令 $n \rightarrow +\infty$, 即得对一切 x 有 $f'(x) \geq 0$. 注意到

$$f^{(n)}(x) - a \int_x^{x+1} f^{(n)}(t) dt = 0, \quad n = 1, 2, \dots,$$

因而将前面的 f 换为 f' , 可以得到 $f''(x) \geq 0$, 依次可以证明 $f^{(n)}(x) \geq 0$.

□

例题 7.54 求所有连续函数 $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 使得对任意 $x \in \mathbb{R}$ 和任意正整数 n , 有

$$n^2 \int_x^{x+\frac{1}{n}} f(t) dt = nf(x) + \frac{1}{2}.$$

解 设 f 是要求的一个连续函数, 则 f 是可导的且

$$n \left[f \left(x + \frac{1}{n} \right) - f(x) \right] = f'(x). \quad (7.72)$$

由此知 f 二阶可导, 且

$$n \left[f' \left(x + \frac{1}{n} \right) - f'(x) \right] = f''(x). \quad (7.73)$$

将 (7.72) 中的 n 换成 $2n$, 得

$$2n \left[f \left(x + \frac{1}{2n} \right) - f(x) \right] = f'(x). \quad (7.74)$$

将上式中的 x 换成 $x + \frac{1}{2n}$ 得

$$2n \left[f \left(x + \frac{1}{n} \right) - f \left(x + \frac{1}{2n} \right) \right] = f' \left(x + \frac{1}{2n} \right). \quad (7.75)$$

将式 (7.72) 两边乘以 2 再减去式 (7.74) 两边, 得

$$2n \left[f \left(x + \frac{1}{n} \right) - f \left(x + \frac{1}{2n} \right) \right] = f'(x). \quad (7.76)$$

从式 (7.75) 和式 (7.76) 得

$$f'(x) = f' \left(x + \frac{1}{2n} \right), \quad \forall n \in \mathbb{Z}^+, \forall x \in \mathbb{R}.$$

由 (7.73) 式可知 $f'' = 0$. 因而存在常数 a, b 使得 $f(x) = ax + b$. 代入题设条件可得 $a = 1$. 于是 $f(x) = x + b$, 这里 b 是任意常数.

□

例题 7.55 设 $f \in C[-1, 1]$ 且对任意整数 n 满足

$$\int_0^1 f(\sin(nx)) dx = 0. \quad (7.77)$$

求证: 对任意 $x \in [-1, 1]$ 有 $f(x) = 0$.

证明 在式 (7.77) 中取 $n = 0$, 可得 $f(0) = 0$. 对任意非零整数 n , 将式 (7.77) 中的积分作变换 $t = nx$ 可得

$$\int_0^n f(\sin t) dt = 0.$$

令

$$F(x) = \int_x^{x+1} f(\sin t) dt,$$

则 F 可导, 且 $F(n) = 0$. 对整数 k 有

$$\begin{aligned} F(x + 2k\pi) &= \int_{x+2k\pi}^{x+2k\pi+1} f(\sin t) dt = \int_x^{x+1} f(\sin(t + 2k\pi)) dt \\ &= \int_x^{x+1} f(\sin t) dt = F(x). \end{aligned}$$

因而 $F(n + 2k\pi) = F(n) = 0$. 这说明 F 在集合 $A = \{n + 2k\pi \mid n, k \in \mathbb{Z}\}$ 上取值为 0. 由于集合 A 在 \mathbb{R} 上是稠密的, 由 F 的连续性可知 $F(x) = 0 (x \in \mathbb{R})$. 于是

$$F'(x) = f(\sin(x + 1)) - f(\sin x) = 0.$$

这说明 $f(\sin x)$ 是以 1 和 2π 为周期的连续函数. 仍由集合 A 的稠密性可知 $f(\sin x)$ 是常数. 因此 f 在 $[-1, 1]$ 上是常数. 故 $f(x) = f(0) = 0$.

□

例题 7.56 设 f 是 $[0, 2\pi]$ 上可导的凸函数, f' 有界, 试证

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos nx dx \geq 0.$$

证明 因为 f 是可导的凸函数, 所以 f' 是单调递增的函数. 由 f' 的单调有界性, 知 f' 在 $[0, 2\pi]$ 上可积. 根据分部积分公式, 得

$$\begin{aligned} \pi a_n &= \int_0^{2\pi} f(x) \cos nx dx = f(x) \frac{\sin nx}{n} \Big|_0^{2\pi} - \frac{1}{n} \int_0^{2\pi} f'(x) \sin nx dx \\ &= -\frac{1}{n} \int_0^{2\pi} f'(x) \sin nx dx = -\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{2n} \int_{(k-1)\pi/n}^{k\pi/n} f'(x) \sin nx dx \\ &= -\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{2n} \int_0^{\frac{\pi}{n}} f' \left(x + \frac{(k-1)\pi}{n} \right) \sin ((k-1)\pi + x) dx \\ &= -\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{2n} \int_0^{\frac{\pi}{n}} f' \left(x + \frac{(k-1)\pi}{n} \right) (-1)^{k-1} \sin x dx \\ &= -\frac{1}{n} \int_0^{\frac{\pi}{n}} \sum_{k=1}^{2n} (-1)^{k-1} f' \left(x + \frac{(k-1)\pi}{n} \right) \sin x dx \\ &= -\frac{1}{n} \int_0^{\frac{\pi}{n}} \sum_{k=1}^n \left(f' \left(x + \frac{(2k-2)\pi}{n} \right) - f' \left(x + \frac{(2k-1)\pi}{n} \right) \right) \sin x dx. \end{aligned}$$

注意到 f' 是单调递增的, 即知 $a_n \geq 0$.

□

例题 7.57 设 f 在 $[0, 1]$ 上连续可微, $f(0) = 0$. 求证:

$$\int_0^1 \frac{f^2(x)}{x^2} dx \leq 4 \int_0^1 (f'(x))^2 dx, \quad (7.78)$$

且右边的系数 4 是最佳的.

证明 证法一: 因为

$$f'(x) = x^{\frac{1}{2}} \left(x^{-\frac{1}{2}} f(x) \right)' + \frac{f(x)}{2x},$$

所以

$$(f'(x))^2 = \left[x^{\frac{1}{2}} \left(x^{-\frac{1}{2}} f(x) \right)' \right]^2 + \left(x^{-\frac{1}{2}} f(x) \right) \left(x^{-\frac{1}{2}} f(x) \right)' + \frac{f^2(x)}{4x^2} \geq \left(x^{-\frac{1}{2}} f(x) \right) \left(x^{-\frac{1}{2}} f(x) \right)' + \frac{f^2(x)}{4x^2}.$$

因而

$$\int_0^1 (f'(x))^2 dx \geq \frac{1}{2} f^2(1) + \int_0^1 \frac{f^2(x)}{4x^2} dx \geq \int_0^1 \frac{f^2(x)}{4x^2} dx,$$

即所证不等式 (7.78) 成立.

若存在常数 $c \in (0, 4)$ 使得

$$\int_0^1 \frac{f^2(x)}{x^2} dx \leq c \int_0^1 (f'(x))^2 dx \quad (7.79)$$

对任意满足条件的 f 成立, 则对 $\delta \in (0, 1)$ 取

$$f(x) = \begin{cases} \sqrt{x}, & x \in [\delta, 1], \\ \frac{3}{2\sqrt{\delta}}x - \frac{1}{2\delta^{\frac{3}{2}}}x^2, & x \in [0, \delta]. \end{cases}$$

此时, 有

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{f^2(x)}{x^2} dx &= \int_0^\delta \left(\frac{3}{2\sqrt{\delta}} - \frac{1}{2\delta^{\frac{3}{2}}}x \right)^2 dx + \int_\delta^1 \frac{1}{x} dx \\ &= \int_0^\delta \left(\frac{9}{4\delta} - \frac{3x}{2\delta^2} + \frac{x^2}{4\delta^3} \right) dx + \int_\delta^1 \frac{1}{x} dx \\ &= \frac{19}{12} + \int_\delta^1 \frac{1}{x} dx, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_0^1 (f'(x))^2 dx &= \int_0^\delta \left(\frac{3}{2\sqrt{\delta}} - \frac{1}{\delta^{\frac{3}{2}}}x \right)^2 dx + \int_\delta^1 \left(\frac{1}{2\sqrt{x}} \right)^2 dx \\ &= \int_0^\delta \left(\frac{9}{4\delta} - \frac{3x}{\delta^2} + \frac{x^2}{\delta^3} \right) dx + \frac{1}{4} \int_\delta^1 \frac{1}{x} dx \\ &= \frac{13}{12} + \frac{1}{4} \int_\delta^1 \frac{1}{x} dx. \end{aligned}$$

因此式(7.79)导致

$$\left(1 - \frac{c}{4}\right) \int_\delta^1 \frac{1}{x} dx \leq \frac{13}{12}c - \frac{19}{12}.$$

此式当 δ 充分小时是不成立的. 这个矛盾说明 4 是最佳的.

证法二: 利用 Minkowski 不等式, 可得

$$\begin{aligned} \left(\int_0^1 \frac{|f(x)|^2}{x^2} dx \right)^{\frac{1}{2}} &= \left[\int_0^1 \left(\int_0^1 f'(xt) dt \right)^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} \\ &\leq \int_0^1 \left(\int_0^1 |f'(xt)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} dt \stackrel{\text{换元}}{=} \int_0^1 \left(\frac{\int_0^t |f'(x)|^2 dx}{t} \right)^{\frac{1}{2}} dt \\ &\leq \left(\int_0^1 |f'(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{t}} dt = 2 \left(\int_0^1 |f'(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

从上式推导可以看出, 对于不恒为零的 f , 严格不等号成立.

为说明相关常数不可改进, 任取 $\varepsilon \in (0, 1)$, 考察不恒为零的 $\bar{f} \in C[\varepsilon, 1]$ 使得

$$\frac{\int_\varepsilon^1 \frac{|\bar{f}(x)|^2}{x^2} dx}{\int_0^1 |\bar{f}'(x)|^2 dx} = \lambda \equiv \sup_{\substack{f \in C[\varepsilon, 1] \\ f \neq 0}} \frac{\int_\varepsilon^1 \frac{|f(x)|^2}{x^2} dx}{\int_\varepsilon^1 |f'(x)|^2 dx}.$$

这样的 \bar{f} 的存在性一般需要用泛函分析. 这里只作形式推导. 任取 $\varphi \in C_c^1(\varepsilon, 1)$, 则

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{d}{ds} \left. \frac{\int_\varepsilon^1 \frac{|\bar{f}(x)+s\varphi(x)|^2}{x^2} dx}{\int_\varepsilon^1 |\bar{f}'(x)+s\varphi'(x)|^2 dx} \right|_{s=0} \\ &= \frac{2\lambda}{\int_\varepsilon^1 |\bar{f}'(x)|^2 dx} \left(\frac{1}{\lambda} \int_\varepsilon^1 \frac{\bar{f}(x)\varphi(x)}{x^2} dx - \int_\varepsilon^1 \bar{f}'(x)\varphi'(x) dx \right) \\ &= \frac{2\lambda}{\int_\varepsilon^1 |\bar{f}'(x)|^2 dx} \int_\varepsilon^1 \left(\bar{f}''(x) + \frac{1}{\lambda} \frac{\bar{f}(x)}{(x+\varepsilon)^2} \right) \varphi(x) dx. \end{aligned}$$

因此, 尝试寻找 \bar{f} 满足

$$\bar{f}''(x) + \frac{1}{\lambda} \frac{\bar{f}(x)}{x^2} = 0, \quad x \in [\varepsilon, 1].$$

若取 $\alpha \in (0, 1)$, 则 $\bar{f}(x) = x^\alpha$ 满足上述方程. 对应的 $\lambda = \frac{1}{\alpha(1-\alpha)}$, 为使得 λ 最大, 取 $\alpha = \frac{1}{2}$.

以上讨论启发我们考虑

$$f'_\varepsilon = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon}}, & x \in [0, \varepsilon], \\ \frac{1}{2\sqrt{x}}, & x \in (\varepsilon, 1]. \end{cases}$$

则

$$f_\varepsilon = \begin{cases} \frac{x}{2\sqrt{\varepsilon}}, & x \in [0, \varepsilon], \\ \sqrt{x} - \frac{\sqrt{\varepsilon}}{2}, & x \in (\varepsilon, 1]. \end{cases}$$

直接计算得到

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^1 \frac{|f_\varepsilon(x)|^2}{x^2} dx}{\int_0^1 |f'_\varepsilon(x)|^2 dx} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{2\sqrt{\varepsilon} - \frac{\varepsilon}{4} - \ln \varepsilon - \frac{3}{2}}{\frac{1}{4} - \frac{\ln \varepsilon}{4}} = 4.$$

这就表明不等式中的常数 4 是最佳的. □

例题 7.58 设 $f, g : [a, b] \rightarrow (0, +\infty)$ 都是连续函数, 且 $f \neq g$, $\int_a^b f(x) dx = \int_a^b g(x) dx$. 定义数列

$$I_n = \int_a^b \frac{f^{n+1}(x)}{g^n(x)} dx, \quad n = 0, 1, \dots$$

求证: $\{I_n\}$ 严格单调递增, 且 $\lim_{n \rightarrow +\infty} I_n = +\infty$.

证明 由 Cauchy 不等式, 得

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &= \int_a^b \frac{f(x)}{\sqrt{g(x)}} \cdot \sqrt{g(x)} dx \leq \left(\int_a^b \frac{f^2(x)}{g(x)} dx \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_a^b g(x) dx \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= \left(\int_a^b \frac{f^2(x)}{g(x)} dx \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_a^b f(x) dx \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

故

$$\int_a^b f(x) dx \leq \int_a^b \frac{f^2(x)}{g(x)} dx$$

即 $I_0 \leq I_1$, 等号成立当且仅当存在常数 c 使得 $\frac{f(x)}{\sqrt{g(x)}} = c\sqrt{g(x)}$, 即 $f(x) = cg(x)$. 再由条件 $\int_a^b f(x) dx = \int_a^b g(x) dx$ 可得 $c = 1$. 这与 $f \neq g$ 矛盾, 故 $I_0 < I_1$.

假设 $I_0 < I_1 < \dots < I_n$, 根据 Hölder 不等式, 有

$$\begin{aligned} I_n &= \int_a^b \frac{f^{n+1}(x)}{g^{\frac{(n+1)^2}{n+2}}(x)} \cdot g^{\frac{(n+1)^2}{n+2}-n}(x) dx \\ &\leq \left(\int_a^b \left(\frac{f^{n+1}(x)}{g^{\frac{(n+1)^2}{n+2}}(x)} \right)^{\frac{n+1}{n+2}} dx \right)^{\frac{n+1}{n+2}} \left(\int_a^b \left(g^{\frac{(n+1)^2}{n+2}-n}(x) \right)^{n+2} dx \right)^{\frac{1}{n+2}} \\ &= I_{n+1}^{\frac{n+1}{n+2}} \cdot I_0^{\frac{1}{n+2}} < I_{n+1}^{\frac{n+1}{n+2}} \cdot I_n^{\frac{1}{n+2}} \end{aligned}$$

因而 $I_n < I_{n+1}$, 这样, 根据数学归纳法原理, 就证明了 $\{I_n\}$ 严格单调递增.

若对任意 $x \in (a, b)$, 有 $g(x) \geq f(x)$, 则 $g(x) - f(x) \geq 0$. 根据条件 $g(x) - f(x)$ 连续且满足 $\int_a^b (g(x) - f(x)) dx = 0$,

这可推出 $f = g$, 与条件矛盾! 因此必存在 $x_0 \in (a, b)$ 使得 $f(x_0) > g(x_0)$, 因而存在正数 $\delta < \min\{x_0 - a, b - x_0\}$ 使得

$$f(x) > g(x), \quad x \in [x_0 - \delta, x_0 + \delta]$$

记 $m = \min_{x \in [x_0 - \delta, x_0 + \delta]} \frac{f(x)}{g(x)}$, 则 $m > 1$, 因此

$$I_n \geq \int_{x_0 - \delta}^{x_0 + \delta} \left(\frac{f(x)}{g(x)} \right)^n f(x) dx \geq m^n \int_{x_0 - \delta}^{x_0 + \delta} f(x) dx$$

令 $n \rightarrow +\infty$ 得 $\lim_{n \rightarrow +\infty} I_n = +\infty$. □

例题 7.59 设 $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 连续, 定义 $g(x) = f(x) \int_0^x f(t) dt$ ($x \in \mathbb{R}$). 如果 g 是 \mathbb{R} 上的递减函数, 求证: $f \equiv 0$.

证明 记 $F(x) = \int_0^x f(t) dt$, 则 F 可导且 $F' = f$. 由条件知

$$(F^2(x))' = 2F'(x)F(x) = 2g(x)$$

是单调递减函数. 注意到 $F(0) = 0$. 有 $(F^2(x))' \leq 0$ ($x > 0$), $(F^2(x))' \geq 0$ ($x < 0$). 这说明 $F^2(x)$ 当 $x \geq 0$ 时单调递减, 当 $x \leq 0$ 时单调递增. 因此 F^2 的最大值为 $F^2(0) = 0$. 但显然 $F^2 \geq 0$. 故 $F = 0$, 于是 $f = F' = 0$. □

例题 7.60 设 $f \in C[0, 1]$. 如果对任意 $x \in [0, 1]$ 有

$$\int_0^x f(t) dt \geq f(x) \geq 0,$$

求证: $f(x) \equiv 0$.

证明 记 $F(x) = \int_0^x f(t) dt$. 则 F 可导且 $F' = f$. 由条件知 $F(x) \geq F'(x)$. 因此 $(e^x F(x))' \leq 0$, 即 $e^x F(x)$ 单调递减. 由 $F(0) = 0$, 得 $F(x) \leq 0$. 但由条件 $F(x) \geq f(x) \geq 0$, 故 $F(x) = 0$, 于是 $f(x) = F'(x) = 0$. □

命题 7.13

设 $g(x) \in C^2[0, 1]$ 是递增的下凸函数, 则有

$$\inf_{\substack{f \in C[0, 1], \\ \int_{x^2}^x f(y) dy \geq g(x) - g(x^2)}} \int_0^1 |f(x)|^2 dx = \int_0^1 |g'(x)|^2 dx, \quad (7.80)$$

$$\inf_{\substack{f \in C[0, 1], \\ \int_x^1 f(y) dy \geq g(1) - g(x)}} \int_0^1 |f(x)|^2 dx = \int_0^1 |g'(x)|^2 dx. \quad (7.81)$$

 **笔记** 这题的下确界 \inf 可以改成最小值 \min , 因为可取到等号.

证明 我们令

$$F(x) = \int_x^1 f(y) dy + g(x),$$

则 $F(x^2) \geq F(x), \forall x \in [0, 1]$, 因此由 F 连续性, 就有

$$F(x) \geq F\left(x^{\frac{1}{2}}\right) \geq F\left(x^{\frac{1}{4}}\right) \geq \dots \geq \lim_{n \rightarrow \infty} F\left(x^{\frac{1}{2^n}}\right) = F(1), \forall x \in (0, 1],$$

于是我们有 $F(x) \geq F(1), \forall x \in [0, 1]$, 现在就有

$$\int_x^1 f(y) dy \geq g(1) - g(x), \forall x \in [0, 1],$$

因此

$$\left\{ \int_0^1 |f(x)|^2 dx : f \in C[0, 1], \int_{x^2}^x f(y) dy \geq g(x) - g(x^2) \right\} \subset \left\{ \int_0^1 |f(x)|^2 dx : f \in C[0, 1], \int_x^1 f(y) dy \geq g(1) - g(x^2) \right\}.$$

故

$$\inf_{\substack{f \in C[0,1], \\ \int_{x^2}^x f(y)dy \geq g(x)-g(x^2)}} \int_0^1 |f(x)|^2 dx \geq \inf_{\substack{f \in C[0,1], \\ \int_x^1 f(y)dy \geq g(1)-g(x)}} \int_0^1 |f(x)|^2 dx.$$

取 $f(y) = g'(y)$, 可以知道(7.80)(7.81)式等号都成立. 从而

$$\int_0^1 |g'(x)|^2 dx \geq \inf_{\substack{f \in C[0,1], \\ \int_{x^2}^x f(y)dy \geq g(x)-g(x^2)}} \int_0^1 |f(x)|^2 dx \geq \inf_{\substack{f \in C[0,1], \\ \int_x^1 f(y)dy \geq g(1)-g(x)}} \int_0^1 |f(x)|^2 dx.$$

故只须证明

$$\begin{aligned} & \inf_{\substack{f \in C[0,1], \\ \int_x^1 f(y)dy \geq g(1)-g(x)}} \int_0^1 |f(x)|^2 dx \geq \int_0^1 |g'(x)|^2 dx \\ \iff & \text{对 } \forall f \in C[0,1] \text{ 且 } \int_x^1 f(y)dy \geq g(1)-g(x), \text{ 都有 } \int_0^1 |f(x)|^2 dx \geq \int_0^1 |g'(x)|^2 dx. \end{aligned}$$

于是设 $f \in C[0,1]$ 且 $\int_x^1 f(y)dy$, 由 Cauchy 不等式得

$$\begin{aligned} \int_0^1 |g'(x)|^2 dx \int_0^1 |f(x)|^2 dx & \geq \left(\int_0^1 f(x)g'(x)dx \right)^2 = \left(\int_0^1 g'(x) \int_x^1 f(y)dy \right)^2 \\ & = \left(-g'(0) \int_0^1 f(y)dy - \int_0^1 \left(\int_x^1 f(y)dy \right) g''(x)dx \right)^2 \\ & = \left(g'(0) \int_0^1 f(y)dy + \int_0^1 \left(\int_x^1 f(y)dy \right) g''(x)dx \right)^2 \\ & \geq \left(g'(0) \int_0^1 f(y)dy + \int_0^1 (g(1)-g(x))g''(x)dx \right)^2 \\ & = \left(g'(0) \int_0^1 f(y)dy - g'(0)(g(1)-g(0)) + \int_0^1 |g'(x)|^2 dx \right)^2 \\ & \geq \left(\int_0^1 |g'(x)|^2 dx \right)^2 \end{aligned}$$

因此 $\int_0^1 |f(x)|^2 dx \geq \int_0^1 |g'(x)|^2 dx$. 这样我们就完成了证明.

□

例题 7.61 设函数 $f(x)$ 在 $[0, 1]$ 上连续, 满足对任意 $x \in [0, 1]$, 都有

1. $\int_{x^2}^x f(t)dt \geq \frac{x^2 - x^4}{2}$. 证明: $\int_0^1 f^2(x)dx \geq \frac{1}{10}$.
2. $\int_{x^2}^x f(t)dt \geq \frac{x^3 - x^6}{2}$. 证明: $\int_0^1 f^2(x)dx \geq \frac{9}{20}$.

证明

1. **证法一:** 由命题 7.13 可得

$$\inf_{\substack{f(x) \in C[0,1], \\ \int_{x^2}^x f(y)dy \geq \frac{x^2 - x^4}{2} - 0}} \int_0^1 |f(x)|^2 dx = \inf_{\substack{f(x) \in C[0,1], \\ \int_x^1 f(y)dy \geq \frac{1-x^2}{2} - 0}} \int_0^1 |f(x)|^2 dx = \frac{1}{3}$$

证法二: 注意到

$$\int_0^1 (\sqrt{t} - t) f(t)dt = \int_0^1 \left(\int_t^{\sqrt{t}} f(t)dx \right) dt = \int_0^1 \left(\int_{x^2}^x f(t)dt \right) dx \geq \int_0^1 \frac{x^2 - x^4}{2} dx = \frac{1}{15}.$$

从而待定 $a > 0$,

$$0 \leq \int_0^1 [af(x) - (\sqrt{t} - t)]^2 dx$$

$$\begin{aligned}
&= a^2 \int_0^1 f^2(x) dx - 2a \int_0^1 (\sqrt{t} - t) f(t) dt + \int_0^1 (\sqrt{t} - t)^2 dt \\
&\leq a^2 \int_0^1 f^2(x) dx - \frac{2}{15}a + \frac{1}{30}.
\end{aligned}$$

于是

$$\int_0^1 f^2(x) dx \geq \frac{2}{15a} - \frac{1}{30a^2}.$$

当 $a = 2$ 时, 上式右边取到最大值 $\frac{2}{15}$. 故

$$\int_0^1 f^2(x) dx \geq \frac{2}{15} > \frac{1}{10}.$$

证法三: 条件可得, 对 $\forall a \in (0, 1)$, 都有

$$\int_{a^{2n}}^a f(t) dt = \sum_{k=1}^n \int_{a^{2k}}^{a^{2k-1}} f(t) dt \geq \sum_{k=1}^n \frac{a^{2k} - a^{2k+1}}{2} = \frac{a^2 - a^{2n+1}}{2}.$$

于是

$$\int_0^a f(t) dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{a^{2n}}^a f(t) dt \geq \frac{a^2}{2}.$$

进而

$$\int_0^1 f(t) dt = \lim_{a \rightarrow 1^-} \int_0^a f(t) dt \geq \frac{1}{2}.$$

故由 Cauchy 不等式可得

$$\int_0^1 f^2(x) dx \geq \left(\int_0^1 f(t) dt \right)^2 \geq \frac{1}{4} > \frac{1}{10}.$$

2. 由命题 7.13 可得

$$\inf_{\substack{f(x) \in C[0,1], \\ \int_{x^2}^x f(y) dy \geq \frac{x^3 - x^6}{2} - 0}} \int_0^1 |f(x)|^2 dx = \inf_{\substack{f(x) \in C[0,1], \\ \int_x^1 f(y) dy \geq \frac{1-x^3}{2} - 0}} \int_0^1 |f(x)|^2 dx = \frac{9}{20}$$

□

例题 7.62 设 f_1, f_2, \dots, f_n 为 $[0, 1]$ 上的非负连续函数, 求证: 存在 $\xi \in [0, 1]$, 使得

$$\prod_{k=1}^n f_k(\xi) \leq \prod_{k=1}^n \int_0^1 f_k(x) dx.$$

证明 记 $a_k = \int_0^1 f_k(x) dx, k = 1, 2, \dots, n$. 若存在 $k \in \{1, 2, \dots, n\}$, 使得 $a_k = 0$, 则结论显然成立. 下设 $a_k > 0, k = 1, 2, \dots, n$.

于是由均值不等式可得

$$\int_0^1 \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n \frac{f_k(x)}{a_k}} dx \leq \int_0^1 \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{f_k(x)}{a_k} dx = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\int_0^1 f_k(x) dx}{a_k} = 1.$$

故由积分不等式知, 存在 $\xi \in [0, 1]$, 使得

$$\sqrt[n]{\prod_{k=1}^n \frac{f_k(\xi)}{a_k}} \leq 1 \iff \prod_{k=1}^n f_k(\xi) \leq \prod_{k=1}^n a_k = \prod_{k=1}^n \int_0^1 f_k(x) dx.$$

□

例题 7.63 设 $f(x)$ 在 $[0, 3]$ 是非负连续函数, 满足

$$\int_0^3 \frac{1}{1+f(x)} dx = 1,$$

证明:

$$\int_0^3 \frac{f(x)}{2+f^2(x)} dx \leq 1.$$

证明

$$\begin{aligned} \int_0^3 \left(\frac{f(x)}{2+f^2(x)} - \frac{1}{1+f(x)} \right) dx &= \int_0^3 \frac{f(x)-2}{[2+f^2(x)][1+f(x)]} dx \leq \int_0^3 \frac{f(x)-2}{2[1+f(x)]} dx \\ &= \frac{1}{2} \int_0^3 \left(1 - \frac{3}{1+f(x)} \right) dx = 0. \end{aligned}$$

□

第8章 积分计算

8.1 不定积分计算

8.1.1 直接猜原函数

计算定积分, 能直接猜出原函数, 就直接写出原函数, 然后求导验证即可.

例题 8.1 计算 $\int \frac{e^{-\sin x} \sin(2x)}{(1 - \sin x)^2} dx$.

笔记 因为 $e^{g(x)}$ 的原函数一定仍含有 $e^{g(x)}$, 并且 $\frac{1}{1 - \sin x}$ 求导后一部分是 $\frac{1}{(1 - \sin x)^2}$, 所以我们猜测原函数与 $\frac{e^{-\sin x}}{1 - \sin x}$ 有关. 因此对其求导进行尝试.

证明 注意到

$$\left(\frac{e^{-\sin x}}{1 - \sin x} \right)' = \frac{-\cos x e^{-\sin x} (1 - \sin x) + \cos x e^{-\sin x}}{(1 - \sin x)^2} = \frac{e^{-\sin x} \cos x \sin x}{(1 - \sin x)^2}.$$

故原函数为 $\frac{2e^{-\sin x}}{1 - \sin x} + C$, 其中 C 为任意常数. 求导验证:

$$\left(\frac{2e^{-\sin x}}{1 - \sin x} \right)' = \frac{e^{-\sin x} (2 \cos x \sin x)}{(1 - \sin x)^2} = \frac{e^{-\sin x} \sin 2x}{(1 - \sin x)^2}.$$

□

例题 8.2 计算 $\int \frac{1 - \ln x}{(x - \ln x)^2} dx$.

笔记 由 $(x - \ln x)^2$ 知可待定原函数 $\frac{f(x)}{x - \ln x}$, 从而猜出答案.

证明 注意到

$$\left(\frac{x}{x - \ln x} \right)' = \frac{x - \ln x - x \left(1 - \frac{1}{x} \right)}{(x - \ln x)^2} = \frac{1 - \ln x}{(x - \ln x)^2}.$$

故原函数为 $\frac{x}{x - \ln x} + C$, 其中 C 为任意常数.

□

8.1.2 换元积分

例题 8.3 设 $y(x - y)^2 = x$, 计算 $\int \frac{dx}{x - 3y}$.

笔记 令 $y = tx$, 则 $t = \frac{y}{x}$ (这里是猜测过程, t 只是中间变量, 不用考虑 x 是否取 0), 从而由条件可得

$$\begin{aligned} tx(x - tx)^2 &= x \Rightarrow tx^3(1 - t)^2 = x \\ \Rightarrow x^2 &= \frac{1}{t(1 - t)^2} \Rightarrow x = \pm \frac{1}{\sqrt{t}(1 - t)}. \end{aligned}$$

因为这里是猜测的过程(只要最后能得到一个正确的原函数即可), 不需要保证严谨性, 所以我们直接取 $x = \frac{1}{\sqrt{t}(1 - t)}$,

于是 $\begin{cases} x = \frac{1}{\sqrt{t}(1 - t)} \\ y = \frac{\sqrt{t}}{1 - t} \end{cases}$. 代入不定积分得

$$\int \frac{dx}{x - 3y} = \int \frac{dx}{x - 3y} = \int \frac{d\left(\frac{1}{\sqrt{t}(1-t)}\right)}{\frac{1}{\sqrt{t}(1-t)} - \frac{3\sqrt{t}}{1-t}}$$

$$\begin{aligned}
&= \int \frac{dt}{2(t^2 - t)} = \frac{1}{2} \int \left(\frac{1}{t-1} - \frac{1}{t} \right) dt \\
&= \frac{1}{2} \ln \left| \frac{t-1}{t} \right| + C = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\frac{y}{x} - 1}{\frac{y}{x}} \right| + C \\
&= \frac{1}{2} \ln \left| \frac{y-x}{y} \right| + C,
\end{aligned}$$

其中 C 为任意常数. 因此我们断言 $\int \frac{dx}{x-3y} = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{y-x}{y} \right| + C$.

证明 对原方程两边同时关于 x 求导得

$$y'(x-y)^2 + 2y(1-y')(x-y) = 1 \Rightarrow y' = \frac{1-2y(x-y)}{(x-y)(x-3y)}.$$

于是利用上式经过计算可得

$$\left(\frac{1}{2} \ln \left| \frac{y-x}{y} \right| + C \right)' = \frac{1}{x-3y}.$$

故 $\int \frac{dx}{x-3y} = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{y-x}{y} \right| + C$, 其中 C 为任意常数.

□

8.2 定积分

8.2.1 建立积分递推

例题 8.4 计算 $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^n x \sin(nx) dx, n \in \mathbb{N}$.

证明 利用分部积分和和差化积公式可得

$$\begin{aligned}
I_n &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^n x \sin(nx) dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^{n-1} x \cdot \cos x \sin(nx) dx \\
&= \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^{n-1} x \cdot [\sin((n+1)x) + \sin((n-1)x)] dx \\
&= \frac{I_{n-1}}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^{n-1} x [\sin(nx) \cos x + \cos(nx) \sin x] dx \\
&= \frac{I_{n-1}}{2} + \frac{I_n}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^{n-1} x \cos(nx) d \cos x \\
&= \frac{I_{n-1} + I_n}{2} - \frac{1}{2n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(nx) d \cos^n x \\
&= \frac{I_{n-1} + I_n}{2} + \frac{1}{2n} - \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^n x \sin(nx) dx \\
&= \frac{I_{n-1} + I_n}{2} + \frac{1}{2n} - \frac{I_n}{2} \\
&= \frac{I_{n-1}}{2} + \frac{1}{2n}.
\end{aligned}$$

故 $I_n = \frac{I_{n-1}}{2} + \frac{1}{2n}$, 则两边同乘 2^n (强行裂项)

$$2^n I_n = 2^{n-1} I_{n-1} + \frac{2^{n-1}}{n}, n = 1, 2, \dots$$

又注意到 $I_0 = 0$, 从而

$$2^n I_n = 0 + \sum_{k=1}^n \frac{2^{k-1}}{k} \Rightarrow I_n = \frac{1}{2^n} \sum_{k=1}^n \frac{2^{k-1}}{k}.$$

□

命题 8.1

设 $n \in \mathbb{N}$, 证明:

$$(1) \int_0^\pi \frac{\sin(nx)}{\sin x} dx = \begin{cases} 0, & n \text{ 为偶数} \\ \pi, & n \text{ 为奇数} \end{cases}.$$

$$(2) \int_0^\pi \frac{\sin^2(nx)}{\sin^2 x} dx = n\pi.$$

$$(3) \int_0^\pi \frac{\sin^2(nx)}{\sin x} dx = \sum_{k=1}^n \frac{2}{2k-1}.$$



笔记 提示: $\sin^2 x - \sin^2 y = \sin(x-y)\sin(x+y)$ (证明见 命题 A.12).

证明

$$(1) \text{ 记 } I_n = \int_0^\pi \frac{\sin(nx)}{\sin x} dx, \text{ 则}$$

$$I_{n+2} - I_n = \int_0^\pi \frac{\sin((n+2)x) - \sin(nx)}{\sin x} dx = \int_0^\pi \frac{2\cos((n+1)x)\sin x}{\sin x} dx = 2 \int_0^\pi \cos((n+1)x) dx = 0.$$

于是

$$\int_0^\pi \frac{\sin(nx)}{\sin x} dx = I_n = I_{n-2} = \dots = \begin{cases} I_0, & n \text{ 为偶数} \\ I_1, & n \text{ 为奇数} \end{cases} = \begin{cases} 0, & n \text{ 为偶数} \\ \pi, & n \text{ 为奇数} \end{cases}.$$

$$(2) \text{ 记 } I_n = \int_0^\pi \frac{\sin^2(nx)}{\sin^2 x} dx, \text{ 则}$$

$$\begin{aligned} I_{n+1} - I_n &= \int_0^\pi \frac{\sin^2((n+1)x) - \sin^2(nx)}{\sin^2 x} dx = \int_0^\pi \frac{\sin x \cdot \sin((2n+1)x)}{\sin^2 x} dx \\ &= \int_0^\pi \frac{\sin((2n+1)x)}{\sin x} dx \stackrel{\text{命题 8.1(1)}}{=} \pi. \end{aligned} \quad (8.1)$$

于是

$$\int_0^\pi \frac{\sin^2(nx)}{\sin^2 x} dx = I_n = \pi + I_{n-1} = \dots = (n-1)\pi + I_1 = n\pi.$$

$$(3) \text{ 记 } I_n = \int_0^\pi \frac{\sin^2(nx)}{\sin x} dx, \text{ 则}$$

$$\begin{aligned} I_{n+1} - I_n &= \int_0^\pi \frac{\sin^2((n+1)x) - \sin^2(nx)}{\sin x} dx = \int_0^\pi \frac{\sin x \cdot \sin((2n+1)x)}{\sin x} dx \\ &= \int_0^\pi \sin((2n+1)x) dx = \frac{1}{2n+1} \cos((2n+1)x) \Big|_0^\pi = \frac{2}{2n+1}. \end{aligned} \quad (8.2)$$

于是

$$\int_0^\pi \frac{\sin^2(nx)}{\sin x} dx = I_n = \frac{2}{2n-1} + I_{n-1} = \dots = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{2}{2k+1} + I_1 = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{2}{2k+1} = \sum_{k=1}^n \frac{2}{2k-1}.$$

□

例题 8.5 设 $a > 1$, 计算积分 $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(a^2 - \cos^2 x) dx$.

注 很多情况下不需求出被积函数的原函数, 只需充分利用换元、分部积分以及被积函数的性质, 即可求出积分的值. 见下述解法二.

解 解法一: 设 $a_0 = a > 1$. 构造数列如下:

$$a_{n+1} = 2a_n^2 - 1 \quad (n = 0, 1, \dots),$$

则由 例题 2.85 可知, 存在 $x_0 > 0$ 使得

$$a_0 = \text{ch}(x_0), \quad a_n = \text{ch}(2^n x_0),$$

其中 $\text{ch}(x) = \frac{1}{2}(\text{e}^x + \text{e}^{-x})$, 可以解得

$$x_0 = \ln \left(a_0 + \sqrt{a_0^2 - 1} \right). \quad (8.3)$$

故

$$a_n = \frac{\text{e}^{2^n x_0} + \text{e}^{-2^n x_0}}{2}.$$

设

$$I_n = \int_0^\pi \ln(a_n - \cos x) dx,$$

则

$$\begin{aligned} I_0 &= \int_0^\pi \ln(a_0 - \cos x) dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(a_0 - \cos x) dx + \int_{\frac{\pi}{2}}^\pi \ln(a_0 - \cos x) dx \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(a_0 - \cos x) dx + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(a_0 + \cos x) dx \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(a_0^2 - \cos^2 x) dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \left(a_0^2 - \frac{1 + \cos 2x}{2} \right) dx \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \left(\frac{a_1 - \cos 2x}{2} \right) dx = \frac{1}{2} \int_0^\pi \ln \left(\frac{a_1 - \cos x}{2} \right) dx = \frac{1}{2} I_1 - \frac{\pi}{2} \ln 2. \end{aligned}$$

同理, 有

$$I_n = \frac{1}{2} I_{n+1} - \frac{\pi}{2} \ln 2. \quad (8.4)$$

由此递推公式, 可得

$$I_0 = \frac{1}{2^n} I_n - \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{2^{n-1}} \right) \frac{\pi}{2} \ln 2. \quad (8.5)$$

因为

$$\begin{aligned} I_n &= \int_0^\pi \ln(a_n - \cos x) dx = \int_0^\pi \ln \left(\frac{\text{e}^{2^n x_0} + \text{e}^{-2^n x_0}}{2} - \cos x \right) dx \\ &= 2^n x_0 \pi + \int_0^\pi \ln \left(\frac{1 + \text{e}^{-2^{n+1} x_0}}{2} - \text{e}^{-2^n x_0} \cos x \right) dx, \end{aligned}$$

所以

$$\frac{1}{2^n} I_n \rightarrow x_0 \pi \quad (n \rightarrow +\infty).$$

故从式 (8.5) 可得

$$I_0 = x_0 \pi - \pi \ln 2 = \pi \ln \left(\frac{a_0 + \sqrt{a_0^2 - 1}}{2} \right),$$

即所求的积分为

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(a^2 - \sin^2 x) dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(a^2 - \cos^2 x) dx = \pi \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 - 1}}{2} \right).$$

解法二: 我们有

$$F(a) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(a^2 - \cos^2 x) dx = \int_0^\pi \ln(a - \cos x) dx.$$

由定理 8.9, 关于 a 求导得到

$$F'(a) = \int_0^\pi \frac{1}{a - \cos x} dx \xrightarrow{\text{万能公式}} \int_0^{+\infty} \frac{2}{a(1 + t^2) - (1 - t^2)} dt = \frac{\pi}{\sqrt{a^2 - 1}}, \quad a > 1.$$

因此

$$F(a) = \int_1^a F'(t) dt = \pi \ln \left(a + \sqrt{a^2 - 1} \right) + C, \quad a > 1.$$

结合

$$F(1) = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin x \, dx = -\pi \ln 2.$$

可得

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(a^2 - \cos^2 x) \, dx = \pi \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 - 1}}{2} \right), \quad a > 1.$$

□

定理 8.1 (周期函数在任意一个周期上的定积分相同)

设 f 是 \mathbb{R} 上的可积函数且周期为 $T > 0$, 则对 $\forall a \in \mathbb{R}$, 都有

$$\int_a^{a+T} f(x) \, dx = \int_0^T f(x) \, dx.$$

♡

证明 由条件可得

$$\begin{aligned} \int_a^{a+T} f(x) \, dx &= \int_a^{(\lfloor \frac{a}{T} \rfloor + 1)T} f(x) \, dx + \int_{(\lfloor \frac{a}{T} \rfloor + 1)T}^{a+T} f(x) \, dx \\ &= \int_a^{(\lfloor \frac{a}{T} \rfloor + 1)T} f(x) \, dx + \int_{\lfloor \frac{a}{T} \rfloor T}^a f(x + T) \, dx \\ &= \int_a^{(\lfloor \frac{a}{T} \rfloor + 1)T} f(x) \, dx + \int_{\lfloor \frac{a}{T} \rfloor T}^a f(x) \, dx \\ &= \int_{\lfloor \frac{a}{T} \rfloor T}^{(\lfloor \frac{a}{T} \rfloor + 1)T} f(x) \, dx \\ &= \int_0^T f\left(x + \lfloor \frac{a}{T} \rfloor T\right) \, dx. \end{aligned}$$

□

定理 8.2 (点火公式)

1. 记 $I_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n x \, dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^n x \, dx, \forall n \in \mathbb{N}$, 则

$$I_n = \frac{n-1}{n} I_{n-2}, \quad \forall n \geq 2.$$

从而

$$I_n = \begin{cases} \frac{(n-1)!!}{n!!} I_0 = \frac{(n-1)!!}{n!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & n \text{ 为偶数} \\ \frac{(n-1)!!}{n!!} I_1 = \frac{(n-1)!!}{n!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & n \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (8.6)$$

2. 记 $J(m, n) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^m x \cos^n x \, dx, \forall m, n \in \mathbb{N}$, 则

$$J(m, n) = \frac{m-1}{m+n} J(m-2, n), \quad \forall m, n \geq 2.$$

$$J(m, n) = \frac{n-1}{m+n} J(m, n-2), \quad \forall m, n \geq 2.$$

从而

$$J(m, n) = \begin{cases} \frac{(m-1)!!(n-1)!!}{(m+n)!!}, & m, n \text{ 不全为偶数} \\ \frac{(m-1)!!(n-1)!!}{(m+n)!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & m, n \text{ 全为偶数} \end{cases} \quad (8.7)$$

3.

♡

8.2.2 区间再现

定理 8.3 (区间再现恒等式)

当下述积分有意义时, 我们有

1.

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^b f(a+b-x)dx = \frac{1}{2} \int_a^b [f(x) + f(a+b-x)]dx = \int_a^{\frac{a+b}{2}} [f(x) + f(a+b-x)]dx.$$

2.

$$\int_0^\infty f(x)dx = \int_0^1 f(x)dx + \int_1^\infty f(x)dx = \int_0^1 \left[f(x) + \frac{f(\frac{1}{x})}{x^2} \right] dx.$$



笔记 注意: 倒代换具有将 $[0, 1]$ 转化为 $[1, +\infty)$ 的功能.

证明 证明是显然的.(第 1 问中最后一个等号是由轴对称得到的)



命题 8.2

证明

1. $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin x dx = -\frac{\pi}{2} \ln 2.$
2. $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \cos x dx = -\frac{\pi}{2} \ln 2.$
3. $\int_0^1 \frac{\ln(1+x)}{1+x^2} dx = \frac{\pi}{8} \ln 2.$



证明

1.

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin x dx = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \left[\ln \sin x + \ln \sin \left(\frac{\pi}{2} - x \right) \right] dx \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{4}} \ln (\cos x \sin x) dx = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \ln \frac{1}{2} dx + \int_0^{\frac{\pi}{4}} \ln (\sin 2x) dx \\ &= -\frac{\pi}{4} \ln 2 + \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin x dx = -\frac{\pi}{4} \ln 2 + \frac{1}{2} I \\ \implies I &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \cos x dx = -\frac{\pi}{2} \ln 2. \end{aligned}$$

2.

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \cos x dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin x dx = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \left[\ln \sin x + \ln \sin \left(\frac{\pi}{2} - x \right) \right] dx \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{4}} \ln (\cos x \sin x) dx = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \ln \frac{1}{2} dx + \int_0^{\frac{\pi}{4}} \ln (\sin 2x) dx \\ &= -\frac{\pi}{4} \ln 2 + \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin x dx = -\frac{\pi}{4} \ln 2 + \frac{1}{2} I \\ \implies I &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \cos x dx = -\frac{\pi}{2} \ln 2. \end{aligned}$$

3. 解法一:

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{\ln(1+x)}{1+x^2} dx &\stackrel{x=\tan \theta}{=} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{\ln(1+\tan \theta)}{1+\tan^2 \theta} d \tan \theta = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{\sec^2 \theta \cdot \ln(1+\tan \theta)}{\sec^2 \theta} d \theta \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{4}} \ln(1+\tan \theta) d \theta = \int_0^{\frac{\pi}{8}} \left[\ln(1+\tan \theta) + \ln \left(1+\tan \left(\frac{\pi}{4} - \theta \right) \right) \right] d \theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \int_0^{\frac{\pi}{8}} \left[\ln(1 + \tan \theta) + \ln \left(1 + \frac{1 - \tan \theta}{1 + \tan \theta} \right) \right] d\theta \\
&= \int_0^{\frac{\pi}{8}} \left[\ln(1 + \tan \theta) + \ln \frac{2}{1 + \tan \theta} \right] d\theta \\
&= \int_0^{\frac{\pi}{8}} \ln 2 d\theta = \frac{\pi}{8} \ln 2.
\end{aligned}$$

解法二: 考虑含参量积分

$$\varphi(\alpha) = \int_0^1 \frac{\ln(1 + \alpha x)}{1 + x^2} dx, \quad \alpha \in [0, 1].$$

显然 $\varphi(0) = 0, \varphi(1) = I$, 且函数 $\frac{\ln(1 + \alpha x)}{1 + x^2}$ 在 $R = [0, 1] \times [0, 1]$ 上满足定理 8.9 的条件, 于是

$$\varphi'(\alpha) = \int_0^1 \frac{x}{(1 + x^2)(1 + \alpha x)} dx.$$

因为

$$\frac{x}{(1 + x^2)(1 + \alpha x)} = \frac{1}{1 + \alpha^2} \left(\frac{\alpha + x}{1 + x^2} - \frac{\alpha}{1 + \alpha x} \right),$$

所以

$$\begin{aligned}
\varphi'(\alpha) &= \frac{1}{1 + \alpha^2} \left(\int_0^1 \frac{\alpha}{1 + x^2} dx + \int_0^1 \frac{x}{1 + x^2} dx - \int_0^1 \frac{\alpha}{1 + \alpha x} dx \right) \\
&= \frac{1}{1 + \alpha^2} \left[\alpha \arctan x \Big|_0^1 + \frac{1}{2} \ln(1 + x^2) \Big|_0^1 - \ln(1 + \alpha x) \Big|_0^1 \right] \\
&= \frac{1}{1 + \alpha^2} \left[\alpha \cdot \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \ln 2 - \ln(1 + \alpha) \right].
\end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned}
\int_0^1 \varphi'(\alpha) d\alpha &= \int_0^1 \frac{1}{1 + \alpha^2} \left[\frac{\pi}{4} \alpha + \frac{1}{2} \ln 2 - \ln(1 + \alpha) \right] d\alpha \\
&= \frac{\pi}{8} \ln(1 + \alpha^2) \Big|_0^1 + \frac{1}{2} \ln 2 \arctan \alpha \Big|_0^1 - \varphi(1) \\
&= \frac{\pi}{8} \ln 2 + \frac{\pi}{8} \ln 2 - \varphi(1) \\
&= \frac{\pi}{4} \ln 2 - \varphi(1).
\end{aligned}$$

另一方面,

$$\int_0^1 \varphi'(\alpha) d\alpha = \varphi(1) - \varphi(0) = \varphi(1),$$

所以 $I = \varphi(1) = \frac{\pi}{8} \ln 2$.

□

例题 8.6 计算

1. $\int_0^\infty \frac{\ln x}{x^2 + a^2} dx, a > 0$.
2. $\int_0^\infty \frac{\ln x}{x^2 + x + 1} dx$.
3. $\int_0^1 \frac{\ln x}{\sqrt{x - x^2}} dx$.

解

1. 注意到

$$\int_0^{+\infty} \frac{\ln x}{x^2 + a^2} dx \xrightarrow{x=at} \frac{1}{a} \int_0^{+\infty} \frac{\ln(at)}{1 + t^2} dt = \frac{1}{a} \int_0^{+\infty} \frac{\ln a}{1 + t^2} dt + \frac{1}{a} \int_0^{+\infty} \frac{\ln t}{1 + t^2} dt = \frac{\pi \ln a}{2a} + \frac{1}{a} \int_0^{+\infty} \frac{\ln t}{1 + t^2} dt. \quad (8.8)$$

又注意到

$$\int_0^{+\infty} \frac{\ln t}{1 + t^2} dt \xrightarrow{t=\frac{1}{x}} \int_0^{+\infty} \frac{\ln \frac{1}{x}}{1 + \frac{1}{x^2}} \frac{1}{x^2} dx = \int_0^{+\infty} \frac{-\ln x}{1 + x^2} dx \implies \int_0^{+\infty} \frac{\ln t}{1 + t^2} dt = 0.$$

于是再结合(8.8)式可得

$$\int_0^{+\infty} \frac{\ln x}{x^2 + a^2} dx = \frac{\pi \ln a}{2a}.$$

2.

$$\int_0^{\infty} \frac{\ln x}{x^2 + x + 1} dx \stackrel{x=\frac{1}{t}}{=} \int_0^{\infty} \frac{-\ln t}{1 + \frac{1}{t} + \frac{1}{t^2}} d\frac{1}{t} = \int_0^{+\infty} \frac{-\ln t}{1 + t + t^2} dt \implies \int_0^{\infty} \frac{\ln x}{x^2 + x + 1} dx = 0.$$

3.

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{\ln x}{\sqrt{x-x^2}} dx &\stackrel{x=\sin^2 y}{=} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\ln \sin^2 y}{\sqrt{\sin^2 y(1-\sin^2 y)}} d\sin^2 y \\ &= 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin y dy \stackrel{\text{命题8.2}}{=} 4 \cdot \left(-\frac{\pi}{2} \ln 2 \right) = -2\pi \ln 2. \end{aligned}$$

□

例题 8.7

1. 对 $n \in \mathbb{N}$, 计算 $\int_{-\pi}^{\pi} \frac{\sin(nx)}{(1+2^x)\sin x} dx$.

2. $\int_{-\pi}^{\pi} \frac{x \sin x \arctan e^x}{1+\cos^2 x} dx$.

3. 对 $n \in \mathbb{N}$, 计算 $\int_0^{2\pi} \sin(\sin x + nx) dx$.

解

1.

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\sin(nx)}{(1+2^x)\sin x} dx &= \int_{-\pi}^0 \left[\frac{\sin(nx)}{(1+2^x)\sin x} + \frac{\sin(nx)}{(1+2^{-x})\sin x} \right] dx = \int_{-\pi}^0 \frac{\sin(nx)}{\sin x} \left(\frac{1}{1+2^x} + \frac{1}{1+2^{-x}} \right) dx \\ &= \int_{-\pi}^0 \frac{\sin(nx)}{\sin x} \cdot \frac{2+2^x+2^{-x}}{2+2^x+2^{-x}} dx = \int_{-\pi}^0 \frac{\sin(nx)}{\sin x} dx = \int_0^{\pi} \frac{\sin(nx)}{\sin x} dx \stackrel{\text{例题8.1}}{=} \begin{cases} 0, n \text{ 为偶数} \\ \pi, n \text{ 为奇数} \end{cases}. \end{aligned}$$

2.

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{x \sin x \arctan e^x}{1+\cos^2 x} dx &= \int_{-\pi}^0 \left(\frac{x \sin x \arctan e^x}{1+\cos^2 x} + \frac{x \sin x \arctan e^{-x}}{1+\cos^2 x} \right) dx = \int_{-\pi}^0 \frac{x \sin x}{1+\cos^2 x} (\arctan e^x + \arctan e^{-x}) dx \\ &\stackrel{\text{命题A.4(1)}}{=} \int_{-\pi}^0 \frac{x \sin x}{1+\cos^2 x} \cdot \frac{\pi}{2} dx = \frac{\pi}{2} \int_0^{\pi} \frac{x \sin x}{1+\cos^2 x} dx \\ &= \frac{\pi}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{x \sin x}{1+\cos^2 x} + \frac{(\pi-x) \sin x}{1+\cos^2 x} \right) dx = \frac{\pi^2}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin x}{1+\cos^2 x} dx \\ &= \frac{\pi^2}{2} \arctan \cos x \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{\pi}{4} = \frac{\pi^3}{8}. \end{aligned}$$

3.

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \sin(\sin x + nx) dx &= \int_0^{2\pi} \sin[\sin(2\pi-x) + n(2\pi-x)] dx \\ &= \int_0^{2\pi} \sin(-\sin x - nx) dx = - \int_0^{2\pi} \sin(\sin x + nx) dx \\ &\implies \int_0^{2\pi} \sin(\sin x + nx) dx = 0. \end{aligned}$$

□

例题 8.8 计算 $\int_0^{+\infty} \frac{dx}{(1+x^2)(1+x^{2019})}$.

解

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} \frac{dx}{(1+x^2)(1+x^{2019})} &= \int_0^{+\infty} \frac{dx}{(1+x^2)(1+x^{2019})} \\ &\stackrel{t=\frac{1}{x}}{=} \int_0^{+\infty} \frac{t^{2019} dt}{(1+t^2)(1+t^{2019})} = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{(1+x^{2019}) dx}{(1+x^2)(1+x^{2019})} \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{dx}{1+x^2} = \frac{\pi}{4}.$$

□

8.2.3 Frullani(傅汝兰尼) 积分

定理 8.4 (Frullani(傅汝兰尼) 积分)

设 $f \in C(0, +\infty)$.

1. 若存在极限

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x), \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x), \quad (8.9)$$

则对 $a, b > 0$ 有

$$\int_0^\infty \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx = \left[\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) - \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \right] \ln \frac{b}{a}.$$

2. 若存在极限和积分

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \alpha, \int_A^\infty \frac{f(x)}{x} dx. \quad (8.10)$$

则对 $a, b > 0$, 有

$$\int_0^\infty \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx = \alpha \ln \frac{b}{a}.$$

3. 若存在极限和积分

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \alpha, \int_0^1 \frac{f(x)}{x} dx. \quad (8.11)$$

则对 $a, b > 0$, 有

$$\int_0^\infty \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx = \alpha \ln \frac{a}{b}.$$

4. 若 f 是周期 $T > 0$ 函数且 $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x)$ 存在, 则对 $a, b > 0$ 有

$$\int_0^\infty \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx = \left[\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) - \frac{1}{T} \int_0^T f(x) dx \right] \ln \frac{b}{a}.$$

5. 若 f 满足 $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x), \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \int_0^x f(y) dy$ 存在, 则对 $a, b > 0$ 有

$$\int_0^\infty \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx = \left[\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) - \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \int_0^x f(y) dy \right] \ln \frac{b}{a}.$$



笔记 傅汝兰尼积分有诸多变种, 无需记忆具体表达式, 知道有大概这么一个东西即可.

证明 不妨设 $b > a$.

1. 给定 $A > \delta > 0$, 考虑

$$\begin{aligned} \int_\delta^A \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx &= \int_\delta^A \frac{f(ax)}{x} dx - \int_\delta^A \frac{f(bx)}{x} dx \\ &= \int_{a\delta}^{aA} \frac{f(x)}{x} dx - \int_{b\delta}^{bA} \frac{f(x)}{x} dx \\ &= \int_{bA}^{aA} \frac{f(x)}{x} dx - \int_{b\delta}^{a\delta} \frac{f(x)}{x} dx \\ &\xrightarrow{\text{积分中值定理}} f(\theta_1) \int_{bA}^{aA} \frac{1}{x} dx - f(\theta_2) \int_{b\delta}^{a\delta} \frac{1}{x} dx, \end{aligned}$$

这里 $\theta_1 \in (aA, bA), \theta_2 \in (a\delta, b\delta)$, 于是让 $A \rightarrow +\infty, \delta \rightarrow 0^+$, 由(8.9), 我们知

$$\int_0^\infty \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx = \left[\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) - \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \right] \ln \frac{b}{a}.$$

2. 给定 $A > \delta > 0$, 考虑

$$\begin{aligned} \int_{\delta}^A \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx &= \int_{\delta}^A \frac{f(ax)}{x} dx - \int_{\delta}^A \frac{f(bx)}{x} dx \\ &= \int_{a\delta}^{aA} \frac{f(x)}{x} dx - \int_{b\delta}^{bA} \frac{f(x)}{x} dx \\ &= \int_{bA}^{aA} \frac{f(x)}{x} dx - \int_{b\delta}^{a\delta} \frac{f(x)}{x} dx \\ &\xrightarrow{\text{积分中值定理}} \int_{bA}^{aA} \frac{f(x)}{x} dx - f(\theta) \int_{b\delta}^{a\delta} \frac{1}{x} dx, \end{aligned}$$

这里 $\theta \in (a\delta, b\delta)$, 于是让 $A \rightarrow +\infty, \delta \rightarrow 0^+$, 由(8.10), 我们知

$$\int_0^\infty \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx = \alpha \ln \frac{b}{a}.$$

3. 给定 $A > \delta > 0$, 考虑

$$\begin{aligned} \int_{\delta}^A \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx &= \int_{\delta}^A \frac{f(ax)}{x} dx - \int_{\delta}^A \frac{f(bx)}{x} dx \\ &= \int_{a\delta}^{aA} \frac{f(x)}{x} dx - \int_{b\delta}^{bA} \frac{f(x)}{x} dx \\ &= \int_{bA}^{aA} \frac{f(x)}{x} dx - \int_{b\delta}^{a\delta} \frac{f(x)}{x} dx \\ &\xrightarrow{\text{积分中值定理}} f(\theta) \int_{bA}^{aA} \frac{1}{x} dx - \int_{b\delta}^{a\delta} \frac{f(x)}{x} dx, \end{aligned}$$

这里 $\theta \in (aA, bA)$, 于是让 $A \rightarrow +\infty, \delta \rightarrow 0^+$, 由(8.11), 我们知

$$\int_0^\infty \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx = \alpha \ln \frac{a}{b}.$$

4. 给定 $A > \delta > 0$, 考虑

$$\begin{aligned} \int_{\delta}^A \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx &= \int_{\delta}^A \frac{f(ax)}{x} dx - \int_{\delta}^A \frac{f(bx)}{x} dx \\ &= \int_{a\delta}^{aA} \frac{f(x)}{x} dx - \int_{b\delta}^{bA} \frac{f(x)}{x} dx \\ &= \int_{bA}^{aA} \frac{f(x)}{x} dx - \int_{b\delta}^{a\delta} \frac{f(x)}{x} dx \\ &\xrightarrow{\text{积分中值定理}} \int_{bA}^{aA} \frac{f(x)}{x} dx - f(\theta) \int_{b\delta}^{a\delta} \frac{1}{x} dx \\ &= \int_b^a \frac{f(Ax)}{x} dx - f(\theta) \int_{b\delta}^{a\delta} \frac{1}{x} dx, \end{aligned}$$

这里 $\theta \in (a\delta, b\delta)$. 现在

$$\lim_{\delta \rightarrow 0^+} \left(-f(\theta) \int_{b\delta}^{a\delta} \frac{1}{x} dx \right) = \lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) \ln \frac{b}{a}.$$

由Riemann引理, 我们有

$$\lim_{A \rightarrow +\infty} \int_b^a \frac{f(Ax)}{x} dx = \int_b^a \frac{1}{x} dx \cdot \frac{1}{T} \int_0^T f(x) dx = -\frac{1}{T} \int_0^T f(x) dx \cdot \ln \frac{b}{a},$$

这就证明了

$$\int_0^\infty \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx = \left[\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) - \frac{1}{T} \int_0^T f(x) dx \right] \ln \frac{b}{a}.$$

5. 上一问证明中把使用的Riemann引理用平均值极限版本的Riemann引理代替即可.

□

8.2.4 化成多元累次积分(换序)

命题 8.3

证明:

$$(1) \int_0^\infty e^{-x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}.$$

$$(2) \int_0^\infty \frac{\sin x}{x} dx = \frac{\pi}{2}.$$

$$(3) \int_0^{+\infty} \frac{\sin^2 x}{x^2} dx = \frac{\pi}{2}.$$

$$(4) \int_0^\infty \sin x^2 dx, \int_0^\infty \cos x^2 dx = \sqrt{\frac{\pi}{8}}.$$

笔记 本结果可以直接使用.

证明

(1) 注意到

$$\begin{aligned} \left(\int_0^{+\infty} e^{-x^2} dx \right)^2 &= \left(\int_0^{+\infty} e^{-x^2} dx \right) \left(\int_0^{+\infty} e^{-y^2} dy \right) \xrightarrow{\text{把 } \int_0^{+\infty} e^{-y^2} dy \text{ 看作常数}} \int_0^{+\infty} e^{-x^2} \left(\int_0^{+\infty} e^{-y^2} dy \right) dy \\ &\xrightarrow{\text{把 } e^{-x^2} \text{ 看作常数}} \int_0^{+\infty} \left(\int_0^{+\infty} e^{-(x^2+y^2)} dx \right) dy \xrightarrow{e^{-(x^2+y^2)} \text{ 连续}} \iint_{R^2} e^{-(x^2+y^2)} dx dy \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_0^{+\infty} r e^{-r^2} dr = \frac{\pi}{2} \int_0^{+\infty} r e^{-r^2} dr \\ &= \frac{\pi}{4} \int_0^{+\infty} e^{-r^2} dr^2 = \frac{\pi}{4}. \end{aligned}$$

故 $\int_0^\infty e^{-x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$.

(2) 注意到

$$\int_0^{+\infty} \sin x e^{-yx} dx = \operatorname{Im} \int_0^{+\infty} e^{ix-yx} dx = \operatorname{Im} \int_0^{+\infty} e^{-(y-i)x} dx = \operatorname{Im} \frac{1}{y-i} = \operatorname{Im} \frac{y+i}{y^2+1} = \frac{1}{y^2+1}.$$

因此就有

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} \frac{\sin x}{x} dx &= \int_0^{+\infty} \sin x \left(\int_0^{+\infty} e^{-yx} dy \right) dx = \int_0^{+\infty} dy \int_0^{+\infty} \sin x e^{-yx} dx \\ &= \int_0^{+\infty} dy \left(\operatorname{Im} \int_0^{+\infty} e^{ix-yx} dx \right) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{y^2+1} dy = \frac{\pi}{2}. \end{aligned}$$

当然本题也可以直接利用分部积分计算 $\int_0^{+\infty} \sin x e^{-yx} dx = \frac{1}{y^2+1}$.

(3) 由分部积分可得

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} \frac{\sin^2 x}{x^2} dx &= \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{1 - \cos 2x}{x^2} dx = -\frac{1}{2} \int_0^{+\infty} (1 - \cos 2x) d\frac{1}{x} \\ &= \frac{1}{2} \frac{1 - \cos x}{x^2} \Big|_{+\infty}^0 + \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{2 \sin 2x}{x} dx \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{\sin x}{x} dx \xrightarrow{\text{命题 8.3(2)}} \frac{\pi}{2}. \end{aligned}$$

(4) 注意到

$$\int_0^{+\infty} e^{-ax^2} dx \xrightarrow{x=\frac{t}{\sqrt{a}}} \frac{1}{\sqrt{a}} \int_0^{+\infty} e^{-t^2} dt = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}}, \quad a > 0.$$

并且 $-i = e^{-\frac{\pi}{2}i}$, 从而 $\sqrt{-i} = e^{-\frac{\pi}{4}i} = \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2}i$. 于是

$$\int_0^{+\infty} (\cos x^2 - i \sin x^2) dx = \int_0^{+\infty} e^{-ix^2} dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{i}} = \frac{1}{2} \sqrt{-i\pi}$$

$$= \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2}i \right) = \frac{\sqrt{2\pi}}{4} - \frac{\sqrt{2\pi}}{4}i.$$

故

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} \cos x^2 dx &= \operatorname{Re} \int_0^{+\infty} (\cos x^2 - i \sin x^2) dx = \operatorname{Re} \left(\frac{\sqrt{2\pi}}{4} - \frac{\sqrt{2\pi}}{4}i \right) = \frac{\sqrt{2\pi}}{4} = \sqrt{\frac{\pi}{8}}, \\ \int_0^{+\infty} \sin x^2 dx &= \operatorname{Im} \int_0^{+\infty} (\cos x^2 - i \sin x^2) dx = \operatorname{Im} \left(\frac{\sqrt{2\pi}}{4} - \frac{\sqrt{2\pi}}{4}i \right) = \frac{\sqrt{2\pi}}{4} = \sqrt{\frac{\pi}{8}}. \end{aligned}$$

□

例题 8.9 计算 $\int_0^1 \sin \ln \frac{1}{x} \cdot \frac{x^b - x^a}{\ln x} dx$ ($b > a > 0$).

证明

$$\begin{aligned} \int_0^1 \sin \ln \frac{1}{x} \cdot \frac{x^b - x^a}{\ln x} dx &= \int_0^1 \sin \ln \frac{1}{x} \left(\int_a^b x^y dy \right) dx = \int_a^b dy \int_0^1 x^y \sin \ln \frac{1}{x} dx \\ &\stackrel{x=e^{-t}}{=} \int_a^b dy \int_{+\infty}^0 e^{-ty} \sin t dt e^{-t} = \int_a^b dy \int_0^{+\infty} e^{-t(y+1)} \sin t dt \\ &\stackrel{\text{命题 8.3(2) 的证明过程}}{=} \int_a^b \frac{1}{1+(y+1)^2} dy = \arctan(b+1) - \arctan(a+1). \end{aligned}$$

□

8.2.5 化成含参积分 (求导)

例题 8.10 设 $a, b \geq 0$ 且不全为 0, 计算 $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(a^2 \cos^2 x + b^2 \sin^2 x) dx$.

注 实际上, 根据 $a > b$ 时得到的结果, 可以看出 $F(a, b) = \pi \ln \frac{a+b}{2}$ 对 a, b 有轮换对称性, 故这个结果对其他情况显然也成立.

证明 设 $F(a, b) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(a^2 \cos^2 x + b^2 \sin^2 x) dx$, 当 $a > b$ 时, 则

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial b} F(a, b) &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\partial}{\partial b} \ln(a^2 \cos^2 x + b^2 \sin^2 x) dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2b \sin^2 x}{a^2 \cos^2 x + b^2 \sin^2 x} dx \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2b \tan^2 x}{a^2 + b^2 \tan^2 x} dx = \int_0^{+\infty} \frac{2bt^2}{(a^2 + b^2 t^2)(1+t^2)} dt \\ &= \frac{1}{a^2 - b^2} \int_0^{+\infty} \left(\frac{2a^2 b}{a^2 + b^2 t^2} - \frac{2b}{1+t^2} \right) dt \\ &= \frac{1}{a^2 - b^2} \int_0^{+\infty} \frac{2a^2 b}{a^2 + b^2 t^2} dt - \frac{2b}{a^2 - b^2} \int_0^{+\infty} \frac{1}{1+t^2} dt \\ &= \frac{2b}{a^2 - b^2} \int_0^{+\infty} \frac{1}{1 + \left(\frac{b}{a}t\right)^2} dt - \frac{b\pi}{a^2 - b^2} \\ &= \frac{2b}{a^2 - b^2} \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{\pi}{2} - \frac{b\pi}{a^2 - b^2} = \frac{\pi}{a+b}. \end{aligned}$$

于是

$$\begin{aligned} F(a, b) &= F(a, 0) + \int_0^b \frac{\partial}{\partial b'} F(a, b') db' = F(a, 0) + \int_0^b \frac{\pi}{a+b'} db' \\ &= 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(a \cos x) dx + \pi \ln \frac{a+b}{a} \stackrel{\text{例题 8.2}}{=} \pi \ln \frac{a+b}{2}. \end{aligned}$$

当 $a < b$ 时, 类似可得 $F(a, b) = \pi \ln \frac{a+b}{2}$. 当 $a = b$ 时, $F(a, b) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln a^2 dx = \pi \ln a = \pi \ln \frac{a+b}{2}$.

综上, 对 $\forall a, b \geq 0$, 都有 $F(a, b) = \pi \ln \frac{a+b}{2}$.

□

8.2.6 级数展开方法

积分和求和换序 $\sum_{n=1}^{\infty} \int_a^b f_n(x)dx = \int_a^b \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)dx$, 等价于
 $\lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^m \int_a^b f_n(x)dx = \int_a^b \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)dx.$

又由于有限和随意交换, 因此上式等价于

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \int_a^b \sum_{n=1}^m f_n(x)dx = \int_a^b \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)dx,$$

于是

$$\sum_{n=1}^{\infty} \int_a^b f_n(x)dx = \int_a^b \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)dx \iff \lim_{m \rightarrow \infty} \int_a^b \sum_{n=m+1}^{\infty} f_n(x)dx = 0.$$

例题 8.11 计算 $\int_0^{\infty} \frac{x}{1+e^x} dx$.

解 由于

$$\frac{1}{1+x} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^n, \quad 0 < x < 1.$$

并且 $0 < e^{-x} < 1$, 故

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} \frac{x}{1+e^x} dx &= \int_0^{+\infty} \frac{xe^{-x}}{1+e^{-x}} dx = \int_0^{+\infty} x \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n e^{-(n+1)x} dx \\ &\stackrel{\text{换序}}{=} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \int_0^{+\infty} xe^{-(n+1)x} dx = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n+1)^2} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n)^2}. \end{aligned} \tag{8.12}$$

又因为 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}$, 所以

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n)^2} &= \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{24}, \\ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n)^2} = \frac{\pi^2}{8}. \end{aligned}$$

故

$$\int_0^{+\infty} \frac{x}{1+e^x} dx = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n)^2} = \frac{\pi^2}{8} - \frac{\pi^2}{24} = \frac{\pi^2}{12}.$$

下面证明(8.12)式换序成立, 等价于证明 $\lim_{m \rightarrow +\infty} \int_0^{+\infty} \sum_{n=m}^{\infty} x(-1)^n e^{-(n+1)x} dx = 0$. 由交错级数不等式及 $xe^{-(n+1)x}$ 关于 n 非负递减, 对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 都有

$$\int_0^{+\infty} \left| \sum_{n=m}^{\infty} x(-1)^n e^{-(n+1)x} \right| dx \leq \int_0^{+\infty} xe^{-(m+1)x} dx = -\frac{xe^{-(m+1)x}}{m+1} \Big|_0^{+\infty} + \frac{1}{m+1} \int_0^{+\infty} e^{-(m+1)x} dx = \frac{1}{(m+1)^2}.$$

令 $m \rightarrow +\infty$, 得 $\lim_{m \rightarrow +\infty} \int_0^{+\infty} \sum_{n=m}^{\infty} x(-1)^n e^{-(n+1)x} dx = 0$. 故(8.12)式换序成立. □

命题 8.4

证明:

$$(1) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q^n \sin(nx)}{n} = \arctan \frac{q \sin x}{1 - q \cos x}, |q| \leq 1.$$

$$(2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q^n \cos(nx)}{n} = -\frac{1}{2} \ln(1 + q^2 - 2q \cos x), |q| \leq 1.$$

$$(3) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q^n \cos(nx)}{n!} = e^{q \cos x} \cos(q \sin x) - 1, |q| \leq 1, x \in \mathbb{R}.$$

$$(4) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q^n \sin(nx)}{n!} = e^{q \cos x} \sin(q \sin x), |q| \leq 1, x \in \mathbb{R}.$$

笔记 在 \mathbb{C} 上,

$$\operatorname{Ln} z = \ln |z| + i(\arg z + 2k\pi), k \in \mathbb{Z}.$$

我们定义主值支

$$\ln z = \ln |z| + i \arg z.$$

本部分内容无需记忆, 只需要大概有个可以算的感觉即可, 实际做题中可以围绕这种级数给出构造.

证明 \Im 表示取虚部, \Re 表示取实部.

(1) 利用欧拉公式有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q^n \sin(nx)}{n} &= \Im \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{q^n e^{inx}}{n} \right) = \Im \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(qe^{ix})^n}{n} \right) = \Im(-\ln(1 - qe^{ix})) \\ &= -\Im \left(\ln |1 - qe^{ix}| + i \frac{-q \sin x}{1 - q \cos x} \right) = \arctan \frac{q \sin x}{1 - q \cos x}. \end{aligned}$$

(2) 利用欧拉公式有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q^n \cos(nx)}{n} &= -\Re \left(\ln |1 - qe^{ix}| + i \frac{-q \sin x}{1 - q \cos x} \right) = -\frac{1}{2} \ln [(1 - q \cos x)^2 + q^2 \sin^2 x] \\ &= -\frac{1}{2} \ln(1 + q^2 - 2q \cos x). \end{aligned}$$

(3) 利用欧拉公式有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q^n \cos(nx)}{n!} &= \Re \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(qe^{ix})^n}{n!} \right) = \Re \left(e^{qe^{ix}} - 1 \right) = \Re \left(e^{q \cos x + iq \sin x} - 1 \right) \\ &= \Re \left(e^{q \cos x} \cos(q \sin x) - 1 + ie^{q \cos x} \sin(q \sin x) \right) \\ &= e^{q \cos x} \cos(q \sin x) - 1. \end{aligned}$$

(4) 利用 (3) 有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q^n \sin(nx)}{n!} &= \Im \left(e^{q \cos x} \cos(q \sin x) - 1 + ie^{q \cos x} \sin(q \sin x) \right) \\ &= e^{q \cos x} \sin(q \sin x). \end{aligned}$$

□

例题 8.12 计算

$$1. \int_0^{2\pi} e^{\cos x} \cos(\sin x) dx.$$

$$2. \int_0^{\pi} \ln(1 - 2a \cos x + a^2) dx, a \in (0, +\infty) \setminus \{1\}.$$

注 由 1 的证明可得

$$e^{\cos x} \cos(\sin x) = \operatorname{Re} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(e^{ix})^n}{n!} \right) = \operatorname{Re} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{inx}}{n!} \right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos(nx)}{n!}.$$

实际上, 上式就是命题 8.4(3) 的结论.

注 第 2 问也可以用含参积分求导的方法进行计算 (这个方法更容易想到).

证明

1.

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} e^{\cos x} \cos(\sin x) dx &= \operatorname{Re} \left(\int_0^{2\pi} e^{\cos x} e^{i \sin x} dx \right) = \operatorname{Re} \left(\int_0^{2\pi} e^{\cos x + i \sin x} dx \right) \\ &= \operatorname{Re} \left(\int_0^{2\pi} e^{ix} dx \right) = \operatorname{Re} \left[\int_0^{2\pi} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(e^{ix})^n}{n!} dx \right] = \operatorname{Re} \left[\sum_{n=0}^{+\infty} \int_0^{2\pi} \frac{(e^{ix})^n}{n!} dx \right] \\ &= \operatorname{Re} \left(\sum_{n=0}^{+\infty} \int_0^{2\pi} \frac{e^{inx}}{n!} dx \right) = \operatorname{Re} \left(\int_0^{2\pi} \frac{e^{i \cdot 0 \cdot x}}{n!} dx + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{e^{2\pi i x} - 1}{in \cdot n!} \right) \\ &= \operatorname{Re} \left(\int_0^{2\pi} 1 dx + 0 \right) = 2\pi. \end{aligned}$$

2. 注意到当 $a \in (0, 1)$ 时, 有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^n \cos(nx)}{n} &= \operatorname{Re} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(ae^{ix})^n}{n} \right] = -\operatorname{Re} [\ln(1 - ae^{ix})] \\ &= -\operatorname{Re} [\ln |1 - ae^{ix}| + i \arg(1 - ae^{ix})] = -\ln |1 - ae^{ix}| \\ &= -\ln |(1 - a \cos x) + ai \sin x| = -\frac{1}{2} \ln(1 + a^2 - 2a \cos x). \end{aligned}$$

于是当 $a \in (0, 1)$ 时, 就有

$$\int_0^{\pi} \ln(1 - 2a \cos x + a^2) dx = -\frac{1}{2} \int_0^{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^n \cos(nx)}{n} dx = 0.$$

若 $a > 1$, 则 $\frac{1}{a} \in (0, 1)$, 从而此时我们有

$$\int_0^{\pi} \ln(1 - 2a \cos x + a^2) dx = \pi \ln a^2 + \int_0^{\pi} \ln \left(\frac{1}{a^2} - \frac{2}{a} \cos x + 1 \right) dx = \pi \ln a^2 = 2\pi \ln a.$$

又由 $\ln(1 - 2a \cos x + a^2)$ 关于 a 的偏导存在可知 $\int_0^{\pi} \ln(1 - 2a \cos x + a^2) dx$ 关于 a 连续. 于是由

$$\int_0^{\pi} \ln(1 - 2a \cos x + a^2) dx = 2\pi \ln a, \quad \forall a > 1.$$

可知当 $a = 1$ 时, 我们有

$$\int_0^{\pi} \ln(2 - 2 \cos x) dx = \lim_{a \rightarrow 1^+} \int_0^{\pi} \ln(1 - 2a \cos x + a^2) dx = \lim_{a \rightarrow 1^+} (2\pi \ln a) = 0.$$

□

定义 8.1 (多重对数函数-Li₂ 函数)

定义

$$\operatorname{Li}_2(x) \triangleq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n^2}, \quad x \in [-1, 1].$$

♣

命题 8.5

$$(1) \quad \text{Li}_2(x) + \text{Li}_2(1-x) = \frac{\pi^2}{6} - \ln x \cdot \ln(1-x), x \in (0, 1).$$

$$(2) \quad \text{Li}_2(1) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}, \quad \text{Li}_2(0) = 0, \quad \text{Li}_2\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\pi^2}{12} - \frac{1}{2} \ln^2 \frac{1}{2}.$$



证明

(1) 记 $f(x) \triangleq \text{Li}_2(x), F(x) \triangleq f(x) + f(1-x) + \ln x \ln(1-x)$. 则

$$f''(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{n-1}}{n} = -\frac{1}{x} \ln(1-x).$$

于是

$$F'(x) = -\frac{1}{x} \ln(1-x) + \frac{\ln x}{1-x} - \frac{\ln x}{1-x} + \frac{\ln(1-x)}{x} = 0.$$

$$\text{故 } F(x) \equiv F(1) = f(0) + f(1) = 0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}.$$

(2) 显然 $\text{Li}_2(1) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}, \text{Li}_2(0) = 0$. 由 (1) 可得

$$\text{Li}_2\left(\frac{1}{2}\right) + \text{Li}_2\left(\frac{1}{2}\right) = 2\text{Li}_2\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\pi^2}{6} - \ln^2 \frac{1}{2} \implies \text{Li}_2\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\pi^2}{12} - \frac{1}{2} \ln^2 \frac{1}{2}.$$

□

例题 8.13 计算 $\int_0^{\frac{1}{2}} \frac{\ln x}{1-x} dx$.

解

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{1}{2}} \frac{\ln x}{1-x} dx &= \int_{\frac{1}{2}}^1 \frac{\ln(1-x)}{x} dx = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \int_{\frac{1}{2}}^1 x^{n-1} dx \\ &= -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n n^2} = -\frac{\pi^2}{6} + \text{Li}_2\left(\frac{1}{2}\right) \\ &\stackrel{\text{命题 8.5}}{=} -\frac{\pi^2}{12} - \frac{1}{2} \ln^2 \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

□

8.2.7 重积分计算

定理 8.5 (二重积分换序)

证明:

$$\int_a^b dx \int_a^x f(x, y) dy = \int_a^b dy \int_y^b f(x, y) dx, \quad (10)$$

其中 $f(x, y)$ 是在由直线 $y = a, x = b, y = x$ 所围成的三角形 (Δ) 上连续的任意函数.

♡

证明

□

命题 8.6

设 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 试证: 对任意 $x \in (a, b)$, 有

$$\int_a^x dx_1 \int_a^{x_1} dx_2 \cdots \int_a^{x_n} f(x_{n+1}) dx_{n+1} = \frac{1}{n!} \int_a^x (x-y)^n f(y) dy, \quad n = 1, 2, \dots$$

◆

证明 当 $n = 1$ 时, 由二重积分换序可知

$$\int_a^x dx_1 \int_a^{x_1} f(x_2) dx_2 = \int_a^x dx_2 \int_{x_2}^x f(x_2) dx_1 = \int_a^x (x - x_2) f(x_2) dx_2 = \int_a^x (x - y) f(y) dy.$$

设原结论对 $n = k - 1$ 的情形成立, 考虑 $n = k$ 的情形, 由归纳假设可知

$$\int_a^{x_1} dx_1 \cdots \int_a^{x_k} f(x_{k+1}) dx_{k+1} = \frac{1}{(k-1)!} \int_a^{x_1} (x_1 - y)^{k-1} f(y) dy.$$

于是再利用二重积分换序得

$$\begin{aligned} \int_a^x dx_1 \int_a^{x_1} dx_2 \cdots \int_a^{x_k} f(x_{k+1}) dx_{k+1} &= \frac{1}{(k-1)!} \int_a^x dx_1 \int_a^{x_1} (x_1 - y)^{k-1} f(y) dy \\ &= \frac{1}{(k-1)!} \int_a^x dy \int_y^x (x_1 - y)^{k-1} f(y) dx_1 \\ &= \frac{1}{k!} \int_a^x (x - y)^k f(y) dy. \end{aligned}$$

故由数学归纳法知原结论成立. \square

例题 8.14 求定义在星形区域 $D = \{(x, y) \mid x^{\frac{2}{3}} + y^{\frac{2}{3}} \leq 1\}$ 上满足 $f(1, 0) = 1$ 的正值连续函数 f 使得 $\iint_D \frac{f(x, y)}{f(y, x)} dx dy$

达到最小, 并求出这个最小值.

解 对积分 $I = \iint_D \frac{f(x, y)}{f(y, x)} dx dy$ 作变换 $x \rightarrow y, y \rightarrow x$, 由 D 的对称性, 知 $I = \iint_D \frac{f(y, x)}{f(x, y)} dx dy$. 因而由均值不等式可得

$$I = \frac{1}{2} \iint_D \left(\frac{f(x, y)}{f(y, x)} + \frac{f(y, x)}{f(x, y)} \right) dx dy \geq \iint_D 1 dx dy = \sigma(D),$$

这里 $\sigma(D)$ 是 D 的面积.

$$I - \sigma(D) = \frac{1}{2} \iint_D \left(\sqrt{\frac{f(x, y)}{f(y, x)}} - \sqrt{\frac{f(y, x)}{f(x, y)}} \right)^2 dx dy \geq 0.$$

$I = \sigma(D)$ 当且仅当 $f(x, y) = f(y, x)$. 故所求函数为所有满足 $f(x, y) = f(y, x)$ 及 $f(1, 0) = 1$ 的连续正值函数.

D 的边界的参数方程为

$$x = \cos^3 \varphi, \quad y = \sin^3 \varphi \quad (0 \leq \varphi \leq 2\pi),$$

故 I 的最小值为

$$\begin{aligned} \sigma(D) &= \iint_D 1 dx dy = 4 \iint_{\substack{0 \leq r \leq 1 \\ 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}}} 3r \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi dr d\varphi \\ &= 6 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi d\varphi = \frac{3}{8}\pi. \end{aligned}$$

所以所求最小值是 $\frac{3}{8}\pi$, 且当 $f(x, y) = f(y, x)$ 并满足 $f(1, 0) = 1$ 时, 取到该最小值. \square

例题 8.15 求证: $\iint_{[0,1]^2} (xy)^{xy} dx dy = \int_0^1 t^t dt$.

证明 首先化为累次积分

$$\iint_{[0,1]^2} (xy)^{xy} dx dy = \int_0^1 dx \int_0^1 (xy)^{xy} dy = \int_0^1 dx \int_0^x \frac{t^t}{x} dt = \int_0^1 \frac{f(x)}{x} dx,$$

其中 $f(x) = \int_0^x t^t dt$. 由分部积分,

$$\int_0^1 \frac{f(x)}{x} dx = f(x) \ln x \Big|_0^1 - \int_0^1 x^x \ln x dx = - \int_0^1 x^x \ln x dx.$$

因为 $(x^x)' = x^x \ln x + x^x$, 所以

$$\int_0^1 x^x \ln x \, dx = \int_0^1 ((x^x)' - x^x) \, dx = - \int_0^1 x^x \, dx.$$

于是

$$\iint_{[0,1]^2} (xy)^{xy} \, dx \, dy = \int_0^1 t^t \, dt.$$

□

例题 8.16 计算二重积分 $I = \iint_D \operatorname{sgn}(x^2 - y^2 + 2) \, dx \, dy$, 其中 $D = \{(x, y) \mid x^2 + y^2 \leq 4\}$.

解 设 D 在第一象限部分为 D_1 , 则由对称性

$$I = 4 \iint_{D_1} \operatorname{sgn}(x^2 - y^2 + 2) \, dx \, dy.$$

设 D_2 是 D_1 中使得 $x^2 - y^2 + 2 < 0$ 的部分, D_3 是 D_1 中使得 $x^2 - y^2 + 2 \geq 0$ 的部分, 则 $D_1 = D_2 \cup D_3$. 因此

$$\begin{aligned} I &= 4 \left[\iint_{D_3} \, dx \, dy - \iint_{D_2} \, dx \, dy \right] = 4[\sigma(D_3) - \sigma(D_2)] \\ &= 4 \left[\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 2^2 - 2\sigma(D_2) \right] = 4\pi - 8\sigma(D_2), \end{aligned}$$

其中 $\sigma(D_2), \sigma(D_3)$ 分别表示 D_2 和 D_3 的面积. 在极坐标 $x = r \cos \varphi, y = r \sin \varphi$ 之下, D_2 为

$$\left\{ (r, \varphi) \mid \frac{\pi}{3} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, \sqrt{-\frac{2}{\cos 2\varphi}} \leq r \leq 2 \right\}.$$

因而

$$\begin{aligned} \sigma(D_2) &= \iint_{D_2} \, dx \, dy = \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_{\sqrt{-\frac{2}{\cos 2\varphi}}}^2 r \, dr \\ &= \frac{1}{2} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} \left(4 + \frac{2}{\cos 2\varphi} \right) d\varphi = \frac{\pi}{3} + \frac{1}{2} \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \frac{1}{\cos \varphi} d\varphi \\ &= \frac{\pi}{3} - \frac{1}{2} \ln(2 + \sqrt{3}), \end{aligned}$$

故

$$I = \frac{4\pi}{3} + 4 \ln(2 + \sqrt{3}).$$

□

例题 8.17 设 $D = \{(x, y) \mid x^2 + y^2 \leq 1\}$. 求 $I = \iint_D \left| \frac{x+y}{\sqrt{2}} - x^2 - y^2 \right| \, dx \, dy$.

解 由极坐标变换 $x = r \cos \varphi, y = r \sin \varphi, 0 \leq r \leq 1, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$, 有

$$\begin{aligned} I &= \iint_{\substack{0 \leq r \leq 1 \\ 0 \leq \varphi \leq 2\pi}} \left| \frac{\cos \varphi + \sin \varphi}{\sqrt{2}} - r \right| r^2 dr \, d\varphi \\ &= \iint_{\substack{0 \leq r \leq 1 \\ 0 \leq \varphi \leq 2\pi}} \left| \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) - r \right| r^2 dr \, d\varphi = \iint_{\substack{0 \leq r \leq 1 \\ 0 \leq \varphi \leq 2\pi}} |\sin \varphi - r| r^2 dr \, d\varphi \\ &= \iint_{\substack{0 \leq r \leq 1 \\ 0 \leq \varphi \leq \pi}} |\sin \varphi - r| r^2 dr \, d\varphi + \iint_{\substack{0 \leq r \leq 1 \\ \pi \leq \varphi \leq 2\pi}} |\sin \varphi - r| r^2 dr \, d\varphi \\ &= \iint_{\substack{0 \leq r \leq 1 \\ 0 \leq \varphi \leq \pi}} |\sin \varphi - r| r^2 dr \, d\varphi + \iint_{\substack{0 \leq r \leq 1 \\ 0 \leq \varphi \leq \pi}} (\sin \varphi + r) r^2 dr \, d\varphi. \end{aligned}$$

因此, 有

$$\begin{aligned}
 I &= \int_0^\pi d\varphi \int_0^{\sin \varphi} (\sin \varphi - r)r^2 dr + \int_0^\pi d\varphi \int_{\sin \varphi}^1 (r - \sin \varphi)r^2 dr \\
 &\quad + \int_0^\pi d\varphi \int_0^{\sin \varphi} (\sin \varphi + r)r^2 dr + \int_0^\pi d\varphi \int_{\sin \varphi}^1 (\sin \varphi + r)r^2 dr \\
 &= \int_0^\pi d\varphi \int_0^{\sin \varphi} 2 \sin \varphi \cdot r^2 dr + \int_0^\pi d\varphi \int_{\sin \varphi}^1 2r \cdot r^2 dr \\
 &= \int_0^\pi \frac{2}{3} \sin^4 \varphi d\varphi + \int_0^\pi \frac{1}{2} (1 - \sin^4 \varphi) d\varphi \\
 &= \frac{1}{6} \int_0^\pi \sin^4 \varphi d\varphi + \frac{\pi}{2} = \frac{1}{6} \cdot \frac{3\pi}{8} + \frac{\pi}{2} = \frac{9}{16} \pi.
 \end{aligned}$$

□

例题 8.18 设 f 是定义在正方形 $S = \{(x, y) \mid 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$ 上的四阶连续可微函数, 在 S 的边界上为零, 并且

$$\left| \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} \right| \leq M.$$

求证:

$$\left| \iint_S f(x, y) dx dy \right| \leq \frac{1}{144} M.$$

证明 考虑函数 $g(x, y) = x(1-x)y(1-y)$. 易知

$$\frac{\partial^4 g}{\partial x^2 \partial y^2} = 4, \quad \iint_S g(x, y) dx dy = \frac{1}{36}.$$

因为 f 在 S 的边界上为零, 所以 $\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$ 在 $x=0$ 和 $x=1$ 时为零. 于是

$$\begin{aligned}
 \iint_S \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} \cdot g dx dy &= \int_0^1 dy \int_0^1 \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} \cdot g dx \\
 &= \int_0^1 dy \left(\frac{\partial^3 f}{\partial x \partial y^2} \cdot g \Big|_{x=0}^1 - \int_0^1 \frac{\partial^3 f}{\partial x \partial y^2} \cdot \frac{\partial g}{\partial x} dx \right) \\
 &= - \int_0^1 dy \int_0^1 \frac{\partial^3 f}{\partial x \partial y^2} \cdot \frac{\partial g}{\partial x} dx \\
 &= - \int_0^1 dy \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial g}{\partial x} \Big|_{x=0}^1 - \int_0^1 \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} dx \right) \\
 &= \int_0^1 dy \int_0^1 \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} dx \\
 &= \iint_S \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} dx dy.
 \end{aligned}$$

同理, 由于 $\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}$ 在 $y=0$ 和 $y=1$ 时为零, 作与上面类似的推导, 可得

$$\iint_S \frac{\partial^4 g}{\partial x^2 \partial y^2} \cdot f dx dy = \iint_S \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} dx dy.$$

因此

$$\iint_S \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} \cdot g dx dy = \iint_S \frac{\partial^4 g}{\partial x^2 \partial y^2} \cdot f dx dy.$$

从而

$$\begin{aligned}
 \left| \iint_S f dx dy \right| &= \frac{1}{4} \left| \iint_S 4f dx dy \right| = \frac{1}{4} \left| \iint_S \frac{\partial^4 g}{\partial x^2 \partial y^2} f dx dy \right| \\
 &= \frac{1}{4} \left| \iint_S \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} \cdot g dx dy \right| \leq \frac{M}{4} \iint_S g dx dy = \frac{M}{144}.
 \end{aligned}$$

□

定理 8.6 (Poincaré(庞加莱) 不等式)

设 φ, ψ 是 $[a, b]$ 上的连续函数, f 在区域 $D = \{(x, y) \mid a \leq x \leq b, \varphi(x) \leq y \leq \psi(x)\}$ 上连续可微, 且有 $f(x, \varphi(x)) = 0$ ($x \in [a, b]$). 则存在 $M > 0$, 使得

$$\iint_D f^2(x, y) \, dx \, dy \leq M \iint_D (f'_y(x, y))^2 \, dx \, dy.$$

♡

证明 由 Newton-Leibniz 公式和 Cauchy 不等式可得

$$\begin{aligned} f^2(x, y) &= [f(x, y) - f(x, \varphi(x))]^2 = \left(\int_{\varphi(x)}^y \frac{\partial f}{\partial t}(x, t) \, dt \right)^2 \\ &\leq (y - \varphi(x)) \int_{\varphi(x)}^y \left(\frac{\partial f}{\partial t}(x, t) \right)^2 \, dt, \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} \iint_D f^2(x, y) \, dx \, dy &= \int_a^b dx \int_{\varphi(x)}^{\psi(x)} f^2(x, y) \, dy \\ &\leq \int_a^b dx \int_{\varphi(x)}^{\psi(x)} (y - \varphi(x)) \, dy \int_{\varphi(x)}^y \left(\frac{\partial f}{\partial t}(x, t) \right)^2 \, dt \\ &= \int_a^b dx \int_{\varphi(x)}^{\psi(x)} \left(\frac{\partial f}{\partial t}(x, t) \right)^2 \, dt \int_t^{\psi(x)} (y - \varphi(x)) \, dy \\ &\leq \int_a^b dx \int_{\varphi(x)}^{\psi(x)} \left(\frac{\partial f}{\partial t}(x, t) \right)^2 \, dt \int_{\varphi(x)}^{\psi(x)} (y - \varphi(x)) \, dy \\ &= \int_a^b dx \int_{\varphi(x)}^{\psi(x)} \frac{1}{2} (\psi(x) - \varphi(x))^2 \left(\frac{\partial f}{\partial t}(x, t) \right)^2 \, dt \\ &\leq M \int_a^b \left(\int_{\varphi(x)}^{\psi(x)} \left(\frac{\partial f}{\partial t}(x, t) \right)^2 \, dt \right) dx \\ &= M \iint_D \left(\frac{\partial f}{\partial y}(x, y) \right)^2 \, dx \, dy, \end{aligned}$$

这里 M 是满足 $M > \max_{a \leq x \leq b} \frac{1}{2} (\psi(x) - \varphi(x))^2$ 的常数.

□

例题 8.19 设 $a > 0$, $\Omega_n(a) : x_1 + x_2 + \cdots + x_n \leq a, x_i \geq 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$). 求积分

$$I_n(a) = \int \cdots \int_{\Omega_n(a)} x_1 x_2 \cdots x_n \, dx_1 \, dx_2 \cdots \, dx_n.$$

解 作变换 $x_i = at_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, 则

$$I_n(a) = a^{2n} \int \cdots \int_{\Omega_n(1)} t_1 t_2 \cdots t_n \, dt_1 \, dt_2 \cdots \, dt_n = a^{2n} I_n(1).$$

再用累次积分, 可得

$$\begin{aligned} I_n(1) &= \int \cdots \int_{\Omega_n(1)} t_1 t_2 \cdots t_n \, dt_1 \, dt_2 \cdots \, dt_n \\ &= \int_0^1 t_n \, dt_n \int \cdots \int_{t_1 + t_2 + \cdots + t_{n-1} \leq 1-t_n} t_1 \cdots t_{n-1} \, dt_1 \cdots \, dt_{n-1} \\ &= \int_0^1 t_n I_{n-1}(1-t_n) \, dt_n = \int_0^1 t_n (1-t_n)^{2(n-1)} I_{n-1}(1) \, dt_n. \end{aligned}$$

因此,

$$I_n(1) = \frac{1}{2n(2n-1)} I_{n-1}(1).$$

注意到 $I_1(1) = \int_0^1 t dt = \frac{1}{2}$. 由上面的递推公式, 可得 $I_n(1) = \frac{1}{(2n)!}$. 故 $I_n(a) = \frac{a^{2n}}{(2n)!}$.

□

8.2.8 其他

例题 8.20 证明积分 $\int_0^\infty e^{-ax^2 - \frac{b}{x^2}} dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} e^{-2\sqrt{ab}}$, $a, b > 0$.

证明 当 $a = 1$ 时, 就有

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} e^{-x^2 - \frac{b}{x^2}} dx &= e^{-2\sqrt{b}} \int_0^{+\infty} e^{-\left(x - \frac{\sqrt{b}}{x}\right)^2} dx \stackrel{y = \frac{\sqrt{b}}{x}}{=} e^{-2\sqrt{b}} \int_0^{+\infty} \frac{\sqrt{b}}{y^2} e^{-\left(\frac{\sqrt{b}}{y} - y\right)^2} dy \\ &= \frac{e^{-2\sqrt{b}}}{2} \int_0^{+\infty} \left(1 + \frac{\sqrt{b}}{y^2}\right) e^{-\left(y - \frac{\sqrt{b}}{y}\right)^2} dy = \frac{e^{-2\sqrt{b}}}{2} \int_0^{+\infty} e^{-\left(y - \frac{\sqrt{b}}{y}\right)^2} d\left(y - \frac{\sqrt{b}}{y}\right) \\ &= \frac{e^{-2\sqrt{b}}}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-t^2} dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{-2\sqrt{b}}. \end{aligned}$$

于是对 $\forall a > 0$, 就有

$$\int_0^\infty e^{-ax^2 - \frac{b}{x^2}} dx = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_0^\infty e^{-x^2 - \frac{ab}{x^2}} dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} e^{-2\sqrt{ab}}.$$

□

例题 8.21 计算 $\int_0^\infty \frac{\cos(ax)}{1+x^2} dx$, $a \in \mathbb{R}$.

注 本题可以用复变函数的方法(留数定理)来计算. 但是我们这里用基本的高等数学的方法来计算.

$\int_0^\infty \frac{\sin(ax)}{1+x^2} dx$ 这个积分没办法算出具体的初等数值.

证明

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \frac{\cos(ax)}{1+x^2} dx &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos(ax)}{1+x^2} dx = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \cos(ax) \left(\int_0^{+\infty} e^{-(1+x^2)y} dy \right) dx \\ &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_0^{+\infty} e^{-(1+x^2)y} \cos(ax) dy \right) dx = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} e^{-(1+x^2)y} \cos(ax) dy dx \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-(1+x^2)y} \cos(ax) dx \right) dy = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} e^{-y} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-x^2 y} \cos(ax) dx \right) dy \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\int_0^{+\infty} e^{-y} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-x^2 y + iax} dx \right) dy \right) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\int_0^{+\infty} e^{-y} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y \left(x^2 - \frac{aix}{y} + \left(\frac{ai}{2y} \right)^2 \right) - \frac{a^2}{4y}} dx \right) dy \right) \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\int_0^{+\infty} e^{-y} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y \left(x - \frac{ai}{2y} \right)^2 - \frac{a^2}{4y}} dx \right) dy \right) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\int_0^{+\infty} e^{-y} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y \left(x + \frac{a}{2iy} \right)^2 - \frac{a^2}{4y}} dx \right) dy \right) \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\int_0^{+\infty} e^{-y} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y \left(x + \frac{a}{2iy} \right)^2 - \frac{a^2}{4y}} d\left(x + \frac{a}{2iy}\right) \right) dy \right) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\int_0^{+\infty} e^{-y} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y x^2 - \frac{a^2}{4y}} dx \right) dy \right) \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} e^{-y - \frac{a^2}{4y}} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y x^2} dx \right) dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{y}} e^{-y - \frac{a^2}{4y}} dy \\ &\stackrel{y=t^2}{=} \sqrt{\pi} \int_0^{+\infty} e^{-t^2 - \frac{a^2}{4t^2}} dt \stackrel{\text{例题 8.20}}{=} \sqrt{\pi} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{-|a|} = \frac{\pi}{2} e^{-|a|}. \end{aligned}$$

□

例题 8.22 计算 $\int_0^\infty \frac{1}{(1+x^8)^2} dx$.

注 由命题 8.7 可知对 $\forall s > 0$, 都有

$$\frac{1}{t^s} = \frac{1}{\Gamma(s)} \int_0^{+\infty} y^{s-1} e^{-ty} dy, \forall t \in \mathbb{R}.$$

本题的核心想法就是利用上式将 $\frac{z}{1+x^8}$ 转化成积分形式.

证明 注意到

$$\int_0^{+\infty} ye^{-(1+x^8)y} dy \xrightarrow{y=\frac{z}{1+x^8}} \frac{1}{(1+x^8)^2} \int_0^{+\infty} ze^{-z} dz = \frac{1}{(1+x^8)^2},$$

因此

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} \frac{1}{(1+x^8)^2} dx &= \int_0^{+\infty} \left(\int_0^{+\infty} ye^{-(1+x^8)y} dy \right) dx = \int_0^{+\infty} \left(\int_0^{+\infty} ye^{-(1+x^8)y} dx \right) dy \\ &= \int_0^{+\infty} ye^{-y} \left(\int_0^{+\infty} e^{-x^8 y} dx \right) dy \xrightarrow{x=y^{-\frac{1}{8}} z^{\frac{1}{8}}} \int_0^{+\infty} ye^{-y} \left(\int_0^{+\infty} y^{-\frac{1}{8}} e^{-z} dz^{\frac{1}{8}} \right) dy \\ &= \frac{1}{8} \int_0^{+\infty} y^{\frac{7}{8}} e^{-y} \left(\int_0^{+\infty} z^{-\frac{7}{8}} e^{-z} dz \right) dy = \frac{1}{8} \int_0^{+\infty} y^{\frac{7}{8}} e^{-y} \Gamma\left(\frac{1}{8}\right) dy \\ &= \frac{1}{8} \Gamma\left(\frac{15}{8}\right) \Gamma\left(\frac{1}{8}\right) = \frac{1}{8} \cdot \frac{7}{8} \Gamma\left(\frac{7}{8}\right) \Gamma\left(\frac{1}{8}\right) \\ &\xrightarrow{\text{余元公式}} \frac{7\pi}{64 \sin\left(\frac{\pi}{8}\right)} = \frac{7\pi}{32\sqrt{2-\sqrt{2}}}. \end{aligned}$$

□

例题 8.23 计算积分 $I = \int_{-1}^2 \frac{1+x^2}{1+x^4} dx$.

注 在此例中 $I \neq F(2) - F(-1)$. 这是因为 F 并不是 f 在区间 $[-1, 2]$ 上的原函数.

解 在不包含 0 的区间上作变换 $t = x - \frac{1}{x}$ 得

$$\begin{aligned} \int \frac{1+x^2}{1+x^4} dx &= \int \frac{x - \frac{1}{x}}{2 + \left(x - \frac{1}{x}\right)^2} dx = \int \frac{dt}{2+t^2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \arctan \frac{t}{\sqrt{2}} + C = \frac{1}{\sqrt{2}} \arctan \frac{x^2 - 1}{\sqrt{2}x} + C. \end{aligned}$$

这说明在区间 $[-1, 0)$ 和 $(0, 2]$ 上, 函数 $f(x) = \frac{1+x^2}{1+x^4}$ 的一个原函数是

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \arctan \frac{x^2 - 1}{\sqrt{2}x}.$$

因此

$$\begin{aligned} \int_{-1}^0 f(x) dx &= F(0^-) - F(-1) = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} - 0 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}, \\ \int_0^2 f(x) dx &= F(2) - F(0^+) = \frac{1}{\sqrt{2}} \arctan \frac{3}{2\sqrt{2}} + \frac{\pi}{2\sqrt{2}}. \end{aligned}$$

故

$$I = \int_{-1}^0 f(x) dx + \int_0^2 f(x) dx = \frac{\pi}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \arctan \frac{3}{2\sqrt{2}}.$$

□

8.3 含参量积分

8.3.1 含参量正常积分

定义 8.2 (含参量积分)

设 $f(x, y)$ 是定义在矩形区域 $R = [a, b] \times [c, d]$ 上的二元函数. 当 x 取 $[a, b]$ 上某定值时, 函数 $f(x, y)$ 则是定义在 $[c, d]$ 上以 y 为自变量的一元函数. 倘若这时 $f(x, y)$ 在 $[c, d]$ 上可积, 则其积分值是 x 在 $[a, b]$ 上取

值的函数, 记它为 $\varphi(x)$, 就有

$$\varphi(x) = \int_c^d f(x, y) dy, x \in [a, b]. \quad (8.13)$$

一般地, 设 $f(x, y)$ 为定义在区域 $G = \{(x, y) \mid c(x) \leq y \leq d(x), a \leq x \leq b\}$ 上的二元函数, 其中 $c(x), d(x)$ 为定义在 $[a, b]$ 上的连续函数, 若对于 $[a, b]$ 上每一固定的 x 值, $f(x, y)$ 作为 y 的函数在闭区间 $[c(x), d(x)]$ 上可积, 则其积分值是 x 在 $[a, b]$ 上取值的函数, 记作 $F(x)$ 时, 就有

$$F(x) = \int_{c(x)}^{d(x)} f(x, y) dy, x \in [a, b]. \quad (8.14)$$

用积分形式所定义的这两个函数 (8.13) 与 (8.14), 通称为定义在 $[a, b]$ 上含参量 x 的(正常)积分, 或简称含参量积分.

定理 8.7 (连续性)

若二元函数 $f(x, y)$ 在矩形区域 $R = [a, b] \times [c, d]$ 上连续, 则函数

$$\varphi(x) = \int_c^d f(x, y) dy, \quad \psi(y) = \int_a^b f(x, y) dx.$$

都在 $[a, b]$ 上连续.



注 对于这个定理的结论也可以写成如下的形式: 若 $f(x, y)$ 在矩形区域 R 上连续, 则对任何 $x_0 \in [a, b]$, 都有

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \int_c^d f(x, y) dy = \int_c^d \lim_{x \rightarrow x_0} f(x, y) dy.$$

这个结论表明, 定义在矩形区域上的连续函数, 其极限运算与积分运算的顺序是可以交换的.

证明 设 $x \in [a, b]$, 对充分小的 Δx , 有 $x + \Delta x \in [a, b]$ (若 x 为区间的端点, 则仅考虑 $\Delta x > 0$ 或 $\Delta x < 0$), 于是

$$\varphi(x + \Delta x) - \varphi(x) = \int_c^d [f(x + \Delta x, y) - f(x, y)] dy. \quad (8.15)$$

由于 $f(x, y)$ 在有界闭域 R 上连续, 从而一致连续, 即对任给的正数 ε , 总存在某个正数 δ , 对 R 内任意两点 (x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) , 只要

$$|x_1 - x_2| < \delta, |y_1 - y_2| < \delta,$$

就有

$$|f(x_1, y_1) - f(x_2, y_2)| < \varepsilon. \quad (8.16)$$

所以由 (8.15), (8.16) 可推得: 当 $|\Delta x| < \delta$ 时,

$$|\varphi(x + \Delta x) - \varphi(x)| \leq \int_c^d |f(x + \Delta x, y) - f(x, y)| dy < \int_c^d \varepsilon dx = \varepsilon(d - c).$$

这就证明了 $\varphi(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续.

同理可证: 若 $f(x, y)$ 在矩形区域 R 上连续, 则含参量 y 的积分

$$\psi(y) = \int_a^b f(x, y) dx.$$

在 $[c, d]$ 上连续.



定理 8.8 (连续性)

设二元函数 $f(x, y)$ 在区域

$$G = \{(x, y) \mid c(x) \leq y \leq d(x), a \leq x \leq b\}$$

上连续, 其中 $c(x), d(x)$ 为 $[a, b]$ 上的连续函数, 则函数

$$F(x) = \int_{c(x)}^{d(x)} f(x, y) dy. \quad (8.17)$$

在 $[a, b]$ 上连续.



证明 对积分 (8.17) 用换元积分法, 令

$$y = c(x) + t(d(x) - c(x)).$$

当 y 在 $c(x)$ 与 $d(x)$ 之间取值时, t 在 $[0, 1]$ 上取值, 且

$$dy = (d(x) - c(x)) dt.$$

所以从 (8.17) 式可得

$$F(x) \int_{c(x)}^{d(x)} f(x, y) dy = \int_0^1 f(x, c(x) + t(d(x) - c(x)))(d(x) - c(x)) dt.$$

由于被积函数

$$f(x, c(x) + t(d(x) - c(x)))(d(x) - c(x))$$

在矩形区域 $[a, b] \times [0, 1]$ 上连续, 由定理 8.7 得积分 (8.17) 所确定的函数 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续.



定理 8.9 (可微性)

若函数 $f(x, y)$ 与其偏导数 $\frac{\partial}{\partial x} f(x, y)$ 都在矩形区域 $R = [a, b] \times [c, d]$ 上连续, 则

$$\varphi(x) = \int_c^d f(x, y) dy$$

在 $[a, b]$ 上可微, 且

$$\frac{d}{dx} \int_c^d f(x, y) dy = \int_c^d \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) dy.$$



证明 对于 $[a, b]$ 内任一点 x , 设 $x + \Delta x \in [a, b]$ (若 x 为区间端点, 则讨论单侧导数), 则

$$\frac{\varphi(x + \Delta x) - \varphi(x)}{\Delta x} = \int_c^d \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x} dy.$$

由微分学的拉格朗日中值定理及 $f_x(x, y)$ 在有界闭域 R 上连续 (从而一致连续), 对任给正数 ε , 存在正数 δ , 只要当 $|\Delta x| < \delta$ 时, 就有

$$\left| \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x} - f_x(x, y) \right| = |f_x(x + \theta \Delta x, y) - f_x(x, y)| < \varepsilon,$$

其中 $\theta \in (0, 1)$. 因此

$$\left| \frac{\Delta \varphi}{\Delta x} - \int_c^d f_x(x, y) dy \right| \leq \int_c^d \left| \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x} - f_x(x, y) \right| dy < \varepsilon(d - c).$$

这就证得对一切 $x \in [a, b]$, 有

$$\frac{d}{dx} \varphi(x) = \int_c^d \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) dy.$$



定理 8.10 (可微性)

设 $f(x, y), f_x(x, y)$ 在 $R = [a, b] \times [p, q]$ 上连续, $c(x), d(x)$ 为定义在 $[a, b]$ 上其值含于 $[p, q]$ 内的可微函数,

则函数

$$F(x) = \int_{c(x)}^{d(x)} f(x, y) dy$$

在 $[a, b]$ 上可微, 且

$$F'(x) = \int_{c(x)}^{d(x)} f_x(x, y) dy + f(x, d(x))d'(x) - f(x, c(x))c'(x). \quad (8.18)$$



证明 把 $F(x)$ 看作复合函数

$$F(x) = H(x, c, d) = \int_c^d f(x, y) dy, c = c(x), d = d(x).$$

由复合函数求导法则及变限积分的求导法则, 有

$$\frac{d}{dx} F(x) = \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial c} \frac{dc}{dx} + \frac{\partial H}{\partial d} \frac{dd}{dx} = \int_{c(x)}^{d(x)} f_x(x, y) dy + f(x, d(x))d'(x) - f(x, c(x))c'(x).$$



定理 8.11 (可积性)

若 $f(x, y)$ 在矩形区域 $R = [a, b] \times [c, d]$ 上连续, 则 $\varphi(x)$ 和 $\psi(y)$ 分别在 $[a, b]$ 和 $[c, d]$ 上可积. 这就是说: 在 $f(x, y)$ 连续性假设下, 同时存在两个求积顺序不同的积分:

$$\int_a^b \left[\int_c^d f(x, y) dy \right] dx \quad \text{与} \quad \int_c^d \left[\int_a^b f(x, y) dx \right] dy.$$

为书写简便起见, 今后将上述两个积分写作

$$\int_a^b dx \int_c^d f(x, y) dy \quad \text{与} \quad \int_c^d dy \int_a^b f(x, y) dx,$$

前者表示 $f(x, y)$ 先对 y 求积然后对 x 求积, 后者则求积顺序相反. 它们统称为 **累次积分**, 或更确切地称为 **二次积分**.



证明



定理 8.12

若 $f(x, y)$ 在矩形区域 $R = [a, b] \times [c, d]$ 上连续, 则

$$\int_a^b dx \int_c^d f(x, y) dy = \int_c^d dy \int_a^b f(x, y) dx. \quad (8.19)$$



笔记 这个定理指出, 在 $f(x, y)$ 连续性假设下, 累次积分与求积顺序无关.

证明 记

$$\varphi_1(u) = \int_a^u dx \int_c^d f(x, y) dy, \varphi_2(u) = \int_c^d dy \int_a^u f(x, y) dx,$$

其中 $u \in [a, b]$, 现在分别求 $\varphi_1(u)$ 与 $\varphi_2(u)$ 的导数.

$$\varphi_1'(u) = \frac{d}{du} \int_a^u \varphi(x) dx = \varphi(u).$$

对于 $\varphi_2(u)$, 令 $H(u, y) = \int_a^u f(x, y) dx$, 则有

$$\varphi_2(u) = \int_c^d H(u, y) dy.$$

因为 $H(u, y)$ 与 $H_u(u, y) = f(u, y)$ 都在 R 上连续, 由定理 8.9,

$$\varphi'_2(u) = \frac{d}{du} \int_c^d H(u, y) dy = \int_c^d H_u(u, y) dy = \int_c^d f(u, y) dy = \varphi(u).$$

故得 $\varphi'_1(u) = \varphi'_2(u)$, 因此对一切 $u \in [a, b]$, 有

$$\varphi_1(u) = \varphi_2(u) + k \quad (k \text{ 为常数}).$$

当 $u = a$ 时, $\varphi_1(a) = \varphi_2(a) = 0$, 于是 $k = 0$, 即得

$$\varphi_1(u) = \varphi_2(u), \quad u \in [a, b].$$

取 $u = b$, 就得到所要证明的 (8.19) 式.

□

8.3.2 含参量反常积分

8.3.2.1 含参量反常积分的一致收敛性及其判别法

定义 8.3 (含参量反常积分)

设函数 $f(x, y)$ 定义在无界区域 $R = \{(x, y) | x \in I, c \leq y < +\infty\}$ 上, 其中 I 为一区间, 若对每一个固定的 $x \in I$, 反常积分

$$\int_c^{+\infty} f(x, y) dy \quad (8.20)$$

都收敛, 则它的值是 x 在 I 上取值的函数, 当记这个函数为 $\Phi(x)$ 时, 则有

$$\Phi(x) = \int_c^{+\infty} f(x, y) dy, \quad x \in I, \quad (8.21)$$

称(8.20)式为定义在 I 上的含参量 x 的无穷限反常积分, 或简称含参量反常积分.

♣

定义 8.4

若含参量反常积分(8.20)与函数 $\Phi(x)$ 对任给的正数 ε , 总存在某一实数 $N > c$, 使得当 $M > N$ 时, 对一切 $x \in I$, 都有

$$\left| \int_c^M f(x, y) dy - \Phi(x) \right| < \varepsilon,$$

即

$$\left| \int_M^{+\infty} f(x, y) dy \right| < \varepsilon,$$

则称含参量反常积分(8.20)在 I 上一致收敛于 $\Phi(x)$, 或简单地说含参量反常积分(8.20)在 I 上一致收敛.

若对任意 $[a, b] \subset I$, 含参量反常积分(8.20)在 $[a, b]$ 上一致收敛, 则称(8.20)在 I 上内闭一致收敛 (若 $I = [a, b]$, 则内闭一致收敛即一致收敛).

♣

定理 8.13 (一致收敛的柯西准则)

含参量反常积分(8.20)在 I 上一致收敛的充要条件是: 对任给正数 ε , 总存在某一实数 $M > c$, 使得当 $A_1, A_2 > M$ 时, 对一切 $x \in I$, 都有

$$\left| \int_{A_1}^{A_2} f(x, y) dy \right| < \varepsilon.$$

♥

证明

□

定理 8.14

含参量反常积分 $\int_c^{+\infty} f(x, y) dy$ 在 I 上一致收敛的充分必要条件是

$$\lim_{A \rightarrow +\infty} F(A) = 0,$$

其中 $F(A) = \sup_{x \in I} \left| \int_A^{+\infty} f(x, y) dy \right|$.



证明

**定理 8.15**

含参量反常积分(8.20)在 I 上一致收敛的充要条件是: 对任一趋于 $+\infty$ 的递增数列 $\{A_n\}$ (其中 $A_1 = c$), 函数项级数

$$\sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n}^{A_{n+1}} f(x, y) dy = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) \quad (8.22)$$

在 I 上一致收敛.



证明 必要性 由(8.20)在 I 上一致收敛, 故对任给 $\varepsilon > 0$, 必存在 $M > c$, 使当 $A'' > A' > M$ 时, 对一切 $x \in I$, 总有

$$\left| \int_{A'}^{A''} f(x, y) dy \right| < \varepsilon. \quad (8.23)$$

又由 $A_n \rightarrow +\infty (n \rightarrow \infty)$, 所以对正数 M , 存在正整数 N , 只要当 $m > n > N$ 时, 就有 $A_m \geq A_n > M$. 由(8.23)对一切 $x \in I$, 就有

$$\begin{aligned} |u_n(x) + \cdots + u_m(x)| &= \left| \int_{A_m}^{A_{m+1}} f(x, y) dy + \cdots + \int_{A_n}^{A_{n+1}} f(x, y) dy \right| \\ &= \left| \int_{A_n}^{A_{m+1}} f(x, y) dy \right| < \varepsilon. \end{aligned}$$

这就证明了级数(8.22)在 I 上一致收敛.

充分性: 用反证法. 假若(8.20)在 I 上不一致收敛, 则存在某个正数 ε_0 , 使得对于任何实数 $M > c$, 存在相应的 $A'' > A' > M$ 和 $x' \in I$, 使得

$$\left| \int_{A'}^{A''} f(x', y) dy \right| \geq \varepsilon_0.$$

现取 $M_1 = \max\{1, c\}$, 则存在 $A_2 > A_1 > M_1$ 及 $x_1 \in I$, 使得

$$\left| \int_{A_1}^{A_2} f(x_1, y) dy \right| \geq \varepsilon_0.$$

一般地, 取 $M_n = \max\{n, A_{2(n-1)}\} (n \geq 2)$, 则有 $A_{2n} > A_{2n-1} > M_n$ 及 $x_n \in I$, 使得

$$\left| \int_{A_{2n-1}}^{A_{2n}} f(x_n, y) dy \right| \geq \varepsilon_0. \quad (8.24)$$

由上述所得到的数列 $\{A_n\}$ 是递增数列, 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} A_n = +\infty$. 现在考察级数

$$\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n}^{A_{n+1}} f(x, y) dy.$$

由(8.24)式知存在正数 ε_0 , 对任何正整数 N , 只要 $n > N$, 就有某个 $x_n \in I$, 使得

$$|u_{2n-1}(x_n)| = \left| \int_{A_{2n-1}}^{A_{2n}} f(x_n, y) dy \right| \geq \varepsilon_0.$$

这与级数(8.22)在 I 上一致收敛的假设矛盾. 故含参量反常积分(8.20)在 I 上一致收敛.

□

定理 8.16 (含参量反常积分一致收敛判别法)**1. 魏尔斯特拉斯/M 判别法**设有函数 $g(y)$, 使得

$$|f(x, y)| \leq g(y), (x, y) \in I \times [c, +\infty).$$

若 $\int_c^{+\infty} g(y)dy$ 收敛, 则 $\int_c^{+\infty} f(x, y)dy$ 在 I 上一致收敛.**2. 狄利克雷判别法**

设

(i) 对一切实数 $N > c$, 含参量正常积分

$$\int_c^N f(x, y)dy$$

对参量 x 在 I 上一致有界, 即存在正数 M , 对一切 $N > c$ 及一切 $x \in I$, 都有

$$\left| \int_c^N f(x, y)dy \right| \leq M.$$

(ii) 对每一个 $x \in I$, 函数 $g(x, y)$ 为 y 的单调函数, 且当 $y \rightarrow +\infty$ 时, 对参量 $x, g(x, y)$ 一致地收敛于 0.

则含参量反常积分

$$\int_c^{+\infty} f(x, y)g(x, y)dy$$

在 I 上一致收敛.**3. 阿贝尔判别法**

设

(i) $\int_c^{+\infty} f(x, y)dy$ 在 I 上一致收敛.(ii) 对每一个 $x \in I$, 函数 $g(x, y)$ 为 y 的单调函数, 且对参量 $x, g(x, y)$ 在 I 上一致有界.

则含参量反常积分

$$\int_c^{+\infty} f(x, y)g(x, y)dy$$

在 I 上一致收敛.

♡

证明

□

8.3.2.2 含参量反常积分的性质**定理 8.17 (连续性)**设 $f(x, y)$ 在 $I \times [c, +\infty)$ 上连续, 若含参量反常积分

$$\Phi(x) = \int_c^{+\infty} f(x, y)dy \quad (8.25)$$

在 I 上一致收敛, 则 $\Phi(x)$ 在 I 上连续.

♡

笔记 这个定理也表明, 在一致收敛的条件下, 极限运算与无穷积分运算可以交换:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \int_c^{+\infty} f(x, y)dy = \int_c^{+\infty} f(x_0, y)dy = \int_c^{+\infty} \lim_{x \rightarrow x_0} f(x, y)dy. \quad (8.26)$$

证明 由定理 8.15, 对任一递增且趋于 $+\infty$ 的数列 $\{A_n\}$ ($A_1 = c$), 函数项级数

$$\Phi(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n}^{A_{n+1}} f(x, y)dy = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) \quad (8.27)$$

在 I 上一致收敛. 又由于 $f(x, y)$ 在 $I \times [c, +\infty)$ 上连续, 故每个 $u_n(x)$ 都在 I 上连续. 根据函数项级数的连续性定理, 函数 $\Phi(x)$ 在 I 上连续.

□

推论 8.1

设 $f(x, y)$ 在 $I \times [c, +\infty)$ 上连续, 若 $\Phi(x) = \int_c^{+\infty} f(x, y) dy$ 在 I 上内闭一致收敛, 则 $\Phi(x)$ 在 I 上连续.

♡

定理 8.18 (可微性)

设 $f(x, y)$ 与 $f_x(x, y)$ 在区域 $I \times [c, +\infty)$ 上连续. 若 $\Phi(x) = \int_c^{+\infty} f(x, y) dy$ 在 I 上收敛, $\int_c^{+\infty} f_x(x, y) dy$ 在 I 上一致收敛, 则 $\Phi(x)$ 在 I 上可微, 且

$$\Phi'(x) = \int_c^{+\infty} f_x(x, y) dy. \quad (8.28)$$

♡



笔记 最后结果表明在定理条件下, 求导运算和无穷积分运算可以交换.

证明 对任一递增且趋于 $+\infty$ 的数列 $\{A_n\}$ ($A_1 = c$), 令

$$u_n(x) = \int_{A_n}^{A_{n+1}} f(x, y) dy.$$

由定理 8.10 推得

$$u'_n(x) = \int_{A_n}^{A_{n+1}} f_x(x, y) dy.$$

由 $\int_c^{+\infty} f_x(x, y) dy$ 在 I 上一致收敛及定理 8.15, 可得函数项级数

$$\sum_{n=1}^{\infty} u'_n(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n}^{A_{n+1}} f_x(x, y) dy$$

在 I 上一致收敛, 因此根据函数项级数的逐项求导定理, 即得

$$\Phi'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} u'_n(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n}^{A_{n+1}} f_x(x, y) dy = \int_c^{+\infty} f_x(x, y) dy,$$

或写作

$$\frac{d}{dx} \int_c^{+\infty} f(x, y) dy = \int_c^{+\infty} \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) dy.$$

□

推论 8.2

设 $f(x, y)$ 和 $f_x(x, y)$ 在 $I \times [c, +\infty)$ 上连续, 若 $\Phi(x) = \int_c^{+\infty} f(x, y) dy$ 在 I 上收敛, 而 $\int_c^{+\infty} f_x(x, y) dy$ 在 I 上内闭一致收敛, 则 $\Phi(x)$ 在 I 上可微, 且 $\Phi'(x) = \int_c^{+\infty} f_x(x, y) dy$.

♡

定理 8.19 (可积性)

设 $f(x, y)$ 在 $[a, b] \times [c, +\infty)$ 上连续, 若 $\Phi(x) = \int_c^{+\infty} f(x, y) dy$ 在 $[a, b]$ 上一致收敛, 则 $\Phi(x)$ 在 $[a, b]$ 上可积, 且

$$\int_a^b dx \int_c^{+\infty} f(x, y) dy = \int_c^{+\infty} dy \int_a^b f(x, y) dx. \quad (8.29)$$

♡

证明 由定理 8.17 知道 $\Phi(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 从而 $\Phi(x)$ 在 $[a, b]$ 上可积.

又由定理 8.17 的证明中可以看到, 函数项级数 (8.27) 在 $[a, b]$ 上一致收敛, 且各项 $u_n(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 因此根据函数项级数逐项求积定理, 有

$$\int_a^b \Phi(x) dx = \sum_{n=1}^{\infty} \int_a^b u_n(x) dx = \sum_{n=1}^{\infty} \int_a^b dx \int_{A_n}^{A_{n+1}} f(x, y) dy = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n}^{A_{n+1}} dy \int_a^b f(x, y) dx, \quad (8.30)$$

这里最后一步是根据定理 8.11 关于积分顺序的可交换性.(8.30) 式又可写作

$$\int_a^b \Phi(x) dx = \int_c^{+\infty} dy \int_a^b f(x, y) dx.$$

这就是(8.29)式.

□

定理 8.20

设 $f(x, y)$ 在 $[a, +\infty) \times [c, +\infty)$ 上连续. 若

- (i) $\int_a^{+\infty} f(x, y) dx$ 关于 y 在 $[c, +\infty)$ 上内闭一致收敛, $\int_c^{+\infty} f(x, y) dy$ 关于 x 在 $[a, +\infty)$ 上内闭一致收敛.
(ii) 积分

$$\int_a^{+\infty} dx \int_c^{+\infty} |f(x, y)| dy \text{ 与 } \int_c^{+\infty} dy \int_a^{+\infty} |f(x, y)| dx \quad (8.31)$$

中有一个收敛. 则

$$\int_a^{+\infty} dx \int_c^{+\infty} f(x, y) dy = \int_c^{+\infty} dy \int_a^{+\infty} f(x, y) dx. \quad (8.32)$$

♡

证明 不妨设 (8.31) 式中第一个积分收敛, 由此推得

$$\int_a^{+\infty} dx \int_c^{+\infty} f(x, y) dy$$

也收敛. 当 $d > c$ 时,

$$\begin{aligned} J_d &= \left| \int_c^d dy \int_a^{+\infty} f(x, y) dx - \int_a^{+\infty} dx \int_c^{+\infty} f(x, y) dy \right| \\ &= \left| \int_c^d dy \int_a^{+\infty} f(x, y) dx - \int_a^{+\infty} dx \int_c^d f(x, y) dy - \int_a^{+\infty} dx \int_d^{+\infty} f(x, y) dy \right|. \end{aligned}$$

根据条件 (i) 及定理 8.19, 可推得

$$J_d = \left| \int_a^{+\infty} dx \int_d^{+\infty} f(x, y) dy \right| \leq \left| \int_a^A dx \int_d^{+\infty} f(x, y) dy \right| + \int_A^{+\infty} dx \int_d^{+\infty} |f(x, y)| dy. \quad (8.33)$$

由条件 (ii), 对于任给的 $\varepsilon > 0$, 有 $G > a$, 使当 $A > G$ 时, 有

$$\int_A^{+\infty} dx \int_d^{+\infty} |f(x, y)| dy < \frac{\varepsilon}{2}.$$

选定 A 后, 由 $\int_c^{+\infty} f(x, y) dy$ 的内闭一致收敛性, 存在 $M > c$, 使得当 $d > M$ 时有

$$\left| \int_d^{+\infty} f(x, y) dy \right| < \frac{\varepsilon}{2(A-a)}, \quad \forall x \in [a, A].$$

把这两个结果应用到 (8.33) 式, 得到

$$J_d < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon,$$

即 $\lim_{d \rightarrow +\infty} J_d = 0$, 这就证明了 (8.32) 式.

□

定义 8.5

设 $f(x, y)$ 在区域 $R = [a, b] \times [c, d]$ 上有定义. 若对 x 的某些值, $y = d$ 为函数 $f(x, y)$ 的瑕点, 则称

$$\int_c^d f(x, y) dy \quad (8.34)$$

为含参量 x 的无界函数反常积分, 或简称为含参量反常积分. 若对每一个 $x \in [a, b]$, 积分 (8.34) 都收敛, 则其积分值是 x 在 $[a, b]$ 上取值的函数.

定义 8.6

对任给正数 ε , 总存在某正数 $\delta < d - c$, 使得当 $0 < \eta < \delta$ 时, 对一切 $x \in [a, b]$, 都有

$$\left| \int_{d-\eta}^d f(x, y) dy \right| < \varepsilon,$$

则称含参量反常积分 (8.34) 在 $[a, b]$ 上一致收敛.



笔记 可参照含参量无穷限反常积分的办法建立相应的含参量无界函数反常积分的一致收敛性判别法, 并讨论它们的性质.

8.4 Euler 积分

定理 8.21 (余元公式)

$$\Gamma(x)\Gamma(1-x) = \frac{\pi}{\sin \pi x}, \quad 0 < x < 1.$$

证明

□

命题 8.7

对 $\forall s > 0$, 都有

$$\frac{1}{t^s} = \frac{1}{\Gamma(s)} \int_0^{+\infty} y^{s-1} e^{-ty} dy, \quad \forall t \in \mathbb{R}. \quad (8.35)$$

证明 已知 Γ 函数:

$$\Gamma(s) = \int_0^{+\infty} x^{s-1} e^{-x} dx, \quad s > 0.$$

令 $x = ty$, 其中 $t \in \mathbb{R}$, 得

$$\Gamma(s) = t^s \int_0^{+\infty} y^{s-1} e^{-ty} dy.$$

故

$$\frac{1}{t^s} = \frac{1}{\Gamma(s)} \int_0^{+\infty} y^{s-1} e^{-ty} dy.$$

□

第 9 章 级数

9.1 级数基本结论

9.1.1 级数的敛散性

定理 9.1 (交错级数不等式)

设 $\{a_n\}$ 递减非负数列, 则对 $m, p \in \mathbb{N}_0$, 必有

$$\left| \sum_{n=m}^{m+p} (-1)^n a_n \right| \leq a_m. \quad (9.1)$$



笔记 本不等式是最容易被遗忘的不等式, 应该牢记于心.

证明 不妨设 $m = 0$, 则

$$\sum_{n=0}^p (-1)^n a_n = \begin{cases} a_0 - (a_1 - a_2) - (a_3 - a_4) - \cdots - (a_{p-1} - a_p) & , p \text{ 为偶数} \\ a_0 - (a_1 - a_2) - (a_3 - a_4) - \cdots - (a_{p-2} - a_{p-1}) - a_p & , p \text{ 为奇数} \end{cases} \leq a_0.$$

此外

$$\sum_{n=0}^p (-1)^n a_n = \begin{cases} (a_0 - a_1) + (a_2 - a_3) + \cdots + (a_{p-2} - a_{p-1}) + a_p & , p \text{ 为偶数} \\ (a_0 - a_1) + (a_2 - a_3) + \cdots + (a_{p-1} - a_p) & , p \text{ 为奇数} \end{cases} \geq 0,$$

这就证明了不等式(9.1).

□

定理 9.2 (Leibniz(莱布尼兹) 判别法)

设 $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} u_n$ 为交错级数, 若满足:

(1) 数列 $\{u_n\}_{n=1}^{\infty}$ 单调递减;

(2) $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = 0$,

则级数 $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} u_n$ 收敛, 且其和不超过 u_1 .

□

证明

□

定理 9.3 (A-D 判别法)

级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$ 满足下列条件之一时收敛.

1. $\left\{ \sum_{k=1}^n a_k \right\}_{n=1}^{\infty}$ 有界, b_n 递减到 0;

2. $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, b_n 单调有界.

□

证明 由 Abel 变换, 注意到

$$\sum_{k=n}^m a_k b_k = \sum_{k=n}^{m-1} (b_k - b_{k+1}) \sum_{j=n}^k a_j + b_m \sum_{k=n}^m a_k.$$

于是对于第一种情况, 设

$$M = 2 \sup_{n \geq 1} \left| \sum_{k=1}^n a_k \right|,$$

我们有

$$\left| \sum_{k=n}^m a_k b_k \right| \leq M \sum_{k=n}^{m-1} |b_k - b_{k+1}| + M|b_m| = Mb_n \rightarrow 0, \text{ 当 } n, m \rightarrow \infty.$$

对于第二种情况, 因为 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 故对任何 $\varepsilon > 0$, 当 n 充分大, 对任何 $p \in \mathbb{N}_0$, 必有

$$\left| \sum_{k=n}^{n+p} a_k \right| \leq \varepsilon.$$

于是当 n, m 充分大, 我们有

$$\left| \sum_{k=n}^m a_k b_k \right| \leq \varepsilon \sum_{k=n}^{m-1} |b_k - b_{k+1}| + \varepsilon |b_m| = \varepsilon |b_m - b_n| + \varepsilon |b_m| \leq 3\varepsilon \sup_{n \geq 1} |b_n|.$$

因此无论如何都有级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$ 收敛.

□

定理 9.4 (积分判别法)

若 f 是 $[1, +\infty)$ 的单调不变号函数, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} f(n)$ 和 $\int_1^{\infty} f(x) dx$ 同敛散.

♡

笔记 注意有限项不影响级数收敛性, 有限区间不影响积分收敛性. 方法是我们之前已经反复训练的.

证明 不妨设 f 非负递减, 注意到

$$\int_1^{\infty} f(x) dx = \sum_{n=1}^{\infty} \int_n^{n+1} f(x) dx \leq \sum_{n=1}^{\infty} f(n) \leq f(1) + \sum_{n=2}^{\infty} \int_{n-1}^n f(x) dx = f(1) + \int_1^{\infty} f(x) dx.$$

由夹逼准则即证.

□

定理 9.5 (比值判别法)

对级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n, a_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$, 有如下判别法:

极限版:

1. 若 $\limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} < 1$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;
2. 若 $\limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} > 1$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.

不等式版:

1. 若存在 $N \in \mathbb{N}, \delta \in (0, 1)$ 使得 $\frac{a_{n+1}}{a_n} \leq \delta, \forall n \geq N$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;
2. 若存在 $N \in \mathbb{N}$ 使得 $\frac{a_{n+1}}{a_n} \geq 1, \forall n \geq N$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.

♡

注 极限版的 1 和不等式版的 1 是等价的, 极限版的 2 能推出不等式版的 2, 但不等式版的 2 不能推出极限版的 2.

定理 9.6 (Cauchy 链)

设正值递增函数 $F \in C^1[a, +\infty)$, $\frac{F'}{F}$ 在 $[a, +\infty)$ 递减. 若满足 $\sum_{n=1}^{\infty} F'(n)$ 发散, 则对正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n, a_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$ 有如下判别法:

极限版:

1. 若

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \frac{F'(n)}{a_n}}{\ln F(n)} > 1, \quad (9.2)$$

则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;

2. 若

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \frac{F'(n)}{a_n}}{\ln F(n)} < 1, \quad (9.3)$$

则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.

不等式版:

1. 若存在 $c > 1, N \in \mathbb{N}$ 使得

$$\frac{\ln \frac{F'(n)}{a_n}}{\ln F(n)} \geq c, \forall n \geq N,$$

则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;

2. 若存在 $c \leq 1, N \in \mathbb{N}$ 使得

$$\frac{\ln \frac{F'(n)}{a_n}}{\ln F(n)} \leq c, \forall n \geq N,$$

则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.



笔记 极限版和不等式版的第 1 个结果的条件是等价的, 第 2 个结果不等式版条件要更弱, 因为如果改 (9.3) 为 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \frac{F'(n)}{a_n}}{\ln F(n)} \leq 1$, 则 $\frac{\ln \frac{F'(n)}{a_n}}{\ln F(n)}$ 仍然可能在 n 充分大严格超过 1.

注 取 $F(x) = e^x$, 则

$$\frac{\ln \frac{F'(n)}{a_n}}{\ln F(n)} = \frac{n - \ln a_n}{n} = 1 - \ln \sqrt[n]{a_n},$$

这恰好是根值判别法.

取 $F(x) = x$, 则

$$\frac{\ln \frac{F'(n)}{a_n}}{\ln F(n)} = \frac{-\ln a_n}{\ln n},$$

这恰好是对数判别法.

证明 Step 1 先证明

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = +\infty. \quad (9.4)$$

设 $\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = A$, 则 **积分判别法** 表明

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{F'(n)}{F(n)} \sim \int_a^{\infty} \frac{F'(x)}{F(x)} dx = \ln F(x) \Big|_a^{\infty},$$

即 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{F'(n)}{F(n)}$ 收敛. 但 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{F'(n)}{F(n)} \geq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F'(n)}{A}$, 这就和 $\sum_{n=1}^{\infty} F'(n)$ 发散矛盾! 故我们证明了 (9.4).

Step 4 当 (9.2) 成立, 再利用 (9.4) 式, 存在 $c > 1, N \in \mathbb{N}$ 使得

$$\frac{\ln \frac{F'(n)}{a_n}}{\ln F(n)} \geq c, F(N) > 1, \forall n \geq N.$$

因此

$$\frac{F'(n)}{a_n} \geq e^{c \ln F(n)} \Rightarrow \frac{F'(n)}{F^c(n)} \geq a_n, \forall n \geq N.$$

结合 $\frac{F'(n)}{F^c(n)} = \frac{F'(n)}{F(n)} \cdot \frac{1}{F^{c-1}(n)}$ 递减, 由 **积分判别法**, 我们有

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{F'(n)}{F^c(n)} \sim \int_N^{\infty} \frac{F'(x)}{F^c(x)} dx = \int_{F(N)}^{\infty} \frac{1}{y^c} dy < \infty,$$

因此 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛.

Step 5 若存在 $c \leq 1, N \in \mathbb{N}$ 使得

$$\frac{\ln \frac{F'(n)}{a_n}}{\ln F(n)} \leq c, F(n) \geq 1, \forall n \geq N.$$

根据 **Step 4**, 同样的我们有 $\frac{F'(n)}{F(n)} \leq \frac{F'(n)}{F^c(n)} \leq a_n, \forall n \geq N$ 以及由 **积分判别法** 有

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{F'(n)}{F(n)} \sim \int_N^{\infty} \frac{F'(x)}{F(x)} dx = \int_{F(N)}^{\infty} \frac{1}{y} dy = \infty,$$

因此 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.

□

定理 9.7 (对数判别法)

对正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n, a_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$, 则有如下判别法:

极限版:

1. 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \frac{1}{a_n}}{\ln n} > 1$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;
2. 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \frac{1}{a_n}}{\ln n} < 1$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.

不等式版:

1. 若存在 $c > 1, N \in \mathbb{N}$ 使得

$$\frac{\ln \frac{1}{a_n}}{\ln n} \geq c, \forall n \geq N,$$

则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;

2. 若存在 $c \leq 1, N \in \mathbb{N}$ 使得

$$\frac{\ln \frac{1}{a_n}}{\ln n} \leq c, \forall n \geq N,$$

则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.

♡

定理 9.8 (根值判别法)

对正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, 则有如下判别法:

极限版:

1. 若 $\varliminf_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} < 1$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;
2. 若 $\varliminf_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} > 1$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.

不等式版:

1. 若存在 $c < 1, N \in \mathbb{N}$ 使得

$$\sqrt[n]{a_n} \leq c, \forall n \geq N,$$

则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;

2. 若存在 $c \geq 1$ 和无穷多个 n 使得

$$\sqrt[n]{a_n} \geq c,$$

则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.



注 值得注意的是, 对于**根值判别法**, 这里通过**Cauchy 链**的叙述, 不应该是 $\varlimsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} > 1$, 而应该是 $\varliminf_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} > 1$. 也不应是无穷多个 n , 而是任何 $n \geq N$. 所以我们需要一些加强的证明.

证明 若存在 $c \geq 1$ 和无穷多个 n 使得

$$\sqrt[n]{a_n} \geq c,$$

则存在 $n_k \rightarrow \infty$, 使得

$$\sqrt[n_k]{|a_{n_k}|} \geq c \geq 1 \Rightarrow |a_{n_k}| \geq 1 \Rightarrow \lim_{k \rightarrow \infty} |a_{n_k}| \neq 0,$$

于是 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.

**定理 9.9 (Kummer 链)**

对正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n, a_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$, 设

$$K_n = \frac{1}{d_n} \cdot \frac{a_n}{a_{n+1}} - \frac{1}{d_{n+1}}, n = 1, 2, \dots, d_n > 0, \sum_{n=1}^{\infty} d_n = +\infty,$$

有如下判别法:

极限版:

1. 若 $\varliminf_{n \rightarrow \infty} K_n > 0$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;
2. 若 $\varlimsup_{n \rightarrow \infty} K_n < 0$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.

不等式版:

1. 若存在 $N \in \mathbb{N}, \delta > 0$ 使得 $K_n \geq \delta, \forall n \geq N$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;

2. 若存在 $N \in \mathbb{N}$ 使得 $K_n \leq 0, \forall n \geq N$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.



笔记 极限版和不等式版的第 1 个结果的条件是等价的, 第 2 个结果不等式版条件要更弱. 从证明可以看到, 无论是极限版还是不等式版的 1, 没用到条件 $\sum_{n=1}^{\infty} d_n = +\infty$.

注 当 $d_n = 1, n \in \mathbb{N}$. 我们有 $K_n = \frac{a_n}{a_{n+1}} - 1$, 这恰好就是**比值判别法**.

当 $d_n = \frac{1}{n}, n \in \mathbb{N}$, 我们有 $K_n = n \frac{a_n}{a_{n+1}} - (n+1)$, 这恰好是**拉比判别法**.

当 $d_n = \frac{1}{n \ln n}, n \in \mathbb{N}$, 我们有

$$\begin{aligned} K_n &= n \ln n \cdot \frac{a_n}{a_{n+1}} - (n+1) \ln(n+1) \\ &= n \ln n \cdot \frac{a_n}{a_{n+1}} - (n+1) \ln n - (n+1) \ln \left(1 + \frac{1}{n}\right) \\ &= \ln n \cdot \left[n \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1\right) - 1\right] - (n+1) \ln \left(1 + \frac{1}{n}\right), \end{aligned}$$

即得一个**较为广泛的判别法**. 要注意我们在阶的层面对 K_n 做了变形, 因此不再给出不等式版本的**较为广泛的判别法**.

证明 若存在 $N \in \mathbb{N}, \delta > 0$ 使得 $K_n \geq \delta, \forall n \geq N$, 则

$$\frac{1}{\delta} \left(\frac{a_n}{d_n} - \frac{a_{n+1}}{d_{n+1}} \right) \geq a_{n+1}, \forall n \geq N.$$

现在

$$\sum_{k=N}^m a_{k+1} \leq \sum_{k=N}^m \frac{1}{\delta} \left(\frac{a_k}{d_k} - \frac{a_{k+1}}{d_{k+1}} \right) = \frac{1}{\delta} \left(\frac{a_N}{d_N} - \frac{a_{m+1}}{d_{m+1}} \right) \leq \frac{1}{\delta} \cdot \frac{a_N}{d_N},$$

所以 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛.

若存在 $N \in \mathbb{N}$ 使得 $K_n \leq 0, \forall n \geq N$. 则 $\frac{a_{n+1}}{d_{n+1}} \geq \frac{a_n}{d_n}, \forall n \geq N$. 现在

$$a_{n+1} \geq \frac{a_N}{d_N} d_{n+1}, \forall n \geq N, \sum_{n=1}^{\infty} d_n = +\infty \Rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} a_n = +\infty,$$

这就完成了证明.



定理 9.10 (拉比判别法)

对正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n, a_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$, 有如下判别法:

极限版:

1. 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) > 1$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;
2. 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) < 1$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.

不等式版:

1. 若存在 $N \in \mathbb{N}, \delta > 1$ 使得 $n \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) \geq \delta, \forall n \geq N$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;
2. 若存在 $N \in \mathbb{N}$ 使得 $n \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) \leq 1, \forall n \geq N$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.



证明

□

定理 9.11 (较为广泛的判别法)

对正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n, a_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$, 有如下判别法:

极限版 1:

1. 若 $\varliminf_{n \rightarrow \infty} \ln n \cdot \left[n \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) - 1 \right] > 1$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;
2. 若 $\varliminf_{n \rightarrow \infty} \ln n \cdot \left[n \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) - 1 \right] < 1$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.

极限版 2:

1. 若 $\varliminf_{n \rightarrow \infty} \ln n \left[n \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right] > 1$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛;
2. 若 $\varliminf_{n \rightarrow \infty} \ln n \left[n \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right] < 1$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.

♡

笔记 极限版 2 和极限版 1 在很多情况下是等价的, 极限版 1 就是 Kummer 链的 $d_n = \frac{1}{n \ln n}$ 的情况. 我们这里以大家更熟悉的主流方法来书写一遍判别法证明, 以极限版 2 为例, 考场会更优先使用这种做法.

证明

1. 设 $t > 1, N \in \mathbb{N}$ 使得

$$\ln n \left[n \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right] > t, \forall n \geq N.$$

然后

$$\ln \frac{a_n}{a_{n+1}} > \frac{1}{n} + \frac{t}{n \ln n}, \forall n \geq N.$$

现在求和得

$$\ln \frac{a_N}{a_{N+1}} > \sum_{k=N}^n \left(\frac{1}{k} + \frac{t}{k \ln k} \right), \forall n \geq N.$$

于是

$$a_{n+1} < a_N e^{-\sum_{k=N}^n \left(\frac{1}{k} + \frac{t}{k \ln k} \right)}, \forall n \geq N.$$

现在由 例题 2.53(2) 和 例题 2.49, 我们有

$$\sum_{k=N}^n \frac{1}{k} = \ln n + O(1), \sum_{k=N}^n \frac{1}{k \ln k} = \ln \ln n + O(1), n \rightarrow \infty.$$

于是

$$e^{-\sum_{k=N}^n \left(\frac{1}{k} + \frac{t}{k \ln k} \right)} = e^{-\ln n - \ln \ln n + O(1)} = \frac{e^{O(1)}}{n \ln^t n}.$$

结合 积分判别法 有

$$\sum_{n=N}^{\infty} \frac{1}{n \ln^t n} \sim \int_{10}^{\infty} \frac{1}{x \ln^t x} dx = \int_{\ln 10}^{\infty} \frac{1}{y^t} dy < \infty,$$

我们知道 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛.

2. 设 $0 < t < 1, N \in \mathbb{N}$ 使得

$$\ln n \left[n \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right] < t, \forall n \geq N.$$

然后相似第 1 问的证明和

$$\sum_{n=N}^{\infty} \frac{1}{n \ln^t n} \sim \int_{10}^{\infty} \frac{1}{x \ln^t x} dx = \int_{\ln 10}^{\infty} \frac{1}{y^t} dy = +\infty,$$

我们有 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散.

□

定理 9.12 (Herschfeld 判别法)

设 $p > 1$ 且 $\{a_n\}_{n=1}^{\infty} \subset [0, +\infty)$. 定义

$$t_n = \sqrt[p]{a_1 + \sqrt[p]{a_2 + \cdots + \sqrt[p]{a_n}}}, \quad n \in \mathbb{N},$$

然后 $\{t_n\}_{n=1}^{\infty}$ 收敛的充要条件是 $a_n^{\frac{1}{p^n}}$ 有界. 显然 $\{t_n\}_{n=1}^{\infty}$ 单调递增.

♡

证明 必要性: 若 $\{t_n\}_{n=1}^{\infty}$ 收敛, 则由

$$t_n = \sqrt[p]{a_1 + \sqrt[p]{a_2 + \cdots + \sqrt[p]{a_n}}} \geq \sqrt[p]{0 + \sqrt[p]{0 + \cdots + \sqrt[p]{a_n}}} = a_n^{\frac{1}{p^n}}$$

和 $\{t_n\}_{n=1}^{\infty}$ 有界知 $a_n^{\frac{1}{p^n}}$ 有界.

充分性: 若 $a_n^{\frac{1}{p^n}}$ 有界, 则设 $a_n^{\frac{1}{p^n}} \leq M, \forall n \in \mathbb{N}$, 于是我们有 $a_n \leq M^{p^n}, \forall n \in \mathbb{N}$. 因此

$$\begin{aligned} t_n &= \sqrt[p]{a_1 + \sqrt[p]{a_2 + \cdots + \sqrt[p]{a_n}}} \leq \sqrt[p]{M^p + \sqrt[p]{M^{p^2} + \cdots + \sqrt[p]{M^{p^n}}}} \\ &= M \sqrt[p]{1 + \sqrt[p]{1 + \cdots + \sqrt[p]{1}}} \leq M \lim_{n \rightarrow \infty} \underbrace{\sqrt[p]{1 + \sqrt[p]{1 + \cdots + \sqrt[p]{1}}}}_{n \text{ 个根号}}, \end{aligned}$$

其中最后一个不等号的极限存在性可以考虑递增函数确定的递推

$$x_1 = \sqrt[p]{1}, \quad x_{n+1} = \sqrt[p]{1 + x_n}, \quad n \in \mathbb{N}.$$

注意到 $x_2 = \sqrt[p]{2} > 1 = x_1$, 不动点 $x_0 > 1$ 满足 $x_0^p - x_0 - 1 = 0$. 因此由**命题 2.17**知 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ 递增有上界, 从而极限存在.

□

命题 9.1

若 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n k a_k}{n} = 0$.

◆



笔记 这个命题是一个重要的需要记忆的结论, 在很多难题时可能是一个很微不足道的中间步骤, 但却会把人卡住.

这个命题是**命题 6.6**的离散版本.

注 此外, 此类问题还不是直接应用 Stolz 定理就可以的. 笔记如果我们直接使用 Stolz 定理, 就有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n k a_k}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n a_n}{n - (n - 1)} = \lim_{n \rightarrow \infty} n a_n.$$

遗憾的是, 上式最后的极限可能不存在, 而 Stolz 定理不可以逆用.

证明 记 $s_k = \sum_{i=1}^k a_i$, 则由**Abel 变换**及 Stolz 公式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n k a_k}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{n-1} [k - (k + 1)] s_k + n s_n}{n}$$

$$\begin{aligned}
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(s_n - \frac{\sum_{k=1}^{n-1} s_k}{n} \right) \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} s_n - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{n-1} s_k}{n} = 0.
\end{aligned}$$

□

命题 9.2

设 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 则

1. 若 a_n 单调, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} n a_n = 0$.
2. 若 $n a_n$ 单调, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \ln n \cdot a_n = 0$.
3. 若 $n \ln n \cdot a_n$ 单调, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \ln n \cdot \ln \ln n \cdot a_n = 0$.

◆

证明

1. 不妨设 a_n 递减, 否则考虑 $-a_n$ 即可. 因为收敛级数末项趋于 0, 所以我们知道 a_n 递减到 0. 注意到由 a_n 递减知

$$0 \leq 2na_{2n} \leq 2 \sum_{k=n+1}^{2n} a_k, \quad 0 \leq (2n-1)a_{2n-1} \leq 2na_{2n-1} \leq 2 \sum_{k=n}^{2n-1} a_k.$$

现在由 Cauchy 收敛准则知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} 2na_{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} (2n-1)a_{2n-1} = 0.$$

由命题 1.1 知 $\lim_{n \rightarrow \infty} n a_n = 0$.

2. 不妨设 $n a_n$ 递减, 否则考虑 $-a_n$ 即可. 因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} n a_n = c \neq 0$ 会导致 $a_n \sim \frac{c}{n}$, 进而 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散, 所以我们知道 $n a_n$ 递减到 0.

我们有

$$\begin{aligned}
\sum_{\sqrt{n}-1 \leq k \leq n-1} a_k &= \sum_{\sqrt{n}-1 \leq k \leq n-1} \frac{ka_k}{k} \geq n a_n \sum_{\sqrt{n}-1 \leq k \leq n-1} \frac{1}{k} \geq n a_n \sum_{\sqrt{n}-1 \leq k \leq n-1} \int_k^{k+1} \frac{1}{x} dx \\
&= n a_n \int_{\lfloor \sqrt{n} \rfloor}^n \frac{1}{x} dx = n a_n \ln \frac{n}{\lfloor \sqrt{n} \rfloor} \geq n a_n \ln \frac{n}{\sqrt{n}} = \frac{1}{2} n a_n \ln n \geq 0,
\end{aligned}$$

利用 Cauchy 收敛准则和夹逼准则我们得到 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \ln n \cdot a_n = 0$.

3. 不妨设 $n \ln n \cdot a_n$ 递减, 否则考虑 $-a_n$ 即可. 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} (n \ln n \cdot a_n) = c \neq 0$. 注意到 $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n \ln n}$ 发散, $\sum_{n=2}^{\infty} a_n$ 收敛, 这就和比较判别法矛盾! 因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} (n \ln n \cdot a_n) = 0$, 从而 $a_n \geq 0$.

注意到

$$\begin{aligned}
\sum_{[\ln n] \leq k \leq n} a_k &= \sum_{[\ln n] \leq k \leq n} \frac{k \ln k \cdot a_k}{k \ln k} \geq n \ln n \cdot a_n \sum_{[\ln n] \leq k \leq n} \frac{1}{k \ln k} \\
&\geq n \ln n \cdot a_n \sum_{[\ln n] \leq k \leq n} \int_k^{k+1} \frac{1}{x \ln x} dx = n \ln n \cdot a_n \int_{[\ln n]}^{n+1} \frac{1}{x \ln x} dx \\
&= n \ln n \cdot a_n \cdot \ln \frac{\ln(n+1)}{\ln[\ln n]} \geq n \ln n \cdot a_n \cdot \ln \frac{\ln n}{\ln \ln n} \sim n \ln n \cdot \ln \ln n \cdot a_n,
\end{aligned}$$

利用 Cauchy 收敛准则就证明了 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \ln n \cdot \ln \ln n \cdot a_n = 0$.

□

例题 9.1 设 $a_n \downarrow 0$, 证明: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{n}$ 收敛的充要条件是 $\{a_n \ln n\}$ 有界且 $\sum_{n=1}^{\infty} (a_n - a_{n+1}) \ln n$ 收敛.

证明 利用 Abel 变换得

$$\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k} = \sum_{k=1}^{n-1} (a_k - a_{k+1}) \sum_{i=1}^k \frac{1}{i} + a_n \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}, \quad \forall n \in \mathbb{N}. \quad (9.5)$$

由 Stolz 公式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k}}{\ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n+1}}{\ln \left(1 + \frac{1}{n}\right)} = 1,$$

故

$$\sum_{k=1}^{n-1} (a_k - a_{k+1}) \sum_{i=1}^k \frac{1}{i} \sim \sum_{k=1}^{n-1} (a_k - a_{k+1}) \ln k, \quad n \rightarrow \infty. \quad (9.6)$$

$$a_n \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \sim a_n \ln n, \quad n \rightarrow \infty. \quad (9.7)$$

充分性: 因为 $\sum_{k=1}^{\infty} (a_k - a_{k+1}) \ln k < +\infty$, 所以由(9.6)(9.7)式知 $\sum_{k=1}^{\infty} (a_k - a_{k+1}) \sum_{i=1}^k \frac{1}{i} < +\infty$. 又由 $\{a_n \ln n\}$ 有界知 $\{a_n \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}\}$ 有界. 因此由(9.5)式知 $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{k} < +\infty$.

必要性: 若 $\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k} < +\infty$, 则由(9.5)式可知

$$\sum_{k=1}^{\infty} (a_k - a_{k+1}) \sum_{i=1}^k \frac{1}{i} \leq \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{k} < +\infty,$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \leq \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{k} < +\infty.$$

于是再由(9.6)(9.7)式可得

$$\sum_{k=1}^{\infty} (a_k - a_{k+1}) \ln k < +\infty,$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \ln n < +\infty \implies \{a_n \ln n\} \text{ 有界.}$$

□

定理 9.13 (级数的控制收敛定理)

设 $a_n(s), n = 1, 2, \dots$ 满足

$$|a_n(s)| \leq c_n, \sum_{n=1}^{\infty} c_n < \infty,$$

以及 $\lim_s a_n(s) = b_n \in \mathbb{R}$.

则

$$\lim_s \sum_{n=1}^{\infty} a_n(s) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n,$$

这里 \lim_s 表示 s 趋于某个 $s_0 \in \mathbb{R} \cup \{-\infty, +\infty\}$.

♡

证明 事实上由极限保号性, 我们知道 $|b_n| \leq c_n, n = 1, 2, \dots$, 因此 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 绝对收敛, 从而

$$\left| \sum_{n=1}^{\infty} a_n(s) - \sum_{n=1}^{\infty} b_n \right| \leq \left| \sum_{n=1}^m (a_n(s) - b_n) \right| + \sum_{n=m+1}^{\infty} |a_n(s) - b_n|$$

$$\leq \left| \sum_{n=1}^m (a_n(s) - b_n) \right| + 2 \sum_{n=m+1}^{\infty} c_n.$$

对 s 取极限得

$$\lim_s \left| \sum_{n=1}^{\infty} a_n(s) - \sum_{n=1}^{\infty} b_n \right| \leq 2 \sum_{n=m+1}^{\infty} c_n.$$

由 m 任意性及 $\sum_{n=1}^{\infty} c_n$ 收敛的 Cauchy 收敛准则得

$$\lim_s \left| \sum_{n=1}^{\infty} a_n(s) - \sum_{n=1}^{\infty} b_n \right| = 0.$$

我们完成了级数控制收敛定理的证明. □

例题 9.2 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{k}{n} \right)^n$.

解 注意到

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{k}{n} \right)^n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{n-k}{n} \right)^n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{\infty} \left(1 - \frac{k}{n} \right)^n \chi_{\{1, 2, \dots, n-1\}}(k), \quad (9.8)$$

并且

$$\left| \left(1 - \frac{k}{n} \right)^n \chi_{\{1, 2, \dots, n-1\}}(k) \right| \leq e^{n \ln(1 - \frac{k}{n})} \leq e^{n \cdot (-\frac{k}{n})} = e^{-k}.$$

又 $\sum_{k=1}^{\infty} e^{-k} < \infty$, 故由级数的控制收敛定理及(9.8)式可知

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{k}{n} \right)^n &= \sum_{k=1}^{\infty} \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{k}{n} \right)^n \chi_{\{1, 2, \dots, n-1\}}(k) = \sum_{k=1}^{\infty} e^{-k} \\ &= \frac{e^{-1}}{1 - e^{-1}} = \frac{1}{e - 1}. \end{aligned}$$

□

定理 9.14 (级数的 Levi 定理)

若非负 $a_n(s), n = 1, 2, \dots$ 满足 $a_n(s)$ 是 s 的关于趋近方向的递增函数 (注意如果取极限的方式是 $s \rightarrow s_0^+$, 那么应该是关于 s 的递减函数) 且

$$\lim_s a_n(s) = b_n \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}.$$

证明

$$\lim_s \sum_{n=1}^{\infty} a_n(s) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n.$$

♡

 **笔记** 本定理即使级数发散, 极限数列发散, 也能使用.

证明 若 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 收敛, 那么由于 $0 \leq a_n(s) \leq b_n$, 取控制级数 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 即可使用控制收敛定理得到

$$\lim_s \sum_{n=1}^{\infty} a_n(s) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n.$$

若 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 发散, 由于 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n(s)$ 也单调递增, 故 $\lim_s \sum_{n=1}^{\infty} a_n(s)$ 广义存在. 假设

$$\lim_s \sum_{n=1}^{\infty} a_n(s) = m < \infty,$$

此时对任何 $N \in \mathbb{N}$, 都有

$$\sum_{n=1}^N b_n = \lim_s \sum_{n=1}^N a_n(s) \leq \lim_s \sum_{n=1}^{\infty} a_n(s) = m < \infty,$$

矛盾! 我们完成了 Levi 定理的证明.

□

引理 9.1 (级数的 Fatou 引理)

设非负数列 $a_n(s), n = 1, 2, \dots$, 则

$$\sum_{n=1}^{\infty} \lim_s a_n(s) \leq \lim_s \sum_{n=1}^{\infty} a_n(s).$$

♡



笔记 本定理即使级数发散, 极限数列发散, 也能使用.

证明 不妨设 $s \rightarrow +\infty$, 考虑 $g_n(s) \triangleq \inf_{t \geq s} a_n(t)$, 则 g_n 关于趋于方向递增非负, 所以由 **级数的 Levi 定理** 知

$$\sum_{n=1}^{\infty} \lim_s a_n(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \lim_s g_n(s) = \lim_s \sum_{n=1}^{\infty} g_n(s) = \lim_s \sum_{n=1}^{\infty} \inf_{t \geq s} a_n(t) \leq \lim_s \sum_{n=1}^{\infty} a_n(s),$$

这就完成了证明.

□

定理 9.15 (级数的 Fubini 定理)

满足下述条件之一时, 必有

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{m,n} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} a_{m,n}. \quad (9.9)$$

1. $a_{m,n} \geq 0, \forall m, n \in \mathbb{N}$;
2. $\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} |a_{m,n}| < \infty$.

♡



笔记 第一个条件级数发散也能用, 再一次体现思想: 非负级数无脑换.

证明

1. 由 **级数的 Levi 定理**. 我们注意到 $\{\sum_{n=1}^N a_{m,n}\}$ 关于 N 非负递增, 于是有

$$\sum_{m=1}^{\infty} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N a_{m,n} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^N a_{m,n} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^N a_{m,n} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} a_{m,n}, \quad (9.10)$$

这就是 (9.9).

2. 注意到

$$\sum_{m=1}^{\infty} \left| \sum_{n=1}^N a_{m,n} \right| \leq \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} |a_{m,n}| < \infty,$$

于是由 **级数的控制收敛定理** 知 (9.10) 仍然成立, 这就是 (9.9).

□

定理 9.16 (级数加括号的理解)

1. 收敛级数任意加括号也收敛且收敛到同一个值.
2. 级数加括号之后收敛, 且括号内每个元素符号相同, 则原级数收敛, 且级数值和如此加括号后一致.

♡

证明

1. 设加括号后新的级数是 $\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=n_k+1}^{n_{k+1}} a_j$, 其中 n_k 递增趋于 $+\infty$. 则

$$\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=n_k+1}^{n_{k+1}} a_j = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^m \sum_{j=n_k+1}^{n_{k+1}} a_j = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{j=n_1+1}^{n_{m+1}} a_j = \sum_{j=n_1+1}^{\infty} a_j,$$

这就完成了证明.

2. 即证明对严格递增的 $\{n_k\}_{k=1}^{\infty} \subset \mathbb{N}$, $n_1 = 0$, 如果 $\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=n_k+1}^{n_{k+1}} a_j$ 收敛且对任何 $k \in \mathbb{N}$ 都有 $a_{n_k+1}, a_{n_k+2}, \dots, a_{n_{k+1}}$

将符号相同, 则 $\sum_{j=1}^{\infty} a_j$ 收敛且

$$\sum_{j=1}^{\infty} a_j = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=n_k+1}^{n_{k+1}} a_j. \quad (9.11)$$

事实上, 对每个 $n \in \mathbb{N}$, 存在唯一的 $m \in \mathbb{N}$, 使得 $n_m < n \leq n_{m+1}$, 此时

$$\sum_{j=1}^n a_j = \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{j=n_k+1}^{n_{k+1}} a_j + \sum_{j=n_m+1}^n a_j.$$

则当 $a_j \geq 0, n_m < j \leq n_{m+1}$, 我们有

$$\sum_{j=1}^n a_j \geq \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{j=n_k+1}^{n_{k+1}} a_j, \sum_{j=1}^n a_j = \sum_{k=1}^m \sum_{j=n_k+1}^{n_{k+1}} a_j - \sum_{j=n+1}^{n_{m+1}} a_j \leq \sum_{k=1}^m \sum_{j=n_k+1}^{n_{k+1}} a_j. \quad (9.12)$$

若 $a_j \leq 0, n_m < j \leq n_{m+1}$, 可得 (9.12) 的类似式

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=n_k+1}^{n_{k+1}} a_j \leq \sum_{j=1}^n a_j \leq \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{j=n_k+1}^{n_{k+1}} a_j. \quad (9.13)$$

让 $n \rightarrow +\infty$, 我们由 (9.12)(9.13) 和夹逼准则得 (9.11). 这就完成了证明.

□

命题 9.3

若 $a_n \downarrow 0$ 且 $\sum_{k=1}^n (a_k - a_n)$ 有界, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛.



证明 由 $\{a_n\}$ 递减可得, 对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 都有

$$\sum_{k=1}^m a_k - ma_n \leq \sum_{k=1}^m a_k - ma_n + \sum_{k=m+1}^n (a_k - a_n) = \sum_{k=1}^n a_k - na_n = \sum_{k=1}^n (a_k - a_n).$$

令 $n \rightarrow \infty$ 得, 由 $a_n \downarrow 0$ 和 $\sum_{k=1}^n (a_k - a_n)$ 有界知, 存在 $C > 0$, 使得

$$\sum_{k=1}^m a_k \leq \sum_{k=1}^n (a_k - a_n) < C, \quad \forall m \in \mathbb{N}.$$

令 $m \rightarrow \infty$ 得 $\sum_{k=1}^{\infty} a_k < C$.

□

命题 9.4

1. 设 $\{a_n\}_{n=1}^{\infty} \subset [0, +\infty)$, $S_n = \sum_{k=1}^n a_k$, $n \in \mathbb{N}$. 若 $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ 不恒为 0, 不妨设 $a_1 \neq 0$, 则有

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{S_n^p} \begin{cases} \text{收敛,} & p > 1, \\ \text{和 } \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{ 同敛散,} & 0 < p \leq 1. \end{cases}$$

2. 对 $p > 0$ 和收敛级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, $a_n > 0$, 定义 $R_n = \sum_{k=n+1}^{\infty} a_k$, $n = 0, 1, 2, \dots$, 证明

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{R_{n-1}^p} = \begin{cases} \text{收敛,} & 0 < p < 1, \\ \text{发散,} & p \geq 1. \end{cases}$$

笔记 本结果虽然不能直接使用, 但连同证明方法却要记住! 并且要学会联想和转化到本题的样子, 例如

$$\sum \left(1 - \frac{a_{n+1}}{a_n} \right), \sum \left(\frac{\ln \frac{a_n}{a_{n+1}}}{\ln a_n} \right)$$

等结构.

证明

1. 当 $p > 1$, 注意到

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{a_n}{S_n^p} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{S_n - S_{n-1}}{S_n^p} = \sum_{n=2}^{\infty} \int_{S_{n-1}}^{S_n} \frac{1}{S_n^p} dx \leq \sum_{n=2}^{\infty} \int_{S_{n-1}}^{S_n} \frac{1}{x^p} dx = \int_{S_1}^{\sum_{n=1}^{\infty} a_n} \frac{1}{x^p} dx,$$

可以看到无论 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛性如何都有 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{S_n^p}$ 收敛.

当 $0 < p \leq 1$, 若 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 则有 $\frac{a_n}{S_n^p} \sim \frac{a_n}{\left(\sum_{n=1}^{\infty} a_n \right)^p} = ca_n$, $n \rightarrow \infty$, 其中 c 是某个常数, 故 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{S_n^p}$ 收敛. 当

$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散, 我们对任何充分大的 $m, k \in \mathbb{N}$ 都有

$$1 - \frac{S_k}{S_{k+m}} = \frac{S_{k+m} - S_k}{S_{k+m}} = \sum_{n=k+1}^{k+m} \frac{a_n}{S_{k+m}} \leq \sum_{n=k+1}^{k+m} \frac{a_n}{S_n} \leq \sum_{n=k+1}^{k+m} \frac{a_n}{S_n^p}.$$

让 $m \rightarrow +\infty$, 利用 $S_{k+m} \rightarrow +\infty$, 于是我们有余项不能任意小, 因此由 Cauchy 收敛准则知 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{S_n^p}$ 发散. 这就完成了证明.

2. 一方面

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{R_{n-1}^p} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_{n-1} - R_n}{R_{n-1}^p} \leq \sum_{n=1}^{\infty} \int_{R_n}^{R_{n-1}} \frac{1}{x^p} dx = \int_0^{R_0} \frac{1}{x^p} dx.$$

故当 $0 < p < 1$ 有 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{R_{n-1}^p}$ 收敛.

另外一方面, 当 $p \geq 1$, 对 $m, t \in \mathbb{N}^*$, 有

$$\sum_{n=m}^{m+t} \frac{a_n}{R_{n-1}^p} = \sum_{n=m}^{m+t} \frac{R_{n-1} - R_n}{R_{n-1}^p} \geq \sum_{n=m}^{m+t} \frac{R_{n-1} - R_n}{R_{m-1}^p} = \frac{R_{m-1} - R_{m+t}}{R_{m-1}^p}.$$

注意 $\lim_{t \rightarrow +\infty} R_{m+t} = 0$, 故

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \sum_{n=m}^{m+t} \frac{a_n}{R_{n-1}^p} \geq \begin{cases} 1, & p = 1, \\ \frac{1}{R_{m-1}^{p-1}} \geq \frac{1}{R_0^{p-1}} > 0, & p > 1. \end{cases}$$

即 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{R_{n-1}^p}$ 发散.

□

9.1.2 Riemann 重排定理

定理 9.17 (Riemann 重排定理)

设实级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 条件收敛. 则对 $\forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}$ 且 $-\infty \leq \alpha < \beta \leq +\infty$, 都存在级数的重排 $\sum_{n=1}^{\infty} a'_n$ 使得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} S'_n = \beta, \quad \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} S'_n = \alpha, \quad (9.14)$$

这里 S'_n 是重排级数的部分和. 特别地, 对 $\forall L \in \mathbb{R}$, 都存在级数的重排 $\sum_{n=1}^{\infty} a'_n$ 使得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S'_n = L.$$

♡

笔记 定理叙述和证明思想都同等重要. 本结果比通常的黎曼重排定理要强. 证明的核心想法就是如果比 β 大, 则下一项加入负部来调小. 如果比 α 小了, 则下一项加入正部来调大.

注 重排的严格叙述是: 存在一个双射 $\sigma : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$, 使得级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_{\sigma(n)}$ 满足(9.14)式. 因此排列 $1, 3, 5, \dots, 2, 4, \dots$ 是无意义的.

证明 考虑

$$p_n \triangleq \frac{a_n + |a_n|}{2}, \quad q_n \triangleq \frac{a_n - |a_n|}{2}, \quad (9.15)$$

则

$$p_n + q_n = |a_n|, \quad p_n - q_n = a_n. \quad (9.16)$$

级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 条件收敛知正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} p_n, \sum_{n=1}^{\infty} q_n$ 都发散. 现在把 a_n 中非负的项依此记作 P_1, P_2, \dots , 负的项的绝对值依此记作 Q_1, Q_2, \dots .

当 $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$, 选取最小的 $m_1, k_1 \in \mathbb{N}$ 使得

$$\sum_{i=1}^{m_1} P_i > \beta, \quad \sum_{i=1}^{m_1} P_i - \sum_{j=1}^{k_1} Q_j < \alpha.$$

选取最小的 $m_2, k_2 \in \mathbb{N}$ 使得

$$\sum_{i=1}^{m_1} P_i - \sum_{j=1}^{k_1} Q_j + \sum_{i=m_1+1}^{m_2} P_i > \beta, \quad \sum_{i=1}^{m_1} P_i - \sum_{j=1}^{k_1} Q_j + \sum_{i=m_1+1}^{m_2} P_i - \sum_{j=k_1+1}^{k_2} Q_j < \alpha.$$

现在依次下去得到一个重排级数:

$$\sum_{i=1}^{m_1} P_i - \sum_{j=1}^{k_1} Q_j + \sum_{i=m_1+1}^{m_2} P_i - \sum_{j=k_1+1}^{k_2} Q_j + \dots$$

设部分和的子列刚好是加到 $P_{m_{n-1}}$ 这种形式, 也就是说

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{第一项: } P_1 + \cdots + P_{m_1-1}; \\ \text{第二项: } P_1 + \cdots + P_{m_1} - Q_1 - \cdots - Q_{k_1} + P_{m_1+1} + \cdots + P_{m_2-1}; \\ \text{第三项: } \cdots + P_{m_2+1} + \cdots + P_{m_3-1}; \\ \vdots \end{array} \right.$$

现在

$$(\cdots + P_{m_{n-1}+1} + \cdots + P_{m_n-1}) + P_{m_n} > \beta, (\cdots + P_{m_{n-1}+1} + \cdots + P_{m_n-1}) \leq \beta,$$

因此

$$0 \leq \beta - (\cdots + P_{m_{n-1}+1} + \cdots + P_{m_n-1}) < P_{m_n}.$$

注意到 $\lim_{n \rightarrow \infty} P_{m_n} = 0$, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\cdots + P_{m_{n-1}+1} + \cdots + P_{m_n-1}) = \beta.$$

类似的, 设部分和子列刚好是加到 $Q_{k_{n-1}}$ 这种形式并有

$$0 \leq (\cdots - Q_{k_{n-1}+1} - \cdots - Q_{k_n-1}) - \alpha < Q_{k_n}, \lim_{n \rightarrow \infty} Q_{k_n} = 0.$$

于是

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\cdots - Q_{k_{n-1}+1} - \cdots - Q_{k_n-1}) = \alpha.$$

此外显然有上极限不超过 β , 下极限不小于 α , 这就证明了(9.14).

当 α, β 可以取 ∞ 时, 可取 $\{\alpha_n\}, \{\beta_n\} \subset \mathbb{R}$ 使得 $\alpha_n < \beta_n, \alpha_n \rightarrow \alpha, \beta_n \rightarrow \beta$. 考虑

$$\left(\cdots + \sum_{j=m_{n-1}+1}^{m_n} P_j \right) > \beta_n, \left(\cdots - \sum_{j=k_{n-1}+1}^{k_n} Q_j \right) < \alpha_n,$$

即可完成构造并类似得到(9.14). □

例题 9.3 若正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{a_n}$ 收敛, 证明: 级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}$ 也收敛.

证明 从条件可见正数数列 $\{a_n\}$ 为正无穷大量. 以下分两步来做.

(1) 若数列 $\{a_n\}$ 单调增加, 则有

$$a_1 + a_2 + \cdots + a_{2n-1} \geq a_n + a_{n+1} + \cdots + a_{2n-1} \geq n a_n,$$

因此有不等式:

$$\frac{2n-1}{a_1 + a_2 + \cdots + a_{2n-1}} + \frac{2n}{a_1 + a_2 + \cdots + a_{2n}} \leq \frac{2n-1}{n a_n} + \frac{2n}{n a_n} < \frac{4}{a_n},$$

从而级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}$ 的部分和数列有上界, 因此收敛. 同时还得到

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{a_1 + a_2 + \cdots + a_n} \leq 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{a_n}.$$

(2) 对于一般情况, 将数列 $\{a_n\}$ 按照从小到大重排, 并将重排后的数列记为 $\{b_n\}$. 由于收敛的正项级数在重排后仍收敛, 因此级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{b_n}$ 收敛. 利用(1)知道级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{b_1 + b_2 + \cdots + b_n}$ 收敛. 同时容易看出对每个 n 成立不等式

$$b_1 + b_2 + \cdots + b_n \leq a_1 + a_2 + \cdots + a_n,$$

因此就有

$$\frac{n}{a_1 + a_2 + \cdots + a_n} \leq \frac{n}{b_1 + b_2 + \cdots + b_n},$$

于是从比较判别法就知道级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{a_1 + a_2 + \dots + a_n}$ 收敛.

□

9.1.3 幂级数阶与系数阶的关系

定理 9.18 (幂级数系数的阶蕴含幂级数和函数的阶)

(1) 设

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, g(x) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n, x \in (-1, 1) \quad (9.17)$$

满足

$$b_n > 0, \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = 0, \lim_{x \rightarrow 1^-} g(x) = +\infty, \quad (9.18)$$

则

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} \frac{f(x)}{g(x)} = 0. \quad (9.19)$$

(2) 设

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, g(x) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n, x \in (-1, 1)$$

满足

$$b_n > 0, \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = 1, \lim_{x \rightarrow 1^-} g(x) = +\infty, \quad (9.20)$$

则

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} \frac{f(x)}{g(x)} = 1. \quad (9.21)$$

(3) 设

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, g(x) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n, x \in \mathbb{R} \quad (9.22)$$

满足

$$b_n > 0, \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = 0, \quad (9.23)$$

则

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = 0. \quad (9.24)$$

(4) 设

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, g(x) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n, x \in \mathbb{R} \quad (9.25)$$

满足

$$b_n > 0, \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = 1, \quad (9.26)$$

则

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = 1. \quad (9.27)$$

♡

注 一句话总结本结论: 即幂级数系数的阶蕴含幂级数和函数的阶.

证明

(1) 注意到

$$\frac{f(x)}{g(x)} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{b_n} \frac{b_n x^n}{\sum_{k=0}^{\infty} b_k x^k}.$$

我们有

$$0 \leq \lim_{x \rightarrow 1^-} \frac{b_n x^n}{\sum_{k=0}^{\infty} b_k x^k} = \lim_{x \rightarrow 1^-} \frac{b_n x^n}{g(x)} = 0.$$

由Toeplitz 定理 (b) 以及 (9.18) 即得 (9.19).

(2) 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n - b_n}{b_n} = 0$ 和 (1) 问知

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} \frac{f(x) - g(x)}{g(x)} = 0,$$

即得 (9.21).

(3) 注意到

$$\frac{f(x)}{g(x)} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{b_n} \frac{b_n x^n}{\sum_{k=0}^{\infty} b_k x^k}.$$

我们有

$$0 \leq \frac{b_n x^n}{\sum_{k=0}^{\infty} b_k x^k} \leq \frac{b_n x^n}{b_n x^n + b_{n+1} x^{n+1}} = \frac{b_n}{b_n + b_{n+1} x},$$

即 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{b_n x^n}{\sum_{k=0}^{\infty} b_k x^k} = 0$. 由Toeplitz 定理 (b) 以及 (9.23) 我们就得到 (9.24).

(4) 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n - b_n}{b_n} = 0$ 和 (3) 问知

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} \frac{f(x) - g(x)}{g(x)} = 0,$$

即得 (9.27).

□

例题 9.4 设 p 是 \mathbb{R} 上实解析函数且 $0 < \prod_{n=0}^{\infty} p^{(n)}(0) < \infty$, 求 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{p'(x)}{p(x)}$.

证明 注意到

$$1 = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\prod_{n=0}^{m+1} p^{(n)}(0)}{\prod_{n=0}^m p^{(n)}(0)} = \lim_{m \rightarrow \infty} p^{(m)}(0),$$

所以 $\{p^{(n)}(0)\}_{n=0}^{\infty}$ 是有界数列, 故

$$p(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{p^{(n)}(0)}{n!} x^n, x \in \mathbb{R}.$$

在 \mathbb{R} 上有定义且收敛. 于是

$$p'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{p^{(n+1)}(0)}{n!} x^n, x \in \mathbb{R}.$$

由定理 9.18(3), 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{p^{(n)}(0)}{n!}}{\frac{p^{(n+1)}(0)}{n!}} = 1 \Rightarrow \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{p'(x)}{p(x)} = 1.$$

□

例题 9.5 计算

$$\sum_{n=1}^{\infty} \ln n \cdot x^n \sim \frac{\ln \frac{1}{1-x}}{1-x}, x \rightarrow 1^-.$$

解 注意到

$$\ln n \sim 1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}, n \rightarrow \infty.$$

由定理 9.18 可知

$$\sum_{n=1}^{\infty} \ln n \cdot x^n \sim \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}\right) x^n \xrightarrow{\text{例题 9.32}} \frac{-\ln(1-x)}{1-x} = \frac{\ln \frac{1}{1-x}}{1-x}, x \rightarrow 1^-.$$

□

例题 9.6 证明:

$$\lim_{y \rightarrow 1^-} \frac{1}{\ln(1-y)} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{(1-x^2)(1-y^2x^2)}} = -\frac{1}{2}.$$

证明 注意到

$$(1+x)^{-\frac{1}{2}} = \sum_{k=0}^{\infty} C_{-\frac{1}{2}}^k x^k = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left(-\frac{1}{2}\right) \left(-\frac{1}{2}-1\right) \cdots \left(-\frac{1}{2}-k+1\right)}{k!} x^k = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (2k-1)!!}{2^k k!} x^k = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (2k-1)!!}{(2k)!!} x^k.$$

于是

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1-x^2} \sqrt{1-y^2x^2}} &= \int_0^1 \frac{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-1)!!}{2^k k!} x^{2k} y^{2k}}{\sqrt{1-x^2}} dx = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{(2k-1)!!}{(2k)!!} \int_0^1 \frac{x^{2k}}{\sqrt{1-x^2}} dx \right] y^{2k} \\ &\xrightarrow{x=\cos \theta} \frac{\pi}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{(2k-1)!!}{(2k)!!} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{2k} \theta d\theta \right] y^{2k} = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{(2k-1)!!}{(2k)!!} \right]^2 y^{2k}. \end{aligned}$$

又由 Wallis 公式知

$$\frac{(2k)!!}{(2k-1)!!} \sim \sqrt{\pi k}, k \rightarrow \infty.$$

故由定理 9.18 可得

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1-x^2} \sqrt{1-y^2x^2}} &\sim \frac{\pi}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{y^{2k}}{\pi k} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(y^2)^k}{k} = -\frac{1}{2} \ln(1-y^2) \\ &= -\frac{1}{2} \ln(1-y) - \frac{1}{2} \ln(1+y) \sim -\frac{1}{2} \ln(1-y), y \rightarrow 1^-. \end{aligned}$$

□

例题 9.7 证明

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{x^n}{\ln n} \sim \frac{1}{(1-x) \ln \frac{1}{1-x}}, x \rightarrow 1^-.$$

证明 注意到 $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{x^n}{\ln n}$ 在 $(-1, 1)$ 上绝对收敛, 由 Cauchy 积收敛定理及推论 9.1 可知

$$-\ln(1-x) \sum_{n=2}^{\infty} \frac{x^n}{\ln n} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \frac{x^n}{\ln n} \xrightarrow{\text{推论 9.1}} \sum_{n=3}^{\infty} \left(\sum_{k=2}^{n-1} \frac{1}{\ln k (n-k)} \right) x^n.$$

下证 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=2}^{n-1} \frac{1}{(n-k) \ln k} = 1$. 一方面, 我们有

$$\sum_{k=2}^{n-1} \frac{1}{(n-k) \ln k} \geq \sum_{k=2}^{n-1} \frac{1}{(n-k) \ln(n-1)} = \frac{\sum_{k=1}^{n-2} \frac{1}{k}}{\ln(n-1)} \rightarrow 1, n \rightarrow \infty.$$

另一方面, 对 $\forall \varepsilon \in (0, 1)$, 我们有

$$\begin{aligned} \sum_{k=2}^{n-1} \frac{1}{(n-k) \ln k} &\leq \sum_{2 \leq k \leq \varepsilon n} \frac{1}{(n-k) \ln k} + \sum_{\varepsilon n \leq k \leq n-1} \frac{1}{(n-k) \ln k} \\ &\leq \frac{1}{n(1-\varepsilon)} \sum_{2 \leq k \leq \varepsilon n} \frac{1}{\ln 2} + \sum_{\varepsilon n \leq k \leq n-1} \frac{1}{(n-k) \ln \varepsilon n} \\ &\leq \frac{\varepsilon n}{n(1-\varepsilon) \ln 2} + \frac{\sum_{\varepsilon n \leq k \leq n-1} \frac{1}{k}}{\ln \varepsilon + \ln n}. \end{aligned}$$

令 $n \rightarrow \infty$ 得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=2}^{n-1} \frac{1}{(n-k) \ln k} \leq \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon) \ln 2} + 1.$$

再令 $\varepsilon \rightarrow 0^+$ 得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=2}^{n-1} \frac{1}{(n-k) \ln k} \leq 1.$$

故由夹逼准则知 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=2}^{n-1} \frac{1}{(n-k) \ln k} = 1$. 于是由定理 9.18 可知

$$-\ln(1-x) \sum_{n=2}^{\infty} \frac{x^n}{\ln n} = \sum_{n=3}^{\infty} \left(\sum_{k=2}^{n-1} \frac{1}{\ln k (n-k)} \right) x^n \sim \sum_{n=3}^{\infty} x^n = \frac{1}{1-x}, x \rightarrow 1^-.$$

即 $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{x^n}{\ln n} \sim \frac{1}{(1-x) \ln \frac{1}{1-x}}, x \rightarrow 1^-.$

□

例题 9.8 设

$$a_0 = 1, a_1 = \frac{5}{4}, a_n = \frac{(2n+3)a_{n-1} + (2n-3)a_{n-2}}{4n}, n = 2, 3, \dots.$$

求 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$.



笔记 注意到形式幂级数法我们不需要担心考虑的 f 的幂级数是否收敛的问题. 因为这个方法最后往往可以算出一个具体的 f , 对这个 f 来说直接用数学归纳法计算验证会发现其 Taylor 多项式的系数恰好就是条件中的数列, 从而整个逻辑严谨. 因此这又是一个从逻辑上来说属于先猜后证的方法.

从证明可以看到本题实质上是通过幂级数法求出了 a_n 的通项. 此外考虑 $\frac{1}{1-x} f(x)$ 的幂级数并用 Cauchy 积分可以导出 $\sum_{k=0}^n a_k$ 的信息.

如果要严谨地证明, 就是用数学归纳法证明下述求出来的 a_n 通项表达式(其实就是下面解出来的 f 的 Taylor 展开式中的通项)就是满足题目条件的 a_n , 再直接计算其极限即可.

证明 记 $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, 则 $f'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^{n-1}$. 由条件可得

$$\begin{aligned} 4na_n &= (2n+3)a_{n-1} + (2n-3)a_{n-2}, \quad n = 2, 3, \dots \\ \Rightarrow 4 \sum_{n=2}^{\infty} n a_n x^n &= \sum_{n=2}^{\infty} [(2n+3)a_{n-1} + (2n-3)a_{n-2}] x^n. \\ \Rightarrow 4 \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^n - 4a_1 x &= \sum_{n=1}^{\infty} (2n+5)a_n x^{n+1} + \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)a_n x^{n+2} \\ \Rightarrow 4x \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^{n-1} - 5x &= 2x^2 \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^{n-1} + 2x^3 \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^{n-1} + 5x \sum_{n=1}^{\infty} a_n x^n + x^2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\Rightarrow 4x \sum_{n=1}^{\infty} na_n x^{n-1} - 5x = 2x^2 \sum_{n=1}^{\infty} na_n x^{n-1} + 2x^3 \sum_{n=1}^{\infty} na_n x^{n-1} + 5x \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n + x^2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - 5x \\
&\Rightarrow (2x^3 + 2x^2 - 4x) \sum_{n=1}^{\infty} na_n x^{n-1} + (x^2 + 5x) \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0 \\
&\Rightarrow (2x^3 + 2x^2 - 4x) f'(x) + (x^2 + 5x) f(x) = 0.
\end{aligned}$$

又注意到 $f(0) = a_0 = 1, f'(0) = a_1 = \frac{5}{4}$, 故分离变量解上述微分方程得

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{x+2}}{1-x}.$$

因为 $\sqrt{x+2} \in C^\infty(\mathbb{R})$, 所以可记 $\sqrt{x+2} = \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n$, 则 $\sqrt{3} = \sum_{n=0}^{\infty} b_n$. 由**Cauchy 积收敛定理及推论 9.1**知

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{1-x} \cdot \sqrt{x+2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^n b_k \right) x^n.$$

因此 $a_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^n b_k$, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=0}^{\infty} b_n = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{2}$.

□

9.1.4 Cauchy 积

定义 9.1 (Cauchy 积)

设 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n, \sum_{n=0}^{\infty} b_n$ 是两个收敛级数, 我们称

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n, c_n = \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k}$$

为 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n, \sum_{n=0}^{\infty} b_n$ 的**Cauchy(乘)积**. 我们记

$$A_n = \sum_{k=0}^n a_k, B_n = \sum_{k=0}^n b_k, S_n = \sum_{k=0}^n c_k.$$

♣

注 我们暂时并不清楚 $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ 是否收敛, 更不知道是否有

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \sum_{n=0}^{\infty} b_n.$$

结论 延续**定义 9.1**, 我们有

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 b_0 = c_0 \\ a_0 b_1 + a_1 b_0 = c_1 \\ a_0 b_2 + a_1 b_1 + a_2 b_0 = c_2 \\ \vdots \\ a_0 b_n + a_1 b_{n-1} + a_2 b_{n-2} + \cdots + a_n b_0 = c_n \end{array} \right.$$

这可以看做一个线性方程组

$$\begin{pmatrix} a_0 & & & & \\ a_1 & a_0 & & & \\ a_2 & a_1 & a_0 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ a_n & a_{n-1} & a_{n-2} & \cdots & a_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}$$

则当 $a_0 \neq 0$, 我们有

$$\begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 & & & & \\ a_1 & a_0 & & & \\ a_2 & a_1 & a_0 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ a_n & a_{n-1} & a_{n-2} & \cdots & a_0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}$$

本结论可以帮我们计算已知函数的倒数的 Taylor 展开.

例题 9.9 设 $a_n = b_n = \frac{(-1)^n}{\sqrt{n+1}}$, $n = 0, 1, \dots$, 则

$$\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^n}{\sqrt{(n-k+1)(k+1)}}$$

发散.

注 这是一组 Cauchy 积不收敛的反例.

证明 事实上, 我们有

$$\left| \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^n}{\sqrt{(n-k+1)(k+1)}} \right| = \sum_{k=0}^n \frac{1}{\sqrt{(n-k+1)(k+1)}} \geq \sum_{k=0}^n \frac{1}{\sqrt{(n-\frac{n}{2}+1)(\frac{n}{2}+1)}} = \frac{n+1}{\frac{n}{2}+1} \rightarrow 2,$$

上式的放缩实际上利用了二次函数 $(n-k+1)(k+1) = -k^2 + nk + n + 1$ 的最值大值点 $k = \frac{n}{2}$. 这就证明了

$$\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^n}{\sqrt{(n-k+1)(k+1)}}$$

发散.

□

命题 9.5

延续定义 9.1, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{j=0}^n S_j}{n} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \sum_{n=0}^{\infty} b_n \quad (9.28)$$

证明 注意到

$$S_n = \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^k a_i b_{k-i} = \sum_{i=0}^n \sum_{k=i}^n a_i b_{k-i} = \sum_{i=0}^n a_i B_{n-i} = \sum_{i=0}^n a_{n-i} B_i,$$

于是我们有

$$\sum_{j=0}^n S_j = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^j a_{j-i} B_i = \sum_{i=0}^n \sum_{j=i}^n a_{j-i} B_i = \sum_{i=0}^n A_{n-i} B_i$$

由命题 2.7 可得(9.28).

□

推论 9.1

设级数 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n, \sum_{n=0}^{\infty} b_n$ 都收敛, 则它们的 Cauchy 积 $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ 收敛的充要条件是

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \sum_{n=0}^{\infty} b_n.$$



证明 延续定义 9.1, 充分性显然成立, 下证必要性. 由命题 9.5 及 Stolz 定理可得

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \sum_{n=0}^{\infty} b_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{j=0}^n S_j}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \sum_{n=0}^{\infty} c_n.$$



定理 9.19 (Cauchy 积收敛定理)

延续定义 9.1, 我们有

1. 若 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n, \sum_{n=0}^{\infty} b_n$ 有一个绝对收敛, 则 $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ 收敛.
2. 若 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n, \sum_{n=0}^{\infty} b_n$ 都绝对收敛, 则 $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ 绝对收敛.



证明 1. 注意到

$$S_n = \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^k a_i b_{k-i} = \sum_{i=0}^n \sum_{k=i}^n a_i b_{k-i} = \sum_{i=0}^n a_i B_{n-i} = \sum_{i=0}^n a_{n-i} B_i,$$

因此我们只需证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n a_i B_{n-i}$$

收敛. 不妨设 (否则, 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} B_n = B$, 则用 $B_n - B$ 代替 B_n)

$$\sum_{n=1}^{\infty} |a_n| < \infty, \lim_{n \rightarrow \infty} B_n = 0$$

于是运用命题 2.6 就有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \sum_{i=0}^n a_i B_{n-i} \right| \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n |a_i| \cdot |B_{n-i}| = \sum_{i=0}^{\infty} |a_i| \cdot 0 = 0$$

这就证明了 $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ 收敛.

2. 若 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n, \sum_{n=0}^{\infty} b_n$ 都绝对收敛. 注意到

$$\sum_{k=0}^n |c_k| \leq \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^k |a_i b_{k-i}| = \sum_{i=0}^n \sum_{k=i}^n |a_i b_{k-i}| = \sum_{i=0}^n \left(|a_i| \sum_{k=i}^n |b_{k-i}| \right)$$

于是由命题 2.6 就有

$$\sum_{k=0}^{\infty} |c_k| \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n \left(|a_i| \sum_{k=i}^n |b_{k-i}| \right) = \sum_{i=0}^{\infty} |a_i| \cdot \sum_{i=0}^{\infty} |b_i| < \infty$$

这就证明了 $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ 绝对收敛.



接下来我们研究 Cauchy 积和两个级数的积差距有多少.

命题 9.6

延续定义 9.1, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n a_k \sum_{j=0}^{k-1} b_{n-j} = 0 \iff \sum_{n=0}^{\infty} c_n \text{ 收敛.} \quad (9.29)$$



证明 注意到

$$S_n = \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^k a_i b_{k-i} = \sum_{i=0}^n \sum_{k=i}^n a_i b_{k-i} = \sum_{i=0}^n a_i B_{n-i} = \sum_{i=0}^n a_{n-i} B_i,$$

即 $\sum_{j=0}^n b_j \sum_{k=0}^n a_k = \sum_{k=0}^n c_k$. 于是

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n a_k \sum_{j=0}^{k-1} b_{n-j} &= \sum_{k=1}^n a_k \left(\sum_{j=0}^n b_{n-j} - \sum_{j=k}^n b_{n-j} \right) \\ &= \sum_{j=0}^n b_j \left(\sum_{k=0}^n a_k - a_0 \right) - \sum_{k=1}^n a_k \sum_{j=0}^{n-k} b_j \\ &= \sum_{j=0}^n b_j \sum_{k=0}^n a_k - \sum_{k=0}^n \sum_{j=0}^{n-k} a_k b_j \\ &= \sum_{j=0}^n b_j \sum_{k=0}^n a_k - \sum_{k=0}^n c_k \end{aligned}$$

由于 Cauchy 积收敛, 则由推论 9.1, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n a_k \sum_{j=0}^{k-1} b_{n-j} = 0 \iff \sum_{n=0}^{\infty} c_n \text{ 收敛}$$

□

例题 9.10 设递减数列 $a_n, b_n > 0, n = 0, 1, 2, \dots$, 且 $\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n a_n, \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n b_n$ 收敛, 记 $c_n = \sum_{j=0}^n a_j b_{n-j}$, 证明

$$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n c_n \text{ 收敛} \iff \lim_{n \rightarrow \infty} c_n = 0 \quad (9.30)$$

证明 左推右显然, 现在假设 $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = 0$, 由命题 9.6, 我们只需证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n (-1)^k a_k \sum_{j=0}^{k-1} (-1)^{n-j} b_{n-j} = 0$$

现在

$$\begin{aligned} \left| \sum_{k=1}^n (-1)^k a_k \sum_{j=0}^{k-1} (-1)^{n-j} b_{n-j} \right| &\leq \sum_{k=1}^n a_k \left| \sum_{j=0}^{k-1} (-1)^{n-j} b_{n-j} \right| \\ &\leq \sum_{k=1}^n a_k b_{n-k+1} \leq \sum_{k=0}^{n+1} a_k b_{n-k+1} = c_{n+1} \end{aligned}$$

其中第二个不等号来自于交错级数不等式. 于是我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \sum_{k=1}^n (-1)^k a_k \sum_{j=0}^{k-1} (-1)^{n-j} b_{n-j} \right| = 0$$

我们证明了(9.30).

□

命题 9.7

设 $\{a_n\}_{n=0}^{\infty} \subset \mathbb{R}$, 设

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, x \in (-1, 1).$$

记 $S_n \triangleq \sum_{k=0}^n a_k$, 则

$$\frac{f(x)}{1-x} = \sum_{n=0}^{\infty} S_n x^n, x \in (-1, 1).$$

◆

证明 由 Taylor 级数可知

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{n=0}^{\infty} x^n, x \in (-1, 1).$$

显然 $\sum_{n=0}^{\infty} x^n$ 在 $(-1, 1)$ 上绝对收敛, 故由 Cauchy 积收敛定理可知 $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 和 $\frac{1}{1-x} = \sum_{n=0}^{\infty} x^n$ 的 Cauchy 积也收敛, 即

$$\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n (a_k x^k) x^{n-k} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n a_k x^n = \sum_{n=0}^{\infty} S_n x^n < +\infty.$$

故由推论 9.1 可知

$$\frac{f(x)}{1-x} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \cdot \sum_{n=0}^{\infty} x^n = \sum_{n=0}^{\infty} S_n x^n.$$

□

例题 9.11 设

$$S_n = \sum_{k=0}^n a_k, \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n S_k = +\infty.$$

假设 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 在 $x \in (-1, 1)$ 收敛, 证明:

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = +\infty.$$

证明 由命题 9.7 知

$$\begin{aligned} \frac{1}{1-x} \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n &= \sum_{n=0}^{\infty} S_n x^n, \\ \frac{1}{(1-x)^2} \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n &= \frac{1}{1-x} \sum_{n=0}^{\infty} S_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^n S_k \right) x^n, \end{aligned}$$

故

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = (1-x)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^n S_k \right) x^n.$$

由 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n S_k = +\infty$ 知, 对 $\forall M > 0$, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得

$$\sum_{k=0}^n S_k \geq M(n+1), \quad \forall n > N.$$

于是对 $\forall M > 0$, 都有

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n &= (1-x)^2 \sum_{n=0}^N \left(\sum_{k=0}^n S_k \right) x^n + (1-x)^2 \sum_{n=N+1}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^n S_k \right) x^n \\
 &\geq (1-x)^2 \sum_{n=0}^N \left(\sum_{k=0}^n S_k \right) x^n + M(1-x)^2 \sum_{n=N+1}^{\infty} (n+1)x^n \\
 &\geq (1-x)^2 \sum_{n=0}^N \left(\sum_{k=0}^n S_k \right) x^n + M(1-x)^2 \sum_{n=N+1}^{\infty} nx^n \\
 &= (1-x)^2 \sum_{n=0}^N \left(\sum_{k=0}^n S_k \right) x^n - M(1-x)^2 \sum_{n=0}^N nx^n + M(1-x)^2 \sum_{n=0}^{\infty} nx^n \\
 &= (1-x)^2 \sum_{n=0}^N \left(\sum_{k=0}^n S_k \right) x^n - M(1-x)^2 \sum_{n=0}^N nx^n + M(1-x)^2 \cdot \frac{1}{(1-x)^2} \\
 &= (1-x)^2 \sum_{n=0}^N \left(\sum_{k=0}^n S_k \right) x^n - M(1-x)^2 \sum_{n=0}^N nx^n + M.
 \end{aligned}$$

令 $x \rightarrow 1^-$ 得

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \geq M, \quad \forall M > 0.$$

再令 $M \rightarrow +\infty$ 得

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = +\infty \implies \lim_{x \rightarrow 1^-} \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = +\infty.$$

□

9.2 具体级数敛散性判断

9.2.1 估阶法

例题 9.12 判断下述级数收敛性.

$$1. \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\ln(e^n + n^2)}{\sqrt[4]{n^8 + n^2 + 1} \cdot \ln^2(n+1)};$$

$$2. \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln^2 k}{n^p};$$

$$3. \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \int_0^1 \frac{dt}{(1+t^4)^n}.$$

证明

1. 注意到

$$\frac{\ln(e^n + n^2)}{\sqrt[4]{n^8 + n^2 + 1} \cdot \ln^2(n+1)} = \frac{\ln(e^n) + \ln\left(1 + \frac{n^2}{e^n}\right)}{\sqrt[4]{n^8 + n^2 + 1} \cdot \ln^2(n+1)} \sim \frac{n}{n^2 \cdot \ln^2 n} = \frac{1}{n \ln^2 n}, \quad n \rightarrow \infty.$$

由积分判别法, 我们有

$$\sum \frac{1}{n \ln^2 n} \sim \int_2^{\infty} \frac{1}{x \ln^2 x} dx = \int_{\ln 2}^{\infty} \frac{1}{y^2} dy < \infty,$$

故原级数收敛.

2. 注意到运用 Stolz 定理, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n \ln^2 n} \sum_{k=1}^n \ln^2 k = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln^2 n}{n \ln^2 n - (n-1) \ln^2(n-1)} \xrightarrow{\text{拉中保持阶不变}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln^2 n}{\ln^2 n + 2 \ln n} = 1.$$

于是

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln^2 k}{n^p} \sim \sum_{n=2}^{\infty} \frac{n \ln^2 n}{n^p} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\ln^2 n}{n^{p-1}}.$$

当 $p > 2$ 时, 取 $\delta > 0$, 使得 $p - 1 - \delta > 1$. 又 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln^2 n}{n^\delta} = 0$, 故

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{\ln^2 n}{n^{p-1}} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^{p-1-\delta}} \cdot \frac{\ln^2 n}{n^\delta} < \sum_{n=2}^{\infty} \frac{C}{n^{p-1-\delta}} < +\infty.$$

当 $p \leq 2$ 时, 有

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{\ln^2 n}{n^{p-1}} > \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\ln^2 2}{n^{p-1}} = +\infty.$$

因此原级数收敛等价于 $p > 2$.

3. 由 Laplace 方法, 我们有

$$\int_0^1 \frac{dt}{(1+t^4)^n} = \int_0^1 e^{-n \ln(1+t^4)} dt \sim \int_0^\infty e^{-nt^4} dt = \frac{1}{\sqrt[4]{n}} \int_0^\infty e^{-x^4} dx, n \rightarrow \infty.$$

现在

$$\frac{1}{n} \int_0^1 \frac{dt}{(1+t^4)^n} \sim \frac{C}{n^{\frac{5}{4}}}, n \rightarrow \infty,$$

故原级数收敛.

□

例题 9.13 设 $a_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} t \left| \frac{\sin^3(nt)}{\sin^3 t} \right| dt, n \in \mathbb{N}$, 判断 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{a_n}$ 收敛性.

笔记 如果需要 a_n 的一个精确的上界, 那么 (就是证法一) 我们可以先待定分段点 θ , 利用不等式 (这个不等式可用数学归纳法证明)

$$|\sin(nt)| \leq n |\sin t|, \forall n \in \mathbb{N}, t \in \mathbb{R},$$

再结合 Jordan 不等式可得

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{\pi}{2}} t \left| \frac{\sin^3(nt)}{\sin^3 t} \right| dt &= \int_0^\theta t \left| \frac{\sin^3(nt)}{\sin^3 t} \right| dt + \int_\theta^{\frac{\pi}{2}} t \left| \frac{\sin^3(nt)}{\sin^3 t} \right| dt \\ &\leq \int_0^\theta \frac{tn^3 \sin^3 t}{\sin^3 t} dt + \int_\theta^{\frac{\pi}{2}} \frac{t}{(\frac{2}{\pi}t)^3} dt \\ &= \frac{\theta^2 n^3}{2} + \frac{\pi^3}{8\theta} - \frac{\pi^2}{4} = g(\theta), \forall n \in \mathbb{N}. \end{aligned}$$

此时再求出 $g(\theta)$ 的最小值点, 就能确定 θ 的取值, 进而得到一个较为精确的上界. 求导易知 $g(\theta) \geq g\left(\frac{\pi}{2n}\right) = \frac{3\pi^2}{8}n$, 即

$$\theta = \frac{\pi}{2n}, a_n \leq \frac{3\pi^2}{8}n, \forall n \in \mathbb{N}.$$

证明 证法一: 利用不等式

$$|\sin(nt)| \leq n |\sin t|, \forall n \in \mathbb{N}, t \in \mathbb{R},$$

我们有

$$\int_0^{\frac{\pi}{2n}} t \left| \frac{\sin^3(nt)}{\sin^3 t} \right| dt \leq \int_0^{\frac{\pi}{2n}} \frac{tn^3 \sin^3 t}{\sin^3 t} dt = \frac{n^3}{2} \cdot \frac{\pi^2}{4n^2} = \frac{\pi^2}{8}n.$$

利用不等式 $\sin t \geq \frac{2}{\pi}t, \forall t \in [0, \frac{\pi}{2}]$, 我们有

$$\int_{\frac{\pi}{2n}}^{\frac{\pi}{2}} t \left| \frac{\sin^3(nt)}{\sin^3 t} \right| dt \leq \int_{\frac{\pi}{2n}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{t}{\left(\frac{2}{\pi}t\right)^3} dt \leq \frac{\pi^3}{8} \int_{\frac{\pi}{2n}}^{\infty} \frac{1}{t^2} dt = \frac{\pi^3}{8} \cdot \frac{2n}{\pi} = \frac{\pi^2}{4}n, \forall n \in \mathbb{N}.$$

现在

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} t \left| \frac{\sin^3(nt)}{\sin^3 t} \right| dt \leq \frac{\pi^2}{8}n + \frac{\pi^2}{4}n = \frac{3\pi^2}{8}n, \forall n \in \mathbb{N},$$

因此

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{a_n} \geq \frac{8}{3\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} = +\infty.$$

证法二: 注意到 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin^3 x}{x^3} = 1$, 故存在 $c > 0$, 使得

$$|\sin^3 x| \geq cx^3, x \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right].$$

从而

$$a_n \leq \frac{1}{c} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{|\sin^3(nt)|}{t^2} dt = \frac{n}{c} \int_0^{\frac{n\pi}{2}} \frac{|\sin^3 y|}{y^2} dy \leq \frac{n}{c} \int_0^{\frac{n\pi}{2}} \frac{1}{y^2} dy \leq Kn, \forall n \in \mathbb{N}.$$

其中 K 为某个常数. 于是

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{a_n} \geq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{Kn} = +\infty.$$

□

例题 9.14 对 $x > 0$, 判断级数 $\sum_{n=1}^{\infty} [(2-x)(2-x^{\frac{1}{2}}) \cdots (2-x^{\frac{1}{n}})]$ 收敛性.

证明 当 $x = 2^m, m \in \mathbb{N}$, 我们知道级数末项在 n 充分大时恒为 0, 因此原本的级数收敛. 下设 $x \neq 2^m, \forall m \in \mathbb{N}$. 此时由

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{(2-x)(2-x^{\frac{1}{2}}) \cdots (2-x^{\frac{1}{n}})}{(2-x)(2-x^{\frac{1}{2}}) \cdots (2-x^{\frac{1}{n+1}})} - 1 \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{1}{2-x^{\frac{1}{n+1}}} - 1 \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n(x^{\frac{1}{n+1}} - 1)}{2-x^{\frac{1}{n+1}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} n \frac{\ln x}{n+1} = \ln x,$$

以及拉比判别法, 我们就有 $x > e$ 时级数收敛, $x < e$ 时级数发散. 当 $x = e$ 时, 计算 Taylor 展开式得

$$\ln \frac{1}{2 - e^{\frac{1}{n+1}}} = \frac{1}{n} + \frac{1}{12n^4} + o\left(\frac{1}{n^4}\right), n \rightarrow \infty,$$

然后

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \ln n \left[n \ln \frac{1}{2 - e^{\frac{1}{n+1}}} - 1 \right] = 0.$$

运用较为广泛的判别法(极限版 2), 我们知道原级数发散.

□

例题 9.15 判断级数 $\sum_{n=1}^{\infty} x^{\sin 1 + \sin \frac{1}{2} + \cdots + \sin \frac{1}{n}}, x \in (0, 1)$ 收敛性.

证明 注意到

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{x^{\sin 1 + \sin \frac{1}{2} + \cdots + \sin \frac{1}{n}}}{x^{\sin 1 + \sin \frac{1}{2} + \cdots + \sin \frac{1}{n+1}}} - 1 \right) &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{1}{x^{\sin \frac{1}{n+1}}} - 1 \right) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(e^{-\sin \frac{1}{n+1} \cdot \ln x} - 1 \right) = -\ln x \lim_{n \rightarrow \infty} n \sin \frac{1}{n+1} = -\ln x. \end{aligned}$$

由拉比判别法, 我们有 $0 < x < \frac{1}{e}$ 时原级数收敛, $\frac{1}{e} < x < 1$ 时原级数发散. 当 $x = \frac{1}{e}$, 由较为广泛的判别法(极限版 2)和

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \ln n \left(n \ln \frac{x^{\sin 1 + \sin \frac{1}{2} + \cdots + \sin \frac{1}{n}}}{x^{\sin 1 + \sin \frac{1}{2} + \cdots + \sin \frac{1}{n+1}}} - 1 \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \ln n \left(n \ln \frac{1}{x^{\sin \frac{1}{n+1}}} - 1 \right)$$

$$\begin{aligned}
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \ln n \left(n \ln e^{-\sin \frac{1}{n+1} \ln x} - 1 \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \ln n \left(n \left[e^{-\sin \frac{1}{n+1} \ln x} - 1 + O \left(\left(e^{-\sin \frac{1}{n+1} \ln x} - 1 \right)^2 \right) \right] - 1 \right) \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \ln n \left(n \left[-\sin \frac{1}{n+1} \ln x + O \left(\left(-\sin \frac{1}{n+1} \ln x \right)^2 \right) + O \left(\frac{1}{n^2} \right) \right] - 1 \right) \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \ln n \left(\left[n \sin \frac{1}{n+1} + O \left(\frac{1}{n} \right) \right] - 1 \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\ln n \cdot O \left(\frac{1}{n} \right) \right] = 0,
\end{aligned}$$

我们有原级数在 $x = \frac{1}{e}$ 发散.

□

9.2.2 带对数换底法

例题 9.16 判断下列级数收敛性.

1. $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{r^{\ln n}} (r > 0);$
2. $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{\ln^{\ln n} n};$
3. $\sum_{n=3}^{\infty} \frac{1}{(\ln \ln n)^{\ln n}};$
4. $\sum_{n=3}^{\infty} \frac{1}{(\ln n)^{\ln \ln n}};$
5. $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^{1+\frac{1}{\sqrt{\ln n}}}};$
6. $\sum_{n=3}^{\infty} \frac{1}{n^{1+\frac{1}{\ln \ln n}} \ln n}$

证明

1. 注意到

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{r^{\ln n}} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{e^{\ln n \cdot \ln r}} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^{\ln r}},$$

我们有原级数收敛等价于 $r > e$.

2. 注意到

$$\sum_{n=100}^{\infty} \frac{1}{\ln^{\ln n} n} = \sum_{n=100}^{\infty} \frac{1}{e^{\ln n \cdot \ln \ln n}} = \sum_{n=100}^{\infty} \frac{1}{n^{\ln \ln n}} \leq \sum_{n=100}^{\infty} \frac{1}{n^{\ln \ln 100}} < \infty,$$

我们有原级数收敛.

3. 注意到

$$\sum_{n=[e^{e^e}]+1}^{\infty} \frac{1}{(\ln \ln n)^{\ln n}} = \sum_{n=[e^{e^e}]+1}^{\infty} \frac{1}{e^{\ln n \cdot \ln \ln \ln n}} \leq \sum_{n=[e^{e^e}]+1}^{\infty} \frac{1}{e^{\ln n \cdot \ln \ln \ln (e^{e^e}+1)}} = \sum_{n=[e^{e^e}]+1}^{\infty} \frac{1}{n^{\ln \ln \ln (e^{e^e}+1)}} < \infty,$$

我们有原级数收敛.

4. 由**积分判别法**, 我们有

$$\sum_{n=3}^{\infty} \frac{1}{(\ln n)^{\ln \ln n}} = \sum_{n=3}^{\infty} \frac{1}{e^{\ln^2 \ln n}} \sim \int_3^{\infty} \frac{1}{e^{\ln^2 \ln x}} dx \stackrel{x=e^y}{=} \int_{\ln 3}^{\infty} e^{y-\ln^2 y} dy = \infty,$$

故原级数发散.

5. 首先

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^{1+\frac{1}{\sqrt{\ln n}}}} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n e^{\sqrt{\ln n}}},$$

于是我们结合

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{ne^{\sqrt{\ln n}}} \leq \sum_{n=2}^{\infty} \int_{n-1}^n \frac{1}{xe^{\sqrt{\ln x}}} dx = \int_1^{\infty} \frac{1}{xe^{\sqrt{\ln x}}} dx = \int_0^{\infty} \frac{1}{e^{\sqrt{t}}} dt < \infty$$

知原级数收敛.

6. 当 n 充分大有

$$\frac{1}{n^{1+\frac{1}{\ln \ln n}} \ln n} = \frac{1}{e^{(1+\frac{1}{\ln \ln n}) \ln n} \ln n} = \frac{1}{n \ln n e^{\frac{\ln n}{\ln \ln n}}} \leq \frac{1}{n \ln n e^{\frac{(\ln \ln n)^2}{\ln \ln n}}} = \frac{1}{n \ln n e^{\ln \ln n}} = \frac{1}{n \ln^2 n}.$$

由积分判别法知

$$\sum \frac{1}{n \ln^2 n} \sim \int_2^{\infty} \frac{1}{x \ln^2 x} dx = \int_{\ln 2}^{\infty} \frac{1}{y^2} dy < \infty,$$

因此 $\sum_{n=3}^{\infty} \frac{1}{n^{1+\frac{1}{\ln \ln n}} \ln n}$ 收敛.

□

9.2.3 Taylor 公式法

例题 9.17 判断 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(-1)^{n-1} + \sqrt[n]{n}}$ 收敛性.

笔记 此类问题可采用 Taylor 公式的 peano 余项方法, 主要要展开到余项的级数绝对收敛. 注意积累绝对 \pm 绝对 = 绝对, 绝对 \pm 条件 = 条件的结论.

证明 注意到

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(-1)^{n-1} + \sqrt[n]{n}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{(-1)^n}{\sqrt[n]{n}}}{1 - \frac{(-1)^n}{\sqrt[n]{n}}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{(-1)^n}{\sqrt[n]{n}} + \frac{1}{n^{\frac{2}{3}}} + \frac{(-1)^n}{n} + O\left(\frac{1}{n^{\frac{4}{3}}}\right) \right).$$

于是由 $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{(-1)^n}{\sqrt[n]{n}} + \frac{(-1)^n}{n} + O\left(\frac{1}{n^{\frac{4}{3}}}\right) \right)$ 收敛, $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{\frac{2}{3}}}$ 发散知原级数发散.

□

9.2.4 分组判别法

例题 9.18 设 $a_n > 0$, $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 证明级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n^{\frac{n}{n+1}}$ 收敛.

笔记 待定常数 c , 记

$$M \triangleq \left\{ n \in \mathbb{N} : a_n \leq c a_n^{\frac{n}{n+1}} \right\}, N \triangleq \left\{ n \in \mathbb{N} : a_n > c a_n^{\frac{n}{n+1}} \right\}.$$

则对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 有

$$a_n > c a_n^{\frac{n}{n+1}} \Rightarrow \frac{1}{c} > a_n^{\frac{1}{n+1}} \Rightarrow a_n < \left(\frac{1}{c}\right)^{n+1}.$$

现在我们想要利用几何级数将原级数进行分组, 故只需任取 $c > 1$ 即可, 不妨取 $c = 2$, 就有下述证明.

证明 记

$$M \triangleq \left\{ n \in \mathbb{N} : a_n \leq \frac{1}{2} a_n^{\frac{n}{n+1}} \right\}, N \triangleq \left\{ n \in \mathbb{N} : a_n > \frac{1}{2} a_n^{\frac{n}{n+1}} \right\}.$$

现在

$$a_n^{\frac{1}{n+1}} \leq \frac{1}{2} \Rightarrow a_n \leq \left(\frac{1}{2}\right)^{n+1} \Rightarrow a_n^{\frac{n}{n+1}} \leq \left(\frac{1}{2}\right)^n, \forall n \in M,$$

我们有

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n^{\frac{n}{n+1}} = \sum_{n \in M} a_n^{\frac{n}{n+1}} + \sum_{n \in N} a_n^{\frac{n}{n+1}} \leq \sum_{n \in M} \left(\frac{1}{2}\right)^n + 2 \sum_{n \in N} a_n < \infty,$$

这就完成了证明. □

例题 9.19 设 $a_n > 0$, $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 证明级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n^{\frac{1}{p}}}{n^s}$, $s > 1 - \frac{1}{p}$, $p > 1$ 收敛.

注 本题也可用分组判别法进行证明.

证明 利用 Young 不等式, 我们有

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n^{\frac{1}{p}}}{n^s} \leq \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a_n}{p} + \frac{1}{qn^{sq}} \right) < \infty, \quad sq = \frac{s}{1 - \frac{1}{p}} > 1,$$

这就完成了证明. □

9.2.5 拟合法和积分判别法

例题 9.20 设 $n \in \mathbb{N}$, $a_n > 1$ 且单调递增, $\alpha > 0$.

$$1. \text{ 证明: } \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1} a_n^{\alpha}} < +\infty$$

$$2. \text{ 证明: } \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1} (\ln a_n)^{1+\alpha}} < +\infty$$

证明 由 $\{a_n\}$ 递增知 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \in [1, +\infty]$, 进而 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_n^{\alpha}} \in [0, 1)$.

(1) 注意到

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1}^{\alpha+1}} = \sum_{n=1}^{+\infty} \int_{a_n}^{a_{n+1}} \frac{dx}{a_{n+1}^{\alpha+1}} \leq \sum_{n=1}^{+\infty} \int_{a_n}^{a_{n+1}} \frac{dx}{x^{\alpha+1}} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{a_1^{\alpha}} - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_{n+1}^{\alpha}} \right) < +\infty,$$

故

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1} a_n^{\alpha}} &= \sum_{n=1}^{+\infty} \left(\frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1} a_n^{\alpha}} - \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1}^{\alpha+1}} \right) + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1}^{\alpha+1}} \\ &= \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1}} \left(\frac{1}{a_n^{\alpha}} - \frac{1}{a_{n+1}^{\alpha}} \right) + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1}^{\alpha+1}} \\ &< \sum_{n=1}^{+\infty} \left(\frac{1}{a_n^{\alpha}} - \frac{1}{a_{n+1}^{\alpha}} \right) + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1}^{\alpha+1}} \\ &= \frac{1}{a_1^{\alpha}} - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_{n+1}^{\alpha}} + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1}^{\alpha+1}} < +\infty. \end{aligned}$$

(2) 注意到

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1} (\ln a_{n+1})^{1+\alpha}} &= \sum_{n=1}^{+\infty} \int_{a_n}^{a_{n+1}} \frac{dx}{a_{n+1} (\ln a_{n+1})^{\alpha+1}} \leq \sum_{n=1}^{+\infty} \int_{a_n}^{a_{n+1}} \frac{dx}{x \ln^{\alpha+1} x} \\ &\leq \int_{a_1}^{+\infty} \frac{dx}{x \ln^{\alpha+1} x} = \frac{1}{\alpha \ln^{\alpha} a_1} < +\infty, \end{aligned}$$

又

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1} (\ln a_n)^{1+\alpha}} = \sum_{n=1}^{+\infty} \left[\frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1} (\ln a_n)^{1+\alpha}} - \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1} (\ln a_{n+1})^{1+\alpha}} \right] + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1} (\ln a_{n+1})^{1+\alpha}},$$

故只需证

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \left[\frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1} (\ln a_n)^{1+\alpha}} - \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1} (\ln a_{n+1})^{1+\alpha}} \right] < +\infty.$$

现在

$$\begin{aligned}
\sum_{n=1}^{+\infty} \left[\frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1}(\ln a_n)^{1+\alpha}} - \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1}(\ln a_{n+1})^{1+\alpha}} \right] &= \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1}} \left[\frac{1}{(\ln a_n)^{1+\alpha}} - \frac{1}{(\ln a_{n+1})^{1+\alpha}} \right] \\
&\leq \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{a_{n+1}} \left[\frac{1}{(\ln a_n)^{1+\alpha}} - \frac{1}{(\ln a_{n+1})^{1+\alpha}} \right] \\
&< \sum_{n=1}^{+\infty} \left[\frac{1}{(\ln a_n)^{1+\alpha}} - \frac{1}{(\ln a_{n+1})^{1+\alpha}} \right] \\
&= \frac{1}{(\ln a_1)^{1+\alpha}} - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(\ln a_n)^{1+\alpha}} < +\infty.
\end{aligned}$$

故结论得证. □

9.2.6 杂题

例题 9.21 证明: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n}{n}, \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n}{n}$ 条件收敛.

证明 相似(10.1)式的计算, 我们有

$$\begin{aligned}
\left| \sum_{j=1}^n \sin j \right| &= \left| \sum_{j=1}^n \frac{\sin j \cdot \sin \frac{1}{2}}{\sin \frac{1}{2}} \right| = \left| \sum_{j=1}^n \frac{\cos(j - \frac{1}{2}) - \cos(j + \frac{1}{2})}{2 \sin \frac{1}{2}} \right| \\
&= \left| \frac{\cos \frac{1}{2} - \cos(n + \frac{1}{2})}{2 \sin \frac{1}{2}} \right| = \frac{1}{2} \left| \sin n - \cot \frac{1}{2} \cos n + \cot \frac{1}{2} \right| \\
&\leq \frac{2}{2 \sin \frac{1}{2}} = \frac{1}{\sin \frac{1}{2}}, \\
\left| \sum_{j=1}^n \cos j \right| &= \left| \sum_{j=1}^n \frac{\cos j \cdot \sin \frac{1}{2}}{\sin \frac{1}{2}} \right| = \left| \sum_{j=1}^n \frac{\sin(j + \frac{1}{2}) - \sin(j - \frac{1}{2})}{2 \sin \frac{1}{2}} \right| \\
&= \left| \frac{\sin(n + \frac{1}{2}) - \sin \frac{1}{2}}{2 \sin \frac{1}{2}} \right| = \frac{1}{2} \left| \cos n + \cot \frac{1}{2} \sin n - 1 \right| \\
&\leq \frac{2}{2 \sin \frac{1}{2}} = \frac{1}{\sin \frac{1}{2}},
\end{aligned}$$

都是有界的. 又 $\frac{1}{n}$ 递减到 0, 我们由**A-D 判别法**得 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n}{n}, \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n}{n}$ 收敛.

又

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\sin n|}{n} \geq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\sin n|^2}{n} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \cos(2n)}{2n} = \text{发散} - \text{收敛} = \text{发散};$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\cos n|}{n} \geq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\cos n|^2}{n} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 + \cos(2n)}{2n} = \text{发散} + \text{收敛} = \text{发散}.$$

故 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n}{n}, \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n}{n}$ 条件收敛. □

例题 9.22 证明 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\lfloor \sqrt{n} \rfloor}}{n}$ 收敛.

注 实际上, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都存在 $t \in \mathbb{N}$, 使得

$$t \leq \sqrt{n} < t+1 \iff t^2 \leq n \leq (t+1)^2 - 1.$$

因此

$$(-1)^{\lfloor \sqrt{k} \rfloor} = (-1)^t, \forall k \in [t^2, (t+1)^2 - 1].$$

注 $\ln(1+x) \leq x \Rightarrow \ln\left(1 - \frac{1}{k}\right) \leq -\frac{1}{k} \Rightarrow \frac{1}{k} \geq \ln\left(\frac{k}{k-1}\right).$

证明 证法一: 由级数加括号的理解得

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\lfloor \sqrt{n} \rfloor}}{n} = \sum_{t=1}^{\infty} \sum_{k=t^2}^{(t+1)^2-1} \frac{(-1)^{\lfloor \sqrt{k} \rfloor}}{k} = \sum_{t=1}^{\infty} (-1)^t \sum_{k=t^2}^{(t+1)^2-1} \frac{1}{k}.$$

我们来证明上式右边级数符合莱布尼兹判别法.

首先

$$0 \leq \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{k=t^2}^{(t+1)^2-1} \frac{1}{k} \leq \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{k=t^2}^{(t+1)^2-1} \int_{k-1}^k \frac{1}{x} dx = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{k=t^2}^{(t+1)^2-1} \ln \frac{k}{k-1} = \lim_{t \rightarrow \infty} \ln \frac{(t+1)^2-1}{t^2-1} = 0,$$

即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{k=t^2}^{(t+1)^2-1} \frac{1}{k} = 0.$$

然后对 $t \in \mathbb{N}, t \geq 3$, 我们有

$$\begin{aligned} & \sum_{k=t^2}^{(t+1)^2-1} \frac{1}{k} - \sum_{k=(t+1)^2}^{(t+2)^2-1} \frac{1}{k} = \sum_{k=0}^{2t} \frac{1}{k+t^2} - \sum_{k=0}^{2t+2} \frac{1}{k+t^2+2t+1} \\ &= \sum_{k=0}^{2t} \left(\frac{1}{k+t^2} - \frac{1}{k+t^2+2t+1} \right) - \frac{1}{t^2+4t+2} - \frac{1}{t^2+4t+3} \\ &= \sum_{k=0}^{2t} \frac{2t+1}{(k+t^2)(k+t^2+2t+1)} - \frac{2t^2+8t+5}{(t^2+4t+2)(t^2+4t+3)} \\ &\geq \frac{(2t+1)^2}{(2t+t^2)(2t+t^2+2t+1)} - \frac{2t^2+8t+5}{(t^2+4t+2)(t^2+4t+3)} \\ &\geq \frac{(2t+1)^2}{(t^2+2t+2)(t^2+4t+3)} - \frac{2t^2+8t+5}{(t^2+4t+2)(t^2+4t+3)} \\ &= \frac{2t^2-4t-4}{(t^2+4t+2)(t^2+4t+3)} \geq \frac{6t-4t-4}{(t^2+4t+2)(t^2+4t+3)} > 0, \end{aligned}$$

这就证明了 $\sum_{k=t^2}^{(t+1)^2-1} \frac{1}{k}$ 单调递减! 现在由莱布尼兹判别法得 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\lfloor \sqrt{n} \rfloor}}{n}$ 收敛.

证法二: 由级数加括号的理解得

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\lfloor \sqrt{n} \rfloor}}{n} = \sum_{t=1}^{\infty} \sum_{k=t^2}^{(t+1)^2-1} \frac{(-1)^{\lfloor \sqrt{k} \rfloor}}{k} = \sum_{t=1}^{\infty} (-1)^t \sum_{k=t^2}^{(t+1)^2-1} \frac{1}{k}.$$

我们用估阶方法进行证明. 由例题 2.53(2) 可知

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = \ln n + \gamma + O\left(\frac{1}{n}\right).$$

从而

$$\sum_{k=1}^{t^2-1} \frac{1}{k} = \ln(t^2-1) + \gamma + O\left(\frac{1}{t^2}\right),$$

$$\sum_{k=1}^{(t+1)^2-1} \frac{1}{k} = \ln[(t+1)^2-1] + \gamma + O\left(\frac{1}{t^2}\right).$$

于是

$$\sum_{k=t^2}^{(t+1)^2-1} \frac{1}{k} = \ln \frac{t^2+2t}{t^2-1} + O\left(\frac{1}{t^2}\right) = \ln \left(1 + \frac{2t+1}{t^2-1}\right) + O\left(\frac{1}{t^2}\right).$$

进而

$$\sum_{t=1}^{\infty} (-1)^t \sum_{k=t^2}^{(t+1)^2-1} \frac{1}{k} = \sum_{t=1}^{\infty} (-1)^t \left[\ln \left(1 + \frac{2t+1}{t^2-1}\right) + O\left(\frac{1}{t^2}\right) \right].$$

显然 $\ln \left(1 + \frac{2t+1}{t^2-1}\right) + O\left(\frac{1}{t^2}\right)$ 单调递减趋于 0, 故由莱布尼兹判别法可知原级数收敛.

□

注 虽然这里的 O 估计只对 n 充分大时成立, 但实际上级数的前有限项的和一定是有限数, 因此讨论级数的敛散性时, 可以只讨论从 n 的充分大的一项开始的级数. 上述证明中省略了这步, 总体问题不大.

9.3 级数计算

9.3.1 裂项方法

例题 9.23 计算 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n(1 + \sqrt[2^n]{2})}$.

笔记 继续采用强行裂项的想法, 猜出裂项之后的模样之后还原看看差什么.

证明 注意到

$$\begin{aligned} \frac{1}{2^{n-1} \left(2^{\frac{1}{2^{n-1}}} - 1\right)} - \frac{1}{2^n \left(2^{\frac{1}{2^n}} - 1\right)} &= \frac{2}{2^n \left(2^{\frac{1}{2^{n-1}}} - 1\right)} - \frac{2^{\frac{1}{2^n}} + 1}{2^n \left(2^{\frac{1}{2^{n-1}}} - 1\right)} = -\frac{2^{\frac{1}{2^n}} - 1}{2^n \left(2^{\frac{1}{2^{n-1}}} - 1\right)} \\ &= -\frac{2^{\frac{1}{2^n}} - 1}{2^n \left(2^{\frac{1}{2^n}} + 1\right) \left(2^{\frac{1}{2^n}} - 1\right)} = -\frac{1}{2^n \left(2^{\frac{1}{2^n}} + 1\right)}, \end{aligned}$$

我们有

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n \left(2^{\frac{1}{2^n}} + 1\right)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2^n \left(2^{\frac{1}{2^n}} - 1\right)} \right) - 1 = \frac{1}{\ln 2} - 1.$$

□

例题 9.24 计算

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k(k+1)(k+1)!}$$

笔记 想法的关键是强行裂项.

证明

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k(k+1)(k+1)!} &= \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k+1} \right) \frac{1}{(k+1)!} = \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{k(k+1)!} - \frac{1}{(k+1)(k+1)!} \right) \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{k(k+1)!} - \frac{1}{(k+1)(k+2)!} \right) + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{(k+1)(k+2)!} - \frac{1}{(k+1)(k+1)!} \right) \\ &= \frac{1}{2} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(k+2)!} \xrightarrow{\text{e的 Taylor 展开}} \frac{1}{2} - \left(e - 1 - 1 - \frac{1}{2} \right) = 3 - e. \end{aligned}$$

□

例题 9.25 计算级数

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n}$$

笔记 此类问题化部分和之后估阶.

证明 注意到

$$\sum_{n=1}^{2m+1} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} = \sum_{n=1}^{2m} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} + \frac{\ln(2m+1)}{2m+1}.$$

令 $m \rightarrow \infty$, 得

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^{2m+1} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^{2m} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n}.$$

于是由子列极限命题 (b) 可得

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} &= \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^{2m} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^m \left(\frac{\ln(2n-1)}{2n-1} - \frac{\ln(2n)}{2n} \right) \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\sum_{n=1}^m \frac{\ln n}{n} - \sum_{n=1}^m \frac{\ln(2n)}{2n} - \sum_{n=1}^m \frac{\ln(2n)}{2n} \right) = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\sum_{n=1}^m \frac{\ln n}{n} - \sum_{n=1}^m \frac{\ln n}{n} - \sum_{n=1}^m \frac{\ln 2}{n} \right) \end{aligned}$$

利用例题 2.53(2), 我们知道

$$\sum_{n=1}^m \frac{\ln 2}{n} = \ln 2 \cdot \ln m + \ln 2 \cdot \gamma + o(1), m \rightarrow \infty$$

由 0 阶 E-M 公式知道

$$\sum_{n=1}^m \frac{\ln n}{n} = \frac{\ln m}{2m} + \int_1^m \frac{\ln x}{x} dx + \int_1^m \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{\ln x}{x} \right)' dx$$

注意到 $\int_1^m \frac{\ln x}{x} dx = \frac{1}{2} \ln^2 m$ 以及

$$\left| \int_1^m \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{\ln x}{x} \right)' dx \right| = \left| \int_1^m \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \frac{1 - \ln x}{x^2} dx \right| \leq \frac{1}{2} \int_1^{\infty} \frac{|1 - \ln x|}{x^2} dx < \infty$$

于是我们有

$$\sum_{n=1}^m \frac{\ln n}{n} = \frac{1}{2} \ln^2 m + C + o(1), m \rightarrow \infty$$

这里 $C = \int_1^{\infty} \left(x - [x] - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{\ln x}{x} \right)' dx$. 现在结合上述渐近估计式就有

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{\ln n}{n} = \lim_{m \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2} \ln^2(2m) - \frac{1}{2} \ln^2 m - \ln 2 \cdot \ln m - \ln 2 \cdot \gamma + o(1) \right] = \frac{\ln^2 2}{2} - \ln 2 \cdot \gamma$$

□

例题 9.26

1. 计算

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}}{(n+1)(n+2)}$$

2. 计算

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}}{n(n+1)}$$

笔记 证明的想法即强行裂项.

证明

1. 记 $H_n \triangleq 1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}$, 我们有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}}{(n+1)(n+2)} &= \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\sum_{n=1}^m \frac{H_n}{n+1} - \sum_{n=1}^m \frac{H_n}{n+2} \right) \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\sum_{n=1}^m \frac{H_n}{n+1} - \sum_{n=1}^m \frac{H_{n+1}}{n+2} \right) + \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\sum_{n=1}^m \frac{H_{n+1}}{n+2} - \sum_{n=1}^m \frac{H_n}{n+2} \right) \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{H_1}{2} - \frac{H_{m+1}}{m+2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1)(n+2)} = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2} \right) = 1. \end{aligned}$$

2. 我们有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}}{n(n+1)} &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{H_n}{n} - \frac{H_n}{n+1} \right) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{H_n}{n} - \frac{H_{n+1}}{n+1} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{H_{n+1}}{n+1} - \frac{H_n}{n+1} \right) \\ &= H_1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1)^2} = \frac{\pi^2}{6}. \end{aligned}$$

□

例题 9.27 计算

$$\sum_{n=1}^{\infty} \arctan \frac{1}{2n^2}$$

 **笔记** 证明的想法即利用合适范围内都成立的恒等式

$$\arctan x - \arctan y = \arctan \frac{x - y}{1 + xy}$$

来裂项.

证明 我们有

$$\sum_{n=1}^{\infty} \arctan \frac{1}{2n^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\arctan \frac{n}{n+1} - \arctan \frac{n-1}{n} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \arctan \frac{n}{n+1} = \frac{\pi}{4}.$$

□

9.3.2 凑已知函数

例题 9.28 对 $|x| < 1$, 计算

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{4n^2 + 4n + 3}{2n+1} x^{2n}$$

证明 我们有

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4n^2 + 4n + 3}{2n+1} x^{2n} &= \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)x^{2n} + 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{2n+1} \\ &= \left(\sum_{n=0}^{\infty} x^{2n+1} \right)' + \frac{2}{x} \int_0^x \sum_{n=0}^{\infty} y^{2n} dy \\ &= \left(\frac{x}{1-x^2} \right)' + \frac{2}{x} \int_0^x \frac{1}{1-y^2} dy \\ &= \begin{cases} \frac{1+x^2}{(1-x^2)^2} + \frac{1}{x} \ln \frac{1+x}{1-x} & , x \neq 0 \\ 3 & , x = 0 \end{cases}. \end{aligned}$$

□

例题 9.29 计算

$$1 - \frac{1}{6} - \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(3k-4)(3k-7)\cdots 5 \cdot 2}{6^k k!}.$$

证明 我们有

$$\begin{aligned} 1 - \frac{1}{6} - \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(3k-4)(3k-7)\cdots 5 \cdot 2}{6^k k!} &= 1 - \frac{1}{6} - \sum_{k=2}^{\infty} \frac{3^{k-1} \prod_{j=2}^k (j - \frac{4}{3})}{6^k k!} \\ &= 1 - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-3)^{k-1} 3 \prod_{j=1}^k (\frac{1}{3} - j + 1)}{6^k k!} = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \binom{\frac{1}{3}}{k} \left(-\frac{1}{2}\right)^k = \left(1 - \frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{3}} = 2^{-\frac{1}{3}}. \end{aligned}$$

□

例题 9.30 对 $|x| < 1$, 计算

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2^k} \tan \frac{x}{2^k}.$$

证明 相似**例题 2.83**的计算, 我们有恒等式

$$\frac{\sin x}{2^n \sin \frac{x}{2^n}} = \prod_{k=1}^n \cos \frac{x}{2^k}.$$

于是

$$\sum_{k=1}^n \ln \cos \frac{x}{2^k} = \ln \sin x - n \ln 2 - \ln \sin \frac{x}{2^n}.$$

两边求导有

$$-\sum_{k=1}^n \frac{1}{2^k} \tan \frac{x}{2^k} = \frac{\cos x}{\sin x} - \frac{\cos \frac{x}{2^n}}{2^n \sin \frac{x}{2^n}}.$$

于是就有

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2^k} \tan \frac{x}{2^k} = -\frac{\cos x}{\sin x} + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\cos \frac{x}{2^n}}{2^n \sin \frac{x}{2^n}} = \begin{cases} -\frac{\cos x}{\sin x} + \frac{1}{x}, & 0 < |x| < 1 \\ 0, & x = 0 \end{cases}.$$

□

例题 9.31 设 $S_n = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^n}$ ($n = 2, 3, \dots$). 证明:

$$\sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \frac{S_n}{n} = \gamma$$

式中 γ 是 Euler 常数.

证明 注意到

$$\sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \frac{S_n}{n} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^n} = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n k^n},$$

又由 $\ln(1+x)$ 的幂级数展开知

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n k^n} = \frac{1}{k} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n k^n} = \frac{1}{k} - \ln \left(1 + \frac{1}{k}\right), \quad \forall k \in \mathbb{N}.$$

故对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 都有

$$\sum_{n=2}^m (-1)^n \frac{S_n}{n} = \sum_{k=1}^m \left[\frac{1}{k} - \ln \left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] = \sum_{k=1}^m \frac{1}{k} - \sum_{k=1}^m \ln \left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{k=1}^m \frac{1}{k} - \sum_{k=1}^m \ln \frac{k+1}{k} = \sum_{k=1}^m \frac{1}{k} - \sum_{k=1}^m [\ln(k+1) - \ln k] \\
&= \ln \frac{m}{m+1} + \gamma + O\left(\frac{1}{m}\right), \quad m \rightarrow \infty.
\end{aligned}$$

令 $m \rightarrow \infty$ 得

$$\sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \frac{S_n}{n} = \gamma.$$

□

9.3.3 生成函数和幂级数计算方法

例题 9.32 计算

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}\right) x^n.$$

笔记 使用 Cauchy 积计算幂级数有一个特点, 即系数往往出现求和结构.

证明 考虑 $a_n = 1, n \in \mathbb{N}_0, b_n = \begin{cases} \frac{1}{n}, & n \in \mathbb{N} \\ 0 & n = 0 \end{cases}$. 注意到

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \frac{1}{1-x}, \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n = -\ln(1-x),$$

并且上述级数在 $(-1, 1)$ 上绝对收敛, 于是由 Cauchy 积收敛定理及推论 9.1 可知

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}\right) x^n = -\frac{\ln(1-x)}{1-x}, |x| < 1.$$

收敛域可以直接注意到

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n} + \frac{1}{n+1}}{1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}} = 1,$$

以及

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}\right) 1^n = \infty, \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}\right) (-1)^n = \infty$$

故收敛域就是 $(-1, 1)$.

□

例题 9.33 设

$$f(x) = \frac{1}{1-x-x^2}, a_n = \frac{f^{(n)}(0)}{n!}, n = 0, 1, 2, \dots,$$

计算

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{n+1}}{a_n a_{n+2}}.$$

笔记 注意到形式幂级数法我们不需要担心考虑的 f 的幂级数是否收敛的问题. 因为这个方法最后往往可以算出一个具体的 f , 对这个 f 来说直接用数学归纳法计算验证会发现其 Taylor 多项式的系数恰好就是条件中的数列, 从而整个逻辑严谨. 因此这又是一个从逻辑上来说属于先猜后证的方法.

对本题而言, $f(x)$ 已知, 且容易求出其收敛半径. 此时用形式幂级数法本身就是严谨地.

证明 考虑 $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, 则对任意在其收敛域内的 x 我们有

$$1 = (1-x-x^2) \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+1} - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+2}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - \sum_{n=1}^{\infty} a_{n-1} x^n - \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-2} x^n \\
&= a_0 + a_1 x - a_0 x + \sum_{n=2}^{\infty} (a_n - a_{n-1} - a_{n-2}) x^n,
\end{aligned}$$

于是对比系数得

$$a_0 = 1, a_1 = a_0 = 1, a_n = a_{n-1} + a_{n-2}, n = 2, 3, \dots.$$

显然有

$$a_n \in \mathbb{N} \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty,$$

于是

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{n+1}}{a_n a_{n+2}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{a_n} - \frac{1}{a_{n+2}} \right) = \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{3}{2}.$$

注 (证明可见复分析教材) 为了求出 f 收敛半径, 可以展开点为中心作圆并一直扩大直到接触到和函数在 \mathbb{C} 上第一个奇点为止. 对于 $f(x) = \frac{1}{1-x-x^2}$, 第一个奇点即使得 $\frac{1}{1-x-x^2}$ 分母为 0 且模更小的点 $\frac{\sqrt{5}-1}{2}$. 于是 $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 收敛半径为 $\frac{\sqrt{5}-1}{2}$. 于是我们得到一个极限

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \frac{2}{\sqrt{5}-1} = \frac{\sqrt{5}+1}{2}.$$

□

例题 9.34 设 $a_0 = 0, a_1 = \frac{2}{3}, (n+1)a_{n+1} = 2a_n + (n-1)a_{n-1}, n \in \mathbb{N}$, 计算 $\sum_{n=0}^{\infty} n a_n x^n$ 收敛域和和函数.

证明 记 $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, 形式的, 我们有

$$\sum_{n=1}^{\infty} (n+1)a_{n+1} x^{n-1} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} a_n x^{n-1} + \sum_{n=1}^{\infty} (n-1)a_{n-1} x^{n-1}.$$

于是

$$\frac{1}{x} [f'(x) - a_1] = \frac{2}{x} [f(x) - a_0] + x f'(x) \Rightarrow \frac{1}{x} \left[f'(x) - \frac{2}{3} \right] = \frac{2}{x} f(x) + x f'(x).$$

故解微分方程得 $f(x) = \frac{2x}{3-3x}, x \in (-1, 1)$. 这给出了 $a_n = \frac{2}{3}, n \in \mathbb{N}$. 于是

$$\sum_{n=0}^{\infty} n a_n x^n = \frac{2}{3} \sum_{n=0}^{\infty} n x^n = \frac{2}{3} x \left(\sum_{n=0}^{\infty} x^n \right)' = \frac{2}{3} x \left(\frac{1}{1-x} \right)' = \frac{2x}{3(1-x)^2}, x \in (-1, 1).$$

□

例题 9.35

1. 计算

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} x^{2n+1}.$$

2. 计算

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots n}{3 \cdot 5 \cdot 7 \cdots 2n+1} \right) \cdot \frac{1}{n+1} \right].$$

注 第 2 问是第十届大学生数学竞赛非数学类决赛得分率非常低的一个题. 可以看到如果我们平时记忆 $\arcsin^2 x$ 展开, 就能快速解题而规避掉最容易考的构造微分方程求解幂级数的技巧. 这一点我们在**命题 3.1**中也提到过.

证明

1. 考虑

$$g(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} x^{2n+1}, g'(x) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} x^{2n},$$

我们有

$$\begin{aligned} g'(x) &= 1 + x \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-2)!!}{(2n-1)!!} 2nx^{2n-1} = 1 + x \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-2)!!}{(2n-1)!!} x^{2n} \right)' \\ &= 1 + x \left(x \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-2)!!}{(2n-1)!!} x^{2n-1} \right)' = 1 + x[xg(x)]', \end{aligned}$$

即

$$g'(x) - \frac{x}{1-x^2} g(x) = \frac{1}{1-x^2}, g(0) = 0.$$

由常数变易法得 $g(x) = \frac{\arcsin x}{\sqrt{1-x^2}}$. 于是收敛区间为 $|x| < 1$. 由

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} g(x) = +\infty, \lim_{x \rightarrow -1^+} g(x) = +\infty$$

知幂级数在 $x = \pm 1$ 不收敛, 故收敛域为 $|x| < 1$.

2. 首先把级数写成

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots n}{3 \cdot 5 \cdot 7 \cdots 2n+1} \right) \cdot \frac{1}{n+1} \right] = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{n!}{(2n+1)!!} \cdot \frac{1}{n+1} \right].$$

然后利用等式 $(2n)!! = 2^n n!$ 可考虑

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} \frac{x^{2n+2}}{n+1} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{n!}{(2n+1)!!} \cdot \frac{(\sqrt{2}x)^{2n+2}}{n+1} \right].$$

现在所求级数为 $2f\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$. 我们利用第 1 问有

$$f'(x) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} x^{2n+1} = 2 \left(\frac{\arcsin x}{\sqrt{1-x^2}} - x \right).$$

于是我们有

$$2f\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) - 2f(0) = 2 \int_0^{\frac{1}{\sqrt{2}}} \left[2 \left(\frac{\arcsin x}{\sqrt{1-x^2}} - x \right) \right] dx = \frac{\pi^2}{8} - 1.$$

□

例题 9.36 计算 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(4n)!}$.

证明 注意到

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{4n}}{(4n)!}, f'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{4n-1}}{(4n-1)!}, f''(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{4n-2}}{(4n-2)!}, f'''(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{4n-3}}{(4n-3)!}.$$

于是我们有

$$f + f' + f'' + f''' = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = e^x.$$

注意到 $f(0) = 1, f'(0) = f''(0) = f'''(0) = 0$, 求解微分方程 (Euler 待定指数法) 得解 $f(x) = \frac{1}{4}(e^{-x} + e^x + 2 \cos x)$.

□

9.3.4 多重求和

例题 9.37 计算

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m^2 n}{3^m (n3^m + m3^n)}.$$



笔记 二重级数一类题型往往用对称性来简化结构。

证明 直接计算有

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m^2 n}{3^m (n 3^m + m 3^n)} &\xrightarrow{\text{级数的 Fubini 定理}} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m n^2}{3^n (m 3^n + n 3^m)} = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^m m n^2 + 3^n m^2 n}{3^{n+m} (m 3^n + n 3^m)} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m n}{3^{n+m}} = \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^{\infty} \frac{m}{3^m} \right)^2 = \frac{9}{32}, \end{aligned}$$

这里最后的级数是一个差比数列, 高中数学的错位相减可以直接算出结果. 或者利用凑已知函数的方法计算:

$$\sum_{m=1}^{\infty} m x^m = x \left(\sum_{m=1}^{\infty} x^m \right)' = x \cdot \left(\frac{1}{1-x} \right)' = \frac{x}{(1-x)^2}.$$

将 $x = \frac{1}{3}$ 代入得

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{m}{3^m} = \frac{3}{4} \Rightarrow \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^{\infty} \frac{m}{3^m} \right)^2 = \frac{9}{32}.$$

□

例题 9.38 计算

$$\left[\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{100 m^2 n}{2^m (n 2^m + m 2^n)} \right].$$

证明 我们有

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{100 m^2 n}{2^m (n 2^m + m 2^n)} &\xrightarrow{\text{级数的 Fubini 定理}} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{100 m n^2}{2^n (m 2^n + n 2^m)} = 50 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{m^2 n}{2^m (n 2^m + m 2^n)} + \frac{n^2 m}{2^n (m 2^n + n 2^m)} \right) \\ &= 50 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{m n \left(\frac{m}{2^m} + \frac{n}{2^n} \right)}{n 2^m + m 2^n} \right) = 50 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m n}{2^{m+n}} = 50 \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{2^n} \right)^2 = 200. \end{aligned}$$

□

9.3.5 级数特殊算法 (换序法)

例题 9.39

1. 证明: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} = \frac{\pi^2}{8}$.
2. 证明: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^3} = \frac{\pi^3}{32}$.
3. 证明: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 2^n} = \frac{\pi^2}{12} - \frac{\ln^2 2}{2}$.

注 熟知 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}$.

证明

1. 我们有

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n)^2} = \frac{3}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{8}.$$

2. (考试肯定会给提示或多设置一问) 注意到傅立叶展开 $f(x) = x^3 - \pi^2 x, x \in [-\pi, \pi]$ 得

$$x^3 - \pi^2 x \sim 12 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^3} \sin(nx).$$

考虑 $x = \frac{\pi}{2}$ 即得

$$12 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^3} \sin(nx) = -12 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^3} \sin\left(\frac{\pi}{2}(2n-1)\right) = -12 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^3} \sin\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right) = 12 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n-1)^3}.$$

$$\text{故 } 12 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n-1)^3} = \frac{\pi^3}{32}.$$

$$3. \text{ 由命题 8.5(2) 得到 } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 2^n} = \frac{\pi^2}{12} - \frac{\ln^2 2}{2}.$$

□

例题 9.40 设 $f \in C^1[0, 1]$, $f(x) \geq 0$, 证明下述级数收敛且求值

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \int_0^1 x^n f(x) dx.$$

笔记 为了有换序

$$\sum_{n=1}^{\infty} \int f_n(x) dx = \int \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x) dx,$$

我们只需要

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^m \int f_n(x) dx = \lim_{m \rightarrow \infty} \int \sum_{n=1}^m f_n(x) dx = \int \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x) dx,$$

即需要证明

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \int \sum_{n=m+1}^{\infty} f_n(x) dx = 0.$$

注 实际上, 这里的换序就是控制收敛定理.

证明 显然 $\int_0^1 x^n f(x) dx$ 递减且

$$0 \leq \int_0^1 x^n f(x) dx \leq \max f \cdot \int_0^1 x^n dx \rightarrow 0, n \rightarrow \infty,$$

故由交错级数判别法知 $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \int_0^1 x^n f(x) dx$ 收敛. 故

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \int_0^1 x^n f(x) dx = - \int_0^1 \sum_{n=1}^{\infty} (-x)^n f(x) dx = \int_0^1 \frac{xf(x)}{1+x} dx,$$

这里换序来自

$$\left| \int_0^1 \sum_{n=m}^{\infty} (-x)^n f(x) dx \right| \stackrel{\text{交错级数不等式}}{\leq} \int_0^1 x^m f(x) dx \rightarrow 0, m \rightarrow \infty.$$

□

命题 9.8 (组合数的无穷和技巧)

1. 我们有

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n (y+x)^n = \sum_{k=0}^{\infty} b_k y^k \Rightarrow b_k = x^{-k} \sum_{n=k}^{\infty} C_n^k a_n x^n.$$

2. 我们有

$$\sum_{n=0}^m a_n (y+x)^n = \sum_{k=0}^m b_k y^k \Rightarrow b_k = x^{-k} \sum_{n=k}^m C_n^k a_n x^n.$$

证明

□

例题 9.41 计算

$$\sum_{n=k}^{\infty} C_n^k \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}\right) x^n, k \in \mathbb{N}.$$

证明 取 $a_n = 1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}$, $n \in \mathbb{N}$. 由例题 9.32, 我们有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}\right) (y+x)^n &= -\frac{\ln(1-x-y)}{1-x-y} = -\frac{\ln(1-x)}{1-x} \frac{1}{1-\frac{y}{1-x}} - \frac{1}{1-x} \frac{\ln(1-\frac{y}{1-x})}{1-\frac{y}{1-x}} \\ &= -\frac{\ln(1-x)}{1-x} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{y^k}{(1-x)^k} + \frac{1}{1-x} \sum_{k=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{k}\right) \frac{y^k}{(1-x)^k} \\ &= -\frac{\ln(1-x)}{1-x} + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{k} - \ln(1-x)}{(1-x)^{k+1}} \right] y^k \end{aligned}$$

于是由命题 9.8, 我们有

$$\sum_{n=k}^{\infty} C_n^k \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}\right) x^n = b_k x^k = \left[\frac{1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{k} - \ln(1-x)}{(1-x)^{k+1}} \right] x^k$$

注意到和函数第一个奇点是 $x = 1$, 所以幂级数收敛半径是 1. 注意到和函数在 $x = 1$ 的左极限发散, 因此幂级数在 $x = 1$ 不收敛. 虽然和函数在 $x = -1$ 的右极限收敛, 但并不能一定能推出幂级数在 $x = -1$ 收敛, 为了判断 $x = -1$ 的收敛性, 我们要使用小 o Tauber 定理.

若 $\lim_{x \rightarrow 1^-} \sum_{n=k}^{\infty} C_n^k \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}\right) (-x)^n$ 存在, 则由小 o Tauber 定理知

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{n=k}^{k+m} \left[(-1)^n n C_n^k \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}\right) \right] = 0.$$

注意到

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{2m} \sum_{n=k}^{k+2m} \left[(-1)^n n C_n^k \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}\right) \right] = 0.$$

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{2m+1} \sum_{n=k}^{k+2m+1} \left[(-1)^n n C_n^k \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}\right) \right] = 0.$$

我们有

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{(-1)^{k+2m+1} (k+2m+1) C_{k+2m+1}^k \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{k+2m+1}\right)}{2m+1} = 0.$$

又

$$\lim_{m \rightarrow \infty} C_{k+2m+1}^k = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{(k+2m+1)!}{k!(2m+1)!} = +\infty.$$

矛盾! 因此我们证明了原幂级数收敛域是 $(-1, 1)$.

□

9.4 级数一致收敛性判断

定理 9.20 (函数列一致收敛的柯西准则)

函数列 $\{f_n\}$ 在数集 D 上一致收敛的充要条件是: 对任给正数 ε , 总存在正数 N , 使得当 $n, m > N$ 时, 对一切 $x \in D$, 都有

$$|f_n(x) - f_m(x)| < \varepsilon. \quad (9.31)$$

♡

证明 必要性 设 $f_n(x) \rightrightarrows f(x)$ ($n \rightarrow \infty$), $x \in D$, 即对任给 $\varepsilon > 0$, 存在正数 N , 使得当 $n > N$ 时, 对一切 $x \in D$, 都有

$$|f_n(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{2}. \quad (9.32)$$

于是当 $n, m > N$, 由 (11.5) 就有

$$|f_n(x) - f_m(x)| \leq |f_n(x) - f(x)| + |f(x) - f_m(x)| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon.$$

充分性 若条件 (9.31) 成立, 由数列收敛的柯西准则, $\{f_n\}$ 在 D 上任一点都收敛, 记其极限函数为 $f(x)$, $x \in D$. 现固定 (9.31) 式中的 n , 让 $m \rightarrow \infty$, 于是当 $n > N$ 时, 对一切 $x \in D$, 都有

$$|f_n(x) - f(x)| \leq \varepsilon.$$

因此, $f_n(x) \rightrightarrows f(x)$ ($n \rightarrow \infty$), $x \in D$. □

定理 9.21

函数列 $\{f_n\}$ 在区间 D 上一致收敛于 f 的充要条件是:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in D} |f_n(x) - f(x)| = 0. \quad (9.33)$$

证明 必要性 若 $f_n(x) \rightrightarrows f(x)$ ($n \rightarrow \infty$), $x \in D$. 则对任给的正数 ε , 存在不依赖于 x 的正整数 N , 当 $n > N$ 时, 有

$$|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon, \quad x \in D.$$

由上确界的定义, 亦有

$$\sup_{x \in D} |f_n(x) - f(x)| \leq \varepsilon.$$

这就证得 (9.33) 式成立.

由假设, 对任给 $\varepsilon > 0$, 存在正整数 N , 使得当 $n > N$ 时, 有

$$\sup_{x \in D} |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon. \quad (9.34)$$

因为对一切 $x \in D$, 总有

$$|f_n(x) - f(x)| \leq \sup_{x \in D} |f_n(x) - f(x)|,$$

故由 (9.34) 式得

$$|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon.$$

于是 $\{f_n\}$ 在 D 上一致收敛于 f . □

推论 9.2

函数列 $\{f_n\}$ 在 D 上不一致收敛于 f 的充分且必要条件是: 存在 $\{x_n\} \subset D$, 使得 $\{f_n(x_n) - f(x_n)\}$ 不收敛于 0. ♡

定理 9.22 (一致收敛的柯西准则)

函数项级数 $\sum u_n(x)$ 在数集 D 上一致收敛的充要条件为: 对任给的正数 ε , 总存在某正整数 N , 使得当 $n > N$ 时, 对一切 $x \in D$ 和一切正整数 p , 都有

$$|S_{n+p}(x) - S_n(x)| < \varepsilon$$

或

$$|u_{n+1}(x) + u_{n+2}(x) + \cdots + u_{n+p}(x)| < \varepsilon. \quad \text{♡}$$

推论 9.3

函数项级数 $\sum u_n(x)$ 在数集 D 上一致收敛的必要条件是函数列 $\{u_n(x)\}$ 在 D 上一致收敛于零.

**定理 9.23**

函数项级数 $\sum u_n(x)$ 在数集 D 上一致收敛于 $S(x)$ 的充要条件是

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in D} |R_n(x)| = \lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in D} |S(x) - S_n(x)| = 0.$$

**定理 9.24 (A-D 判别法)**

若 $\sum_{i=1}^{\infty} a_n(x)b_n(x)$ 在定义域内满足下列两条件之一, 则其在定义域上一致收敛

(1) $\{a_n(x)\}$ 对于固定的 x 关于 n 单调, 且在定义域内一致有界; $\sum_{i=1}^n b_n$ 一致收敛.(Abel 判别法)

(2) $\{a_n(x)\}$ 对于固定的 x 关于 n 单调, 且一致趋于 0; $\sum_{i=1}^n b_n$ 一致有界.(Dirichlet 判别法)

**定理 9.25**

设函数列 $\{f_n\}$ 在 $(a, x_0) \cup (x_0, b)$ 上一致收敛于 $f(x)$, 且对每个 n , $\lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x) = a_n$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ 和 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ 均存在且相等.



证明 先证 $\{a_n\}$ 是收敛数列. 对任意 $\varepsilon > 0$, 由于 $\{f_n\}$ 一致收敛, 故有 N , 当 $n > N$ 时, 对任意正整数 p 和对一切 $x \in (a, x_0) \cup (x_0, b)$, 有

$$|f_n(x) - f_{n+p}(x)| < \varepsilon. \quad (9.35)$$

从而

$$|a_n - a_{n+p}| = \lim_{x \rightarrow x_0} |f_n(x) - f_{n+p}(x)| \leq \varepsilon.$$

这样由柯西准则可知 $\{a_n\}$ 是收敛数列.

设 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = A$. 再证 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$.

由于 $f_n(x)$ 一致收敛于 $f(x)$ 及 a_n 收敛于 A , 因此对任意 $\varepsilon > 0$, 存在正数 N , 当 $n > N$ 时, 对任意 $x \in (a, x_0) \cup (x_0, b)$,

$$|f_n(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{3} \quad \text{和} \quad |a_n - A| < \frac{\varepsilon}{3}$$

同时成立. 特别取 $n = N + 1$, 有

$$|f_{N+1}(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{3}, \quad |a_{N+1} - A| < \frac{\varepsilon}{3}.$$

又 $\lim_{x \rightarrow x_0} f_{N+1}(x) = a_{N+1}$, 故存在 $\delta > 0$, 当 $0 < |x - x_0| < \delta$ 时,

$$|f_{N+1}(x) - a_{N+1}| < \frac{\varepsilon}{3}.$$

这样, 当 x 满足 $0 < |x - x_0| < \delta$ 时,

$$\begin{aligned} |f(x) - A| &\leq |f(x) - f_{N+1}(x)| + |f_{N+1}(x) - a_{N+1}| + |a_{N+1} - A| \\ &< \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon, \end{aligned}$$

即 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$.



定理 9.26 (连续性)

若函数列 $\{f_n\}$ 在区间 I 上一致收敛, 且每一项都连续, 则其极限函数 f 在 I 上也连续.



笔记 由这个定理可知, 若各项为连续函数的函数列在区间 I 上其极限函数不连续, 则此函数列在区间 I 上不一致收敛.

证明 设 x_0 为 I 上任一点. 由于 $\lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x) = f_n(x_0)$, 于是由定理 9.25 知 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ 亦存在, 且 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x_0) = f(x_0)$, 因此 $f(x)$ 在 x_0 上连续. □

推论 9.4

若连续函数列 $\{f_n\}$ 在区间 I 上内闭一致收敛于 f , 则 f 在 I 上连续.

**定理 9.27 (可积性)**

若函数列 $\{f_n\}$ 在 $[a, b]$ 上一致收敛, 且每一项都连续, 则

$$\int_a^b \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n(x) dx. \quad (9.36)$$



证明 设 f 为函数列 $\{f_n\}$ 在 $[a, b]$ 上的极限函数. 由定理 9.26, f 在 $[a, b]$ 上连续, 从而 f_n ($n = 1, 2, \dots$) 与 f 在 $[a, b]$ 上都可积.

因为在 $[a, b]$ 上 $f_n \Rightarrow f$ ($n \rightarrow \infty$), 故对任给正数 ε , 存在 N , 当 $n > N$ 时, 对一切 $x \in [a, b]$, 都有

$$|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon.$$

再根据定积分的性质, 当 $n > N$ 时有

$$\begin{aligned} \left| \int_a^b f_n(x) dx - \int_a^b f(x) dx \right| &= \left| \int_a^b (f_n(x) - f(x)) dx \right| \\ &\leq \int_a^b |f_n(x) - f(x)| dx \\ &\leq \varepsilon(b - a). \end{aligned}$$

这就证明了等式 (9.36). □

定理 9.28 (可微性)

设 $\{f_n\}$ 为定义在 $[a, b]$ 上的函数列, 若 $x_0 \in [a, b]$ 为 $\{f_n\}$ 的收敛点, $\{f_n\}$ 的每一项在 $[a, b]$ 上有连续的导数, 且 $\{f'_n\}$ 在 $[a, b]$ 上一致收敛, 则

$$\frac{d}{dx} \left(\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{d}{dx} f_n(x). \quad (9.37)$$



证明 设 $f_n(x_0) \rightarrow A$ ($n \rightarrow \infty$), $f'_n \Rightarrow g$ ($n \rightarrow \infty$), $x \in [a, b]$. 我们要证明函数列 $\{f_n\}$ 在区间 $[a, b]$ 上收敛, 且其极限函数的导数存在且等于 g .

由定理条件, 对任一 $x \in [a, b]$, 总有

$$f_n(x) = f_n(x_0) + \int_{x_0}^x f'_n(t) dt.$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, 右边第一项极限为 A , 第二项极限为 $\int_{x_0}^x g(t) dt$ (定理 9.27), 所以左边极限存在, 记为 f , 则有

$$f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x_0) + \int_{x_0}^x g(t) dt,$$

其中 $f(x_0) = A$. 由 g 的连续性及微积分学基本定理推得

$$f' = g.$$

这就证明了等式 (9.37). □

定理 9.29 (连续性)

若函数项级数 $\sum u_n(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上一致收敛, 且每一项都连续, 则其和函数在 $[a, b]$ 上也连续.



笔记 这个定理指出: 在一致收敛条件下,(无限项)求和运算与求极限运算可以交换顺序, 即

$$\sum \left(\lim_{x \rightarrow x_0} u_n(x) \right) = \lim_{x \rightarrow x_0} \left(\sum u_n(x) \right).$$

定理 9.30 (逐项求积)

若函数项级数 $\sum u_n(x)$ 在 $[a, b]$ 上一致收敛, 且每一项 $u_n(x)$ 都连续, 则

$$\sum \int_a^b u_n(x) dx = \int_a^b \sum u_n(x) dx.$$



定理 9.31 (逐项求导)

若函数项级数 $\sum u_n(x)$ 在 $[a, b]$ 上每一项都有连续的导函数, $x_0 \in [a, b]$ 为 $\sum u_n(x)$ 的收敛点, 且 $\sum u'_n(x)$ 在 $[a, b]$ 上一致收敛, 则

$$\sum \left(\frac{d}{dx} u_n(x) \right) = \frac{d}{dx} \left(\sum u_n(x) \right).$$



例题 9.42 判断下列级数在指定区间一致收敛性:

1. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\sqrt[3]{n + \sqrt{x}}}, [0, +\infty);$
2. $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{n+x^2}{n^2}, [-a, a], a > 0;$
3. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x^{n-1}}{n} - \frac{x^n}{n+1} \right), [-1, 1];$
4. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{(1+x)(1+x^2) \cdots (1+x^n)}, [0, +\infty);$
5. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x}{1+nx^2} \sin \frac{1}{\sqrt{nx}} \arctan \left(\sqrt{\frac{x}{n}} \right), (0, +\infty);$
6. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 x}{x+n^3 x^2}, (0, +\infty);$
7. $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\arctan \frac{x}{n^2+x^2} \right)^2, [0, +\infty).$

注 第 4 问可以通过裂项算出级数的和函数:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{(1+x)(1+x^2) \cdots (1+x^n)} &= \frac{x}{1+x} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{x^n}{(1+x)(1+x^2) \cdots (1+x^n)} \\ &= \frac{x}{1+x} + \sum_{n=2}^{\infty} \left[\frac{1}{(1+x)(1+x^2) \cdots (1+x^{n-1})} - \frac{1}{(1+x)(1+x^2) \cdots (1+x^n)} \right] \\ &= \frac{x}{1+x} + \frac{1}{1+x} - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(1+x)(1+x^2) \cdots (1+x^n)} \end{aligned}$$

$$= 1 - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(1+x)(1+x^2) \cdots (1+x^n)} = 1 - \prod_{n=1}^{\infty} \frac{1}{1+x^n}.$$

但 $\prod_{n=1}^{\infty} \frac{1}{1+x^n}$ 的一致收敛性不好判断 (这个方法比较复杂), 因此我们不采取这个方法.

证明

1. 显然 $\left| \sum_{j=1}^n (-1)^j \right| \leq 2$ 以及对每一个 $x \in [0, +\infty)$ 都有 $\frac{1}{\sqrt[3]{n+\sqrt{x}}}$ 单调递减. 又
- $$\frac{1}{\sqrt[3]{n+\sqrt{x}}} \leq \frac{1}{\sqrt[3]{n}} \rightarrow 0, n \rightarrow \infty,$$

我们由一致收敛的 A-D 判别法有 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\sqrt[3]{n+\sqrt{x}}}$ 在 $[0, +\infty)$ 一致收敛.

2. 显然 $\left| \sum_{j=1}^n (-1)^j \right| \leq 2$ 以及对每一个 $x \in [-a, a]$ 都有 $\frac{n+x^2}{n^2}$ 单调递减. 又

$$\frac{n+x^2}{n^2} \leq \frac{n+a^2}{n^2} \rightarrow 0, n \rightarrow \infty,$$

我们由一致收敛的 A-D 判别法有 $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{n+x^2}{n^2}$ 在 $[-a, a]$ 一致收敛.

3. 注意到

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \sup_{x \in [-1, 1]} \left| \sum_{n=m}^{\infty} \left(\frac{x^{n-1}}{n} - \frac{x^n}{n+1} \right) \right| = \lim_{m \rightarrow \infty} \sup_{x \in [-1, 1]} \frac{x^m}{m+1} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m+1} = 0,$$

我们有 $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x^{n-1}}{n} - \frac{x^n}{n+1} \right)$ 在 $[-1, 1]$ 一致收敛.

4. 一方面, 对 $x \in [1, +\infty), n \in \mathbb{N}$, 我们有

$$\frac{x^n}{(1+x)(1+x^2) \cdots (1+x^{n-1})(1+x^n)} \leq \frac{1}{2^{n-1}}, \forall x \in [1, +\infty).$$

另外一方面, 对 $n \geq 2, x \in [0, 1)$, 我们有

$$\begin{aligned} \frac{x^{2n+1}}{(1+x)(1+x^2) \cdots (1+x^{2n+1})} &\leq \frac{x^{2n}}{(1+x)(1+x^2) \cdots (1+x^{2n})} \\ &\leq \underbrace{\frac{x^{2n}}{(1+x^n)(1+x^n) \cdots (1+x^n)}}_{n \uparrow} \leq \frac{x^{2n}}{C_n^2 x^{2n}} = \frac{2}{n(n-1)}. \end{aligned}$$

即由 Weierstrass 判别法和

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{n-1}} < \infty, \sum_{n=2}^{\infty} \frac{2}{n(n-1)} < \infty,$$

我们知道原级数一致收敛.

5. 首先

$$\left| \sin \frac{1}{\sqrt{nx}} \arctan \left(\sqrt{\frac{x}{n}} \right) \right| \leq \sqrt{\frac{x}{n}}, \forall x > 0, n \in \mathbb{N}.$$

然后

$$\left(\frac{\sqrt{x}}{n} \frac{x}{1+nx^2} \right)' = \frac{\sqrt{x}(3-nx^2)}{2n(1+x^2n)^2} \Rightarrow \frac{\sqrt{x}}{n} \frac{x}{1+nx^2} \leq \frac{\sqrt{x}}{n} \frac{x}{1+nx^2} \Big|_{x=\sqrt{\frac{3}{n}}} = \frac{3^{\frac{3}{4}}}{4} \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{7}{4}}.$$

于是

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x}{1+nx^2} \sin \frac{1}{\sqrt{nx}} \arctan \left(\sqrt{\frac{x}{n}} \right) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{\frac{x}{n}} \frac{x}{1+nx^2} \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^{\frac{3}{4}}}{4} \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{7}{4}} < +\infty.$$

这就证明了 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x}{1+nx^2} \sin \frac{1}{\sqrt{nx}} \arctan \left(\sqrt{\frac{x}{n}} \right)$ 在 $(0, +\infty)$ 一致收敛.

6. 我们有

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 x}{x+n^3 x^2} \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 x}{2n^{\frac{3}{2}} x^{\frac{3}{2}}} \leq \sup_{x \in (0, +\infty)} \frac{\sin^2 x}{2x^{\frac{3}{2}}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{\frac{3}{2}}} < \infty,$$

即 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 x}{x+n^3 x^2}$ 在 $(0, +\infty)$ 一致收敛.

7. 因为

$$\left(\frac{x}{n^2+x^2} \right)' = \frac{n^2-x^2}{(x^2+n^2)^2},$$

于是我们有

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left(\arctan \frac{x}{n^2+x^2} \right)^2 \leq \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x}{n^2+x^2} \right)^2 \leq \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n}{n^2+n^2} \right)^2 < \infty,$$

即 $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\arctan \frac{x}{n^2+x^2} \right)^2$ 在 $[0, +\infty)$ 一致收敛.

□

例题 9.43 证明

$$\int_{e^3}^{\infty} \frac{\sin(xy)}{\ln \ln y} dy$$

在 $x \in (0, +\infty)$ 非一致收敛.

证明 注意到对 $\forall A = \frac{n}{4} > e^3$, 有 $\frac{\pi}{2}n > \frac{\pi}{4}n > A$, 再取 $x = \frac{1}{n}$, 则

$$\left| \int_{\frac{\pi}{4}n}^{\frac{\pi}{2}n} \frac{\sin(\frac{1}{n}y)}{\ln \ln y} dy \right| \geq \int_{\frac{\pi}{4}n}^{\frac{\pi}{2}n} \frac{\sin \frac{\pi}{4}}{\ln \ln(\frac{\pi}{2}n)} dy = \frac{\pi n}{4\sqrt{2} \ln \ln(\frac{\pi}{2}n)} \rightarrow +\infty, n \rightarrow \infty.$$

故由不一致收敛的 Cauchy 收敛准则知, $\int_{e^3}^{+\infty} \frac{\sin(xy)}{\ln \ln y} dy$ 在 $(0, +\infty)$ 上不一致收敛.

□

例题 9.44 级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n}$ 在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 是否一致收敛.

笔记 连续函数列 $\{f_n\}$ 在区间 I 一致收敛, 则在 \bar{I} 也一致收敛, 这是因为有等式

$$\sup_{x \in I} |f_n(x) - f_m(x)| = \sup_{x \in \bar{I}} |f_n(x) - f_m(x)|.$$

我们可以猜测级数值

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n} &= \sum_{n=1}^{\infty} \Im \left(\frac{e^{inx}}{n} \right) = \Im \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{inx}}{n} = \Im(-\ln(1-e^{ix})) = -\arg(1-e^{ix}) \\ &= -\arg(1-\cos x - i \sin x) = -\arctan \frac{-\sin x}{1-\cos x} = \arctan \frac{2 \sin \frac{x}{2} \cos \frac{x}{2}}{2 \sin^2 \frac{x}{2}} \\ &= \arctan \frac{1}{\tan \frac{x}{2}} = \frac{\pi}{2} - \arctan \tan \frac{x}{2} = \frac{\pi-x}{2}, \end{aligned}$$

然后对 $\frac{\pi-x}{2}, x \in (0, \pi)$ 做奇延拓之后在 $[-\pi, \pi]$ 展开为傅立叶级数, 从而得到

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n} = \frac{\pi-x}{2}, x \in (0, \pi).$$

这个级数结果应当记忆. 注意到上述和函数与 x 有关, 故原级数一定不一致收敛, 下面将证明严格化.

证明 对 $\frac{\pi-x}{2}, x \in (0, \pi)$ 做奇延拓之后在 $[-\pi, \pi]$ 展开为傅立叶级数, 得到

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n} = \frac{\pi-x}{2}, x \in (0, \pi).$$

若 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n}$ 在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 一致收敛, 则在 $[0, \frac{\pi}{2})$ 也一致收敛. 但是

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n \cdot 0)}{n} = 0 \neq \lim_{x \rightarrow 0^+} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \left(\frac{\pi - x}{2} \right) = \frac{\pi}{2},$$

这就和 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n}$ 在 $x = 0$ 应该连续矛盾! 因此 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n}$ 在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 不一致收敛.

□

例题 9.45 设 $f \in C^1(\mathbb{R})$, 令

$$f_n(x) = n \left[f \left(x + \frac{1}{n} \right) - f(x) \right], n = 1, 2, \dots$$

试证明对任给区间 $[a, b]$ 都有 $f_n(x)$ 一致收敛到 $f'(x)$.

证明 由Cantor 定理及 $f \in C^1(\mathbb{R})$ 可知 f' 内闭一致连续性, 于是对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $\delta > 0$ 使得当 $x \in [a, b], t \in [0, \delta]$, 我们有

$$|f'(x + t) - f'(x)| \leq \varepsilon.$$

当 $n > \frac{1}{\delta}$, 我们对任何 $x \in [a, b]$ 有

$$\begin{aligned} |f_n(x) - f'(x)| &= n \left| \int_x^{x+\frac{1}{n}} f'(y) - f'(x) dy \right| \\ &\leq n \int_x^{x+\frac{1}{n}} |f'(y) - f'(x)| dy = n \int_0^{\frac{1}{n}} |f'(x + t) - f'(x)| dt \\ &\leq \varepsilon n \int_0^{\frac{1}{n}} 1 dt = \varepsilon, \end{aligned}$$

这就证明了 $f_n(x)$ 在 $[a, b]$ 一致收敛到 $f'(x)$.

□

例题 9.46 讨论下列函数在给定区间可微性.

1. $\sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi x}, (0, +\infty);$
2. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n^3}, (-\infty, +\infty);$
3. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{\sqrt{n}} \arctan \left(\frac{x}{\sqrt{n}} \right), (-\infty, +\infty);$
4. $\sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{n} \tan^n x, \left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4} \right).$

证明

1. $\sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi x}$ 显然收敛. 考虑逐项微分级数

$$\sum_{n=1}^{\infty} (e^{-n^2 \pi x})' = \sum_{n=1}^{\infty} -n^2 \pi e^{-n^2 \pi x}.$$

对任何 $[a, b] \subset (0, +\infty)$, 我们有

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left| -n^2 \pi e^{-n^2 \pi x} \right| \leq \sum_{n=1}^{\infty} n^2 \pi e^{-n^2 \pi a} < \infty,$$

即内闭一致收敛, 因此由定理 9.31 可知 $\sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi x}$ 在 $(0, +\infty)$ 可微.

2. 注意到

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{\sin(nx)}{n^3} \right| \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} < \infty, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{\cos(nx)}{n^2} \right| \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} < \infty,$$

于是我们有原级数和逐项微分级数一致收敛, 因此 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n^3}$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 可微.

3. 显然

$$\frac{1}{\sqrt{n}} \arctan\left(\frac{x}{\sqrt{n}}\right) \Rightarrow 0, \forall x \in \mathbb{R},$$

于是由莱布尼兹判别法知原级数收敛. 考虑逐项微分级数

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{(-1)^{n+1}}{\sqrt{n}} \arctan\left(\frac{x}{\sqrt{n}}\right) \right)' = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \frac{1}{1 + \frac{x^2}{n}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n + x^2}.$$

注意到

$$\left| \sum_{j=1}^n (-1)^{j+1} \right| \leq 1, \quad \left| \frac{1}{n+x^2} \right| \leq 1, \forall x \in \mathbb{R}, n \in \mathbb{N},$$

以及对任何 $x \in \mathbb{R}$ 都有 $\frac{1}{n+x^2}$ 递减, 因此由一致收敛的 A-D 判别法我们知道逐项微分级数一致收敛. 因此

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{\sqrt{n}} \arctan\left(\frac{x}{\sqrt{n}}\right) \text{ 在 } (-\infty, +\infty) \text{ 可微.}$$

4. 显然 $\sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{n} \tan^n x$ 在 $\left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right)$ 收敛. 因为可微性是局部的概念, 我们来证明逐项微分级数

$$\sum_{n=1}^{\infty} n \sqrt{n} \tan^{n-1} x (\tan^2 x + 1)$$

在任何 $[a, b] \subset \left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right)$ 一致收敛.

显然存在 $c_{a,b} \in (0, 1)$ 使得

$$|\tan x| \leq c_{a,b}, \forall x \in [a, b].$$

于是我们知道

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left| n \sqrt{n} \tan^{n-1} x (\tan^2 x + 1) \right| \leq 2 \sum_{n=1}^{\infty} n \sqrt{n} c_{a,b}^{n-1} < \infty.$$

因此逐项微分级数

$$\sum_{n=1}^{\infty} n \sqrt{n} \tan^{n-1} x (\tan^2 x + 1)$$

在 $[a, b]$ 一致收敛, 从而 $\sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{n} \tan^n x$ 在 $\left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right)$ 可微.

□

例题 9.47 判断 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{nx}{(1+x)(1+2x)\cdots(1+nx)}$ 在 $[0, \lambda]$, $\lambda > 0$ 的一致收敛性.

证明 注意到

$$\frac{nx}{(1+x)(1+2x)\cdots(1+nx)} = \left[\frac{1}{(1+x)(1+2x)\cdots(1+(n-1)x)} - \frac{1}{(1+x)(1+2x)\cdots(1+nx)} \right], n = 2, 3, \dots$$

于是我们有

$$\sum_{n=2}^m \frac{nx}{(1+x)(1+2x)\cdots(1+nx)} = \frac{1}{1+x} - \frac{1}{(1+x)(1+2x)\cdots(1+mx)}.$$

现在

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{nx}{(1+x)(1+2x)\cdots(1+nx)} &= \frac{x}{1+x} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{nx}{(1+x)(1+2x)\cdots(1+nx)} \\ &= \begin{cases} \frac{x}{1+x} + \frac{1}{1+x}, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

于是由级数和函数不连续知其在 $[0, \lambda], \lambda > 0$ 不一致收敛.

□

例题 9.48 判断 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[e^x - \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \right]$ 在 $[0, b]$ 和 $[0, +\infty)$ 的一致收敛性.

证明 首先注意到

$$\left[e^x - \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \right]' = e^x - \left(1 + \frac{x}{n}\right)^{n-1} \geq 0,$$

我们有

$$e^x - \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \leq e^b - \left(1 + \frac{b}{n}\right)^n.$$

由 Taylor 公式得

$$\begin{aligned} e^b - \left(1 + \frac{b}{n}\right)^n &= e^b \left[1 - e^{n \ln(1 + \frac{b}{n}) - b} \right] = e^b \left[1 - e^{n \left[\frac{b}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right) \right] - b} \right] \\ &= e^b \left[1 - e^{O\left(\frac{1}{n}\right)} \right] = O\left(\frac{1}{n}\right), n \rightarrow \infty, \end{aligned}$$

(实际上我们可以写出具体的等价量 $e^b - \left(1 + \frac{b}{n}\right)^n \sim \frac{e^b b^2}{2n}, n \rightarrow \infty$) 于是我们有

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[e^b - \left(1 + \frac{b}{n}\right)^n \right] < \infty.$$

故 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[e^x - \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \right]$ 在 $[0, b]$ 一致收敛. 注意到

$$\sup_{x \in [0, +\infty)} \left| \frac{1}{n} \left[e^x - \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \right] \right| = +\infty,$$

我们知道 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[e^x - \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \right]$ 在 $[0, +\infty)$ 不一致收敛.

□

例题 9.49 对 $\alpha > 0$, 判断 $\sum_{n=1}^{\infty} x^{\alpha} e^{-nx}$ 在 $[0, +\infty)$ 一致收敛性.

证明 注意到

$$(x^{\alpha} e^{-nx})' = (\alpha - nx)x^{\alpha-1} e^{-nx} = 0 \Rightarrow x = \frac{\alpha}{n}.$$

我们有

$$x^{\alpha} e^{-nx} \leq \left(\frac{\alpha}{n}\right)^{\alpha} e^{-\alpha}.$$

当 $\alpha > 1$, 我们由 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{\alpha}} < \infty$ 知原级数在 $[0, +\infty)$ 一致收敛.

当 $\alpha \in [0, 1)$, 注意到

$$\sum_{n=1}^{\infty} x^{\alpha} e^{-nx} = \begin{cases} \frac{x^{\alpha}}{e^x - 1}, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$$

如果原级数在 $[0, +\infty)$ 一致收敛, 那么上述和函数在 $x = 0$ 应该连续. 但是

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^{\alpha}}{e^x - 1} \neq 0,$$

故原级数在 $[0, +\infty)$ 不一致收敛.

□

例题 9.50 求 α 的范围, 使得 $\sum_{n=1}^{\infty} \left(x - \frac{1}{n}\right)^n (1-x)^\alpha$ 在 $x \in [0, 1]$ 一致收敛.

 **笔记** 我们只需保证

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sup_{x \in [0, 1]} \left(x - \frac{1}{n}\right)^n (1-x)^\alpha$$

收敛. 虽然一般情况这并不能说明

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sup_{x \in [0, 1]} \left(x - \frac{1}{n}\right)^n (1-x)^\alpha = +\infty$$

时一定有 $\sum_{n=1}^{\infty} \left(x - \frac{1}{n}\right)^n (1-x)^\alpha$ 在 $x \in [0, 1]$ 不一致收敛, 但是对具体例子, 我们通过对 x 赋值往往能实现这一点.

证明 当 $\alpha > 1$, 首先由

$$\left[\left(x - \frac{1}{n}\right)^n (1-x)^\alpha \right]' = \left(x - \frac{1}{n}\right)^{n-1} (1-x)^{\alpha-1} \left[n + \frac{\alpha}{n} - (n+\alpha)x\right] = 0 \Rightarrow x = \frac{n + \frac{\alpha}{n}}{n + \alpha} \text{ 为函数列通项最大值点.}$$

知

$$\begin{aligned} \sup_{x \in [0, 1]} \left(x - \frac{1}{n}\right)^n (1-x)^\alpha &= \left(\frac{n + \frac{\alpha}{n}}{n + \alpha} - \frac{1}{n}\right)^n \left(1 - \frac{n + \frac{\alpha}{n}}{n + \alpha}\right)^\alpha = \left(\frac{n^3 - n^2}{n^3 + \alpha n^2}\right)^n \left(\frac{\alpha n - \alpha}{n^2 + \alpha n}\right)^\alpha \\ &\sim \frac{\alpha^\alpha}{n^\alpha} \left(\frac{n^3 - n^2}{n^3 + \alpha n^2}\right)^n = \frac{\alpha^\alpha}{n^\alpha} \left(1 - \frac{(1+\alpha)n^2}{n^3 + \alpha n^2}\right)^n \\ &\sim \frac{\alpha^\alpha}{n^\alpha} e^{-\frac{(1+\alpha)n^3}{n^3 + \alpha n^2}} \sim \frac{e^{-(1+\alpha)} \alpha^\alpha}{n^\alpha}, n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

故由 Weierstrass 判别法可知 $\sum_{n=1}^{\infty} \left(x - \frac{1}{n}\right)^n (1-x)^\alpha$ 在 $x \in [0, 1]$ 一致收敛.

当 $\alpha \leq 0$, 原级数在 $x = 1$ 时通项极限不等于 0, 故此时级数在 $x = 1$ 时发散.

当 $0 < \alpha \leq 1$, 当 $N \rightarrow +\infty$, 取 $x = N + \frac{\alpha}{N}$, 我们有

$$\begin{aligned} \sum_{n=N}^{2N-1} \left(\frac{N + \frac{\alpha}{N}}{N + \alpha} - \frac{1}{n}\right)^n \left(1 - \frac{N + \frac{\alpha}{N}}{N + \alpha}\right)^\alpha &\geq \sum_{n=N}^{2N-1} \left(\frac{N + \frac{\alpha}{N}}{N + \alpha} - \frac{1}{N}\right)^n \left(1 - \frac{N + \frac{\alpha}{N}}{N + \alpha}\right)^\alpha = \sum_{n=N}^{2N-1} \left(\frac{N^2 - N}{(N + \alpha)N}\right)^n \left(1 - \frac{N + \frac{\alpha}{N}}{N + \alpha}\right)^\alpha \\ &\geq N \left(\frac{N^2 - N}{(N + \alpha)N}\right)^{2N-1} \left(1 - \frac{N + \frac{\alpha}{N}}{N + \alpha}\right)^\alpha \geq N \left(\frac{N^2 - N}{(N + \alpha)N}\right)^{2N-1} \left(\frac{\alpha - \frac{\alpha}{N}}{N + \alpha}\right)^\alpha \\ &\sim N e^{-\frac{(1+\alpha)(2N-1)}{N+\alpha}} \cdot \frac{\alpha^\alpha}{N^\alpha} \sim \frac{\alpha^\alpha e^{-2(1+\alpha)}}{N^{\alpha-1}} \rightarrow +\infty, \end{aligned}$$

即 $\sum_{n=1}^{\infty} \left(x - \frac{1}{n}\right)^n (1-x)^\alpha$ 在 $x \in [0, 1]$ 不一致收敛.

□

例题 9.51 设 $f_1 \in C[a, b]$, $x_0 \in [a, b]$. 考虑函数列

$$f_{n+1}(x) = \int_{x_0}^x f_n(t) dt, n = 1, 2, \dots$$

讨论 $\{f_n\}$ 在 $[a, b]$ 一致收敛性.

 **笔记** 注意到

$$\begin{aligned} |f_1(x)| \leq M \Rightarrow |f_2(x)| &\leq \int_{x_0}^x M dx = M|x - x_0| \\ \Rightarrow |f_3(x)| &\leq \int_{x_0}^x M|x - x_0| dx = \frac{M}{2}|x - x_0|^2 \Rightarrow \dots \end{aligned}$$

于是就有下述归纳.

注 要注意积分上下限大小问题. 如果积分上限小于下限, 则绝对值不等式要反一下上下限使得上限大于下限, 因此我们放缩时在积分号外面再加了一个绝对值(当然也可以分类讨论).

证明 设 $M \triangleq \sup_{x \in [a,b]} |f_1(x)|$, 我们归纳证明

$$|f_n(x)| \leq \frac{M}{(n-1)!} |x - x_0|^{n-1}. \quad (9.38)$$

现在(9.38)对 $n=1$ 已经成立. 假设 n 时成立, 我们对 $x_0 \in [a,b]$ 有

$$|f_{n+1}(x)| = \left| \int_{x_0}^x f_n(t) dt \right| \leq \left| \int_{x_0}^x |f_n(t)| dt \right| \leq \frac{M}{(n-1)!} \int_{x_0}^x |x - x_0|^{n-1} dx = \frac{M}{n!} |x - x_0|^n.$$

现在由数学归纳法知对一切 $n \in \mathbb{N}$ 都有(9.38)成立, 故

$$|f_n(x)| \leq \frac{M}{(n-1)!} |x - x_0|^{n-1} \leq \frac{M}{(n-1)!} \max \{ |b - x_0|^{n-1}, |x_0 - a|^{n-1} \},$$

即 $\{f_n\}$ 在 $[a,b]$ 一致收敛到 0. □

例题 9.52 设 $f, f_1 \in C[a,b]$ 满足

$$f_{n+1}(x) = f(x) + \int_a^x \sin f_n(t) dt, n = 1, 2, \dots.$$

证明: $\{f_n\}$ 在 $[a,b]$ 一致收敛.

证明 首先对 $x \in [a,b], n = 2, 3, \dots$, 由 Lagrange 中值定理得

$$\begin{aligned} |f_{n+1}(x) - f_n(x)| &\leq \int_a^x |\sin f_n(t) - \sin f_{n-1}(t)| dt \\ &= \int_a^x |\cos \theta| \cdot |f_n(t) - f_{n-1}(t)| dt \leq \int_a^x |f_n(t) - f_{n-1}(t)| dt. \end{aligned} \quad (9.39)$$

然后记

$$M \triangleq \sup_{x \in [a,b]} |f_2(x) - f_1(x)|.$$

若

$$|f_n(x) - f_{n-1}(x)| \leq \frac{M(x-a)^{n-1}}{(n-1)!},$$

则由(9.39)式可得

$$|f_{n+1}(x) - f_n(x)| \leq |f_n(x) - f_{n-1}(x)| = \int_a^x \frac{M(t-a)^{n-1}}{(n-1)!} dt = \frac{M(x-a)^n}{n!}.$$

由数学归纳法可得

$$|f_{n+1}(x) - f_n(x)| \leq \frac{M(x-a)^n}{n!}, n = 1, 2, \dots$$

现在

$$|f_n(x)| \leq |f_1(x)| + \sum_{n=1}^{\infty} |f_{n+1}(x) - f_n(x)| \leq M + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{M(b-a)^n}{n!} < \infty,$$

即 $\{f_n\}$ 在 $[a,b]$ 一致收敛. □

例题 9.53 设 $[0,1]$ 上的连续函数列 $\{f_n\}$ 满足 $f_n \geq 0$, 且

$$f_{n+1}(x) = \int_0^x \frac{dt}{1 + f_n(t)}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

证明: $\{f_n\}$ 在 $[0,1]$ 上一致收敛, 并求出极限函数

笔记 极限函数的求法: 设 $\{f_n\}$ 的极限函数为 f , 则对条件等式两边同时求导并令 $n \rightarrow \infty$ 得

$$f'(x) = \frac{1}{1 + f(x)} \Rightarrow f(x) = \sqrt{2x+1} - 1.$$

证明 记 $f(x) = \sqrt{2x+1} - 1$, 则

$$f(x) = \int_0^x \frac{dt}{1+f(t)}.$$

由 $f, f_1 \in C[0, 1]$ 知, 存在 $M > 0$, 使得

$$|f_1(x) - f(x)| \leq M, \quad \forall x \in [0, 1].$$

假设 $|f_n(x) - f(x)| \leq \frac{Mx^{n-1}}{n!}, \forall x \in [0, 1]$. 则

$$\begin{aligned} |f_{n+1}(x) - f(x)| &\leq \int_0^x \left| \frac{1}{1+f_n(t)} - \frac{1}{1+f(t)} \right| dt \\ &= \int_0^x \frac{|f_n(t) - f(t)|}{(1+f_n(t))(1+f(t))} dt \leq \int_0^x |f_n(t) - f(t)| dt \\ &\leq \int_0^x \frac{Mt^{n-1}}{n!} dt = \frac{Mx^n}{(n+1)}. \end{aligned}$$

故由数学归纳法知

$$|f_n(x) - f(x)| \leq \frac{Mx^{n-1}}{n!} \leq \frac{M}{n!}, \quad \forall x \in [0, 1].$$

因此

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in [0, 1]} |f_n(x) - f(x)| \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{M}{n!} = 0.$$

故 $\{f_n\}$ 在 $[0, 1]$ 上一致收敛到 $f(x) = \sqrt{2x+1} - 1$.

□

例题 9.54

- 设 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 是收敛的正项级数, 令 $f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n |\sin nx|$, 已知 $f(x)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 上满足 Lipschitz 条件, 即存在常数 $L > 0$, 使对任意实数 x, y , 都有 $|f(x) - f(y)| \leq L|x - y|$, 证明级数 $\sum_{n=1}^{\infty} na_n$ 收敛.
- 设 $b_n \geq 0$, 且 $\phi(x) = \sum_{n=1}^{+\infty} b_n \sin nx$ 在 \mathbb{R} 上一致收敛, 证明 $\phi(x) \in C^1(\mathbb{R})$ 的充要条件为 $\sum_{n=1}^{+\infty} nb_n$ 收敛.

注 第 2 问中不能与第 1 问一样直接得到

$$\frac{\phi(x)}{x} = \frac{1}{x} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nx \geq \frac{1}{x} \sum_{n=1}^m b_n \sin nx,$$

这个放缩是错误的. 因为 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nx$ 不是正项级数, 第 1 问中有绝对值, 从而是正项级数才能这样放缩.

证明

- 注意到 $\frac{\sin x}{x}$ 在 $(0, 1)$ 上单调递减, 故对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 有

$$\begin{aligned} \frac{f\left(\frac{1}{m}\right)}{\frac{1}{m}} &= \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{|\sin \frac{n}{m}|}{\frac{1}{m}} \geq \sum_{n=1}^m n a_n \frac{|\sin \frac{n}{m}|}{\frac{n}{m}} \\ &= \sum_{n=1}^m n a_n \frac{\sin \frac{n}{m}}{\frac{n}{m}} \geq \sum_{n=1}^m n a_n \frac{\sin 1}{1} \\ &= \sin 1 \sum_{n=1}^m n a_n. \end{aligned}$$

于是

$$\sum_{n=1}^m n a_n \leq \frac{1}{\sin 1} m f\left(\frac{1}{m}\right), \quad \forall m \in \mathbb{N}.$$

因为 f 在 \mathbb{R} 上满足 Lipschitz 条件且 $f(0) = 0$, 所以

$$\sum_{n=1}^m n a_n \leq \frac{1}{\sin 1} m \cdot L \cdot \frac{1}{m} = \frac{L}{\sin 1}, \quad \forall m \in \mathbb{N}.$$

令 $m \rightarrow +\infty$ 得

$$\sum_{n=1}^{+\infty} n a_n \leq \frac{L}{\sin 1} < +\infty.$$

2. 由条件和 **函数项级数连续性定理** 可知 $\phi(x) \in C(\mathbb{R})$.

充分性: 设 $\sum_{n=1}^{+\infty} n b_n$ 收敛, 则

$$\sum_{n=1}^{+\infty} n b_n \cos nx \leq \sum_{n=1}^{+\infty} n b_n < +\infty.$$

故由 **函数项级数逐项求导定理** 知

$$\phi'(x) = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{d}{dx} b_n \sin nx = \sum_{n=1}^{+\infty} n b_n \cos nx.$$

由 **函数项级数连续性定理** 知 $\phi'(x) \in C(\mathbb{R})$. 因此 $\phi(x) \in C^1(\mathbb{R})$.

必要性: 任取 $x > 0$, 由 **函数项级数逐项求积定理** 知

$$\frac{\int_0^x \phi(t) dt}{x^2} = \frac{1}{x^2} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{b_n(1 - \cos nx)}{n} \geq \frac{1}{x^2} \sum_{n=1}^m \frac{b_n(1 - \cos nx)}{n}, \quad \forall m \geq 1.$$

上式中令 $x \rightarrow 0^+$ 再结合 L'Hospital 法则得到

$$\frac{1}{2} \phi'(0) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^x \phi(t) dt}{x^2} \geq \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{x^2} \sum_{n=1}^m \frac{b_n(1 - \cos nx)}{n} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^m n b_n.$$

因此 $\sum_{n=1}^{+\infty} n b_n$ 收敛.

□

例题 9.55 求 p, q 的范围使得

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x}{n^p + n^q x^2}$$

在 \mathbb{R} 上一致收敛.

证明 当 $p + q > 2$ 时, 我们有

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x}{n^p + n^q x^2} \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x}{2\sqrt{n^p \cdot n^q x^2}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n^{\frac{p+q}{2}}} < +\infty.$$

当 $p + q \leq 2$ 时, 对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 取 $x = m^{\frac{p-q}{2}}$, 则

$$\begin{aligned} \sum_{n=m}^{2m} \frac{m^{\frac{p-q}{2}}}{n^p + n^q (m^{\frac{p-q}{2}})^2} &\geq \sum_{n=m}^{2m} \frac{m^{\frac{p-q}{2}}}{(2m)^p + (2m)^q m^{p-q}} = \sum_{n=m}^{2m} \frac{1}{2^p m^{\frac{p+q}{2}} + 2^q m^{\frac{p+q}{2}}} \\ &= \frac{1}{2^p + 2^q} \cdot \frac{1}{m^{\frac{p+q}{2}-1}} \geq \frac{1}{2^p + 2^q} > 0. \end{aligned}$$

故由不一致收敛的 Cauchy 收敛准则知, 此时 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x}{n^p + n^q x^2}$ 不一致收敛.

□

9.5 级数证明

例题 9.56 设 $f \in \mathbb{R}[x]$ 是只有正实根的多项式, 求 $\frac{f'(x)}{f(x)}$ 在 $x = 0$ 幂级数展开和收敛域.

证明 设 $f(x) = a(x - x_1)^{k_1}(x - x_2)^{k_2} \cdots (x - x_n)^{k_n}$, 其中 $a \neq 0$, 并且

$$0 < x_1 < x_2 < \cdots < x_n, k_i \in \mathbb{N}.$$

从而

$$\begin{aligned} \frac{f'(x)}{f(x)} &= [\ln f(x)]' = [\ln a + k_1 \ln(x - x_1) + k_2 \ln(x - x_2) + \cdots + k_n \ln(x - x_n)]' \\ &= \frac{k_1}{x - x_1} + \frac{k_2}{x - x_2} + \cdots + \frac{k_n}{x - x_n} = \sum_{j=1}^n \frac{k_j}{x - x_j} \\ &= -\frac{k_j}{x_j} \sum_{j=1}^n \frac{1}{1 - \frac{x}{x_j}} = -\sum_{j=1}^n \frac{k_j}{x_j} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{x}{x_j}\right)^m \\ &= -\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{j=1}^n \frac{k_j}{x_j^{m+1}} x^m. \end{aligned}$$

显然收敛半径就是 x_1 , 注意到

$$\lim_{m \rightarrow +\infty} \sum_{j=1}^n \frac{k_j}{x_j^{m+1}} x_1^m = \frac{k_1}{x_1} \neq 0,$$

故收敛域为 $(-x_1, x_1)$.

□

例题 9.57 设 $e^{a_n} = a_n + e^{b_n}$, $a_n > 0$, 若 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 证明: $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 收敛.

证明 显然 $e^{b_n} = e^{a_n} - a_n \geq 1$, 故 $b_n \geq 0$, 并且由 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛知 $a_n \rightarrow 0$. 于是

$$\begin{aligned} b_n &= \ln(e^{a_n} - a_n) = \ln e^{a_n} + \ln(1 - a_n e^{-a_n}) \\ &= a_n + O(a_n e^{-a_n}), n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

注意到 $O(a_n e^{-a_n}) \leq a_n$, 故 $\sum_{n=1}^{\infty} O(a_n e^{-a_n})$ 也收敛, 因此 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 收敛.

□

例题 9.58 设 $\{a_n\}$ 是递减正数列且 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = +\infty$, 证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_2 + a_4 + \cdots + a_{2n}}{a_1 + a_3 + \cdots + a_{2n-1}} = 1.$$

证明 由条件可知对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$a_2 + a_4 + \cdots + a_{2n} \leq a_1 + a_3 + \cdots + a_{2n-1},$$

故 $A \leq 1$. 注意到

$$\begin{aligned} \frac{a_2 + a_4 + \cdots + a_{2n}}{a_1 + a_3 + \cdots + a_{2n-1}} &\geq \frac{a_3 + a_5 + \cdots + a_{2n+1}}{a_1 + a_3 + \cdots + a_{2n-1}} = 1 - \frac{a_1 - a_{2n+1}}{a_1 + a_3 + \cdots + a_{2n-1}} \\ &\geq 1 - \frac{a_1}{\frac{a_2 + a_4 + \cdots + a_{2n}}{2} + \frac{a_1 + a_3 + \cdots + a_{2n-1}}{2}} = 1 - \frac{2a_1}{\sum_{i=1}^n a_i} \rightarrow 1, n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

故 $A \geq 1$. 因此 $A = 1$.

□

命题 9.9

设 a_n 递减到 0, 证明: $\sum_{n=1}^{\infty} n(a_n - a_{n+1})$ 收敛的充要条件是 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 并且 $\sum_{n=1}^{\infty} n(a_n - a_{n+1}) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

笔记 (9.40) 式可由 Abel 变换直接得到, 也可以采用下述证明一样的强行凑裂项的思路.

证明 注意到

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n k(a_k - a_{k+1}) &= \sum_{k=1}^n [ka_k - (k+1)a_{k+1}] + \sum_{k=1}^n [(k+1)a_{k+1} - ka_{k+1}] \\ &= a_1 - (n+1)a_{n+1} + \sum_{k=1}^n a_{k+1} = \sum_{k=1}^{n+1} a_k - (n+1)a_{n+1}. \end{aligned} \quad (9.40)$$

充分性: 若 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 则由命题 9.2 可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} na_n = 0$. 再由 (9.40) 式可得

$$\sum_{k=1}^{\infty} k(a_k - a_{k+1}) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k < +\infty.$$

必要性: 若 $\sum_{n=1}^{\infty} n(a_n - a_{n+1})$ 收敛, 则由 $\{a_n\}$ 的单调性知, 对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 当 $n \geq m$ 时, 有

$$\sum_{k=1}^n a_k = \sum_{k=1}^m a_k + \sum_{k=m+1}^n a_k \geq \sum_{k=1}^m a_k + (n-m)a_n.$$

又由 (9.40) 式和 $\sum_{n=1}^{\infty} n(a_n - a_{n+1})$ 收敛知, 存在 $A > 0$, 使得

$$\sum_{k=1}^{n-1} k(a_k - a_{k+1}) = \sum_{k=1}^n a_k - na_n \leq A, \forall n \in \mathbb{N}.$$

故

$$A \geq \sum_{k=1}^n a_k - na_n \geq \sum_{k=1}^m a_k + (n-m)a_n - na_n = \sum_{k=1}^m a_k - ma_n.$$

令 $n \rightarrow +\infty$ 得 $\sum_{k=1}^m a_k \leq A$. 再由 m 的任意性可知 $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ 收敛. 此时由命题 9.2 可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} na_n = 0$, 再由 (9.40) 式可知

$$\sum_{k=1}^{\infty} k(a_k - a_{k+1}) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k.$$

□

例题 9.59 设 a_n 递减到 0, 且 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散, 证明

$$\int_1^{\infty} \frac{\ln f(x)}{x^2} dx$$

发散, 这里 $f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n^n x^n$.

证明 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ 可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, 故 $f(x)$ 的收敛域为 \mathbb{R} . 显然 $f > 0, x > 0$, 且 f 在 $(0, +\infty)$ 上递增. 待定 $\{b_n\}$ 满足: $b_n \nearrow +\infty$. 从而

$$\begin{aligned} \int_{b_n}^{b_{n+1}} \frac{\ln f(x)}{x^2} dx &\geq \int_{b_n}^{b_{n+1}} \frac{\ln f(b_n)}{x^2} dx = \ln f(b_n) \left(\frac{1}{b_n} - \frac{1}{b_{n+1}} \right) \\ &\geq \ln (a_n^n b_n^n) \left(\frac{1}{b_n} - \frac{1}{b_{n+1}} \right) = n \ln (a_n b_n) \left(\frac{1}{b_n} - \frac{1}{b_{n+1}} \right). \end{aligned}$$

取 $b_n = \frac{C}{a_n}$, $C > \max \{1, a_1\}$, 则

$$\int_{b_n}^{b_{n+1}} \frac{\ln f(x)}{x^2} dx \geq n \ln(a_n b_n) \left(\frac{1}{b_n} - \frac{1}{b_{n+1}} \right) = \frac{\ln C}{C} n (a_n - a_{n+1}).$$

由命题 9.9 可知 $\sum_{n=1}^{\infty} n (a_n - a_{n+1})$ 发散. 故

$$\int_1^{+\infty} \frac{\ln f(x)}{x^2} dx \geq \sum_{n=1}^{\infty} \int_{b_n}^{b_{n+1}} \frac{\ln f(x)}{x^2} dx \geq \frac{\ln C}{C} \sum_{n=1}^{\infty} n (a_n - a_{n+1}) = +\infty.$$

□

例题 9.60 证明:

1.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1) \sqrt[n]{n}} \leq p, \forall p \in (1, +\infty).$$

2.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1) \sqrt[n]{n}} \geq p, \forall p \in (0, 1).$$



笔记 注意强行凑裂项和熟悉 Bernoulli 不等式.

证明

1.

$$\begin{aligned} \frac{1}{(n+1) \sqrt[n]{n}} &\leq p \left(\frac{1}{\sqrt[n]{n}} - \frac{1}{\sqrt[n]{n+1}} \right) \\ \iff \sqrt[n]{n} \left(\frac{1}{\sqrt[n]{n}} - \frac{1}{\sqrt[n]{n+1}} \right) &= 1 - \sqrt[n]{1 - \frac{1}{n+1}} \geq \frac{1}{p(n+1)} \\ \iff \sqrt[n]{1 - \frac{1}{n+1}} &\leq 1 - \frac{1}{p(n+1)}. \end{aligned} \tag{9.41}$$

下证 $\sqrt[n]{1 - \frac{1}{n+1}} \leq 1 - \frac{1}{p(n+1)}$. 令 $f(x) \triangleq \sqrt[n]{1-x} - \frac{x}{p}$, 则

$$f'(x) = -\frac{1}{p} (1-x)^{\frac{1}{p}-1} + \frac{1}{p} = \frac{1}{p} \left[1 - (1-x)^{\frac{1}{p}-1} \right] < 0.$$

故

$$f(x) \leq f(0) = 1 \iff \sqrt[n]{1-x} \leq 1 - \frac{x}{p}.$$

令 $x = \frac{1}{n+1}$ 得 $\sqrt[n]{1 - \frac{1}{n+1}} \leq 1 - \frac{1}{p(n+1)}$, 从而(9.41)式成立. 故

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1) \sqrt[n]{n}} \leq \sum_{n=1}^{\infty} p \left(\frac{1}{\sqrt[n]{n}} - \frac{1}{\sqrt[n]{n+1}} \right) = p.$$

2.

$$\begin{aligned} \frac{1}{(n+1) \sqrt[n]{n}} &\geq p \left(\frac{1}{\sqrt[n]{n}} - \frac{1}{\sqrt[n]{n+1}} \right) \\ \iff \sqrt[n]{n} \left(\frac{1}{\sqrt[n]{n}} - \frac{1}{\sqrt[n]{n+1}} \right) &= 1 - \sqrt[n]{1 - \frac{1}{n+1}} \leq \frac{1}{p(n+1)} \\ \iff \sqrt[n]{1 - \frac{1}{n+1}} &\geq 1 - \frac{1}{p(n+1)}. \end{aligned} \tag{9.42}$$

下证 $\sqrt[p]{1 - \frac{1}{n+1}} \geq 1 - \frac{1}{p(n+1)}$. 令 $f(x) \triangleq \sqrt[p]{1-x} - \frac{x}{p}$, 则

$$f'(x) = -\frac{1}{p}(1-x)^{\frac{1}{p}-1} + \frac{1}{p} = \frac{1}{p} \left[1 - (1-x)^{\frac{1}{p}-1} \right] > 0.$$

故

$$f(x) \geq f(0) = 1 \iff \sqrt[p]{1-x} \geq 1 - \frac{x}{p}.$$

令 $x = \frac{1}{n+1}$ 得 $\sqrt[p]{1 - \frac{1}{n+1}} \geq 1 - \frac{1}{p(n+1)}$, 从而(9.42)式成立. 故

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1) \sqrt[p]{n}} \geq \sum_{n=1}^{\infty} p \left(\frac{1}{\sqrt[p]{n}} - \frac{1}{\sqrt[p]{n+1}} \right) = p.$$

□

例题 9.61 对 $t \in \mathbb{R}$, 证明:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^{n-1}}{n^n} = \int_0^1 \frac{1}{x^{tx}} dx.$$

证明

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{1}{x^{tx}} dx &= \int_0^1 e^{-tx \ln x} dx = \int_0^1 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-tx \ln x)^n}{n!} dx \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^1 \frac{(-tx \ln x)^n}{n!} dx = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-t)^n}{n!} \int_0^1 x^n \ln^n x dx \\ &\stackrel{x=e^{-y}}{=} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!} \int_0^{+\infty} e^{-(n+1)y} y^n dy = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n! (n+1)^{n+1}} \int_0^{+\infty} e^{-y} y^n dy \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n \Gamma(n+1)}{n! (n+1)^{n+1}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{(n+1)^{n+1}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^n}{n^n}. \end{aligned}$$

□

命题 9.10

- 设正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, $a_n > 0$, 则存在 A_n 使得 $a_n = o(A_n)$ 和 $\sum_{n=1}^{\infty} A_n$ 收敛.
- 设正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 发散, $a_n > 0$, 则存在 A_n 使得 $A_n = o(a_n)$ 和 $\sum_{n=1}^{\infty} A_n$ 发散.

◆



笔记 这个命题说明: 没有收敛最慢的级数, 也没有发散最慢的级数.

证明

1. 令

$$A_n \triangleq \sqrt{\sum_{k=n}^{\infty} a_k} - \sqrt{\sum_{k=n+1}^{\infty} a_k},$$

则

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} a_k} < +\infty.$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{A_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{\sqrt{\sum_{k=n}^{\infty} a_k} - \sqrt{\sum_{k=n+1}^{\infty} a_k}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n \left(\sqrt{\sum_{k=n}^{\infty} a_k} + \sqrt{\sum_{k=n+1}^{\infty} a_k} \right)}{a_n} = 0.$$

故 $a_n = o(A_n), n \rightarrow \infty$.

2. 令

$$A_1 = 1, \quad A_n \triangleq \sqrt{\sum_{k=1}^n a_k} - \sqrt{\sum_{k=1}^{n-1} a_k}, \quad n = 2, 3, \dots$$

则

$$\sum_{n=2}^{\infty} A_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sqrt{\sum_{k=1}^n a_k} - \sqrt{a_1} \right) = +\infty.$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{A_n}{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n a_k} - \sqrt{\sum_{k=1}^{n-1} a_k}}{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{a_n \left(\sqrt{\sum_{k=1}^n a_k} + \sqrt{\sum_{k=1}^{n-1} a_k} \right)} = 0.$$

故 $A_n = o(a_n), n \rightarrow \infty$.

□

例题 9.62 设正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{p_n} < \infty$, 证明

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 p_n}{(p_1 + p_2 + \dots + p_n)^2} < \infty.$$

注 本题的想法就是把 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 p_n}{(p_1 + p_2 + \dots + p_n)^2}$ 放大为阶更小的量, 从而其收敛.

证明 记 $S_0 = 0, S_n = \sum_{k=1}^n p_k$, 则对 $N \geq 2$, 有

$$\begin{aligned} \sum_{n=2}^N \frac{n^2 p_n}{(p_1 + p_2 + \dots + p_n)^2} &= \sum_{n=2}^N \frac{n^2 p_n}{S_n^2} = \sum_{n=2}^N \frac{n^2 (S_n - S_{n-1})}{S_n^2} \\ &= \sum_{n=2}^N n^2 \int_{S_{n-1}}^{S_n} \frac{1}{S_n^2} dx \leqslant \sum_{n=2}^N n^2 \int_{S_{n-1}}^{S_n} \frac{1}{x^2} dx = \sum_{n=2}^N n^2 \left(\frac{1}{S_{n-1}} - \frac{1}{S_n} \right) \\ &= \sum_{n=2}^N \left[\frac{n^2}{S_{n-1}} - \frac{(n+1)^2}{S_n} \right] + \sum_{n=2}^N \frac{(n+1)^2 - n^2}{S_n} \\ &= \frac{4}{S_1} - \frac{(N+1)^2}{S_N} + \sum_{n=2}^N \frac{2n+1}{S_n} \\ &\leqslant \frac{4}{S_1} + 3 \sum_{n=2}^N \frac{n}{S_n} = \frac{4}{S_1} + 3 \sum_{n=2}^N \left(\frac{n \sqrt{p_n}}{S_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{p_n}} \right) \\ &\stackrel{\text{Cauchy 不等式}}{\leqslant} \frac{4}{S_1} + 3 \sqrt{\sum_{n=2}^N \frac{n^2 p_n}{S_n^2} \cdot \sum_{n=2}^N \frac{1}{p_n}} \\ &\leqslant \frac{4}{S_1} + C \sqrt{\sum_{n=2}^N \frac{n^2 p_n}{S_n^2}}. \end{aligned}$$

从而

$$\sqrt{\sum_{n=2}^N \frac{n^2 p_n}{S_n^2}} \leqslant \frac{4}{S_1} \frac{1}{\sqrt{\sum_{n=2}^N \frac{n^2 p_n}{S_n^2}}} + C.$$

若 $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{n^2 p_n}{S_n^2}$ 发散, 则对上式令 $N \rightarrow +\infty$ 得 $+\infty \leq C$ 矛盾! 故 $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{n^2 p_n}{S_n^2} < +\infty$.

□

例题 9.63

1. 设 $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}, \{b_n\}_{n=1}^{\infty} \subset (0, +\infty)$ 且

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n}{n} = 0, \lim_{n \rightarrow \infty} b_n \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) > 0.$$

证明级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛.

2. 设 $\alpha \in (0, 1), \{a_n\}_{n=1}^{\infty} \subset (0, +\infty)$ 且满足

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n^{\alpha} \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) = \lambda \in (0, +\infty).$$

证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} n^k a_n = 0$.

注 由 $\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{o\left(\frac{1}{k^2}\right)}{\frac{1}{k^2}} = 0, \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2}$ 收敛可知 $\sum_{k=1}^{\infty} o\left(\frac{1}{k^2}\right)$ 收敛, 故 $\sum_{k=1}^n o\left(\frac{1}{k^2}\right) = O(1), \forall n \in \mathbb{N}$.

证明

1. 由条件可知, 存在 $c > 0, N \in \mathbb{N}$, 使得对 $\forall n \geq N$ 有

$$b_n \leq \frac{c}{2}n, \quad b_n \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) > c > 0.$$

不妨设 $N = 1$, 则

$$\frac{a_n}{a_{n+1}} > 1 + \frac{c}{b_n} \implies a_1 > a_{n+1} \prod_{k=1}^n \left(1 + \frac{c}{b_k} \right).$$

于是

$$\begin{aligned} a_{n+1} &< a_1 \prod_{k=1}^n \frac{1}{1 + \frac{c}{b_k}} = a_1 e^{-\sum_{k=1}^n \ln\left(1 + \frac{c}{b_k}\right)} \\ &\leq a_1 e^{-\sum_{k=1}^n \ln\left(1 + \frac{2}{k}\right)} = a_1 e^{-\sum_{k=1}^n \left[\frac{2}{k} + o\left(\frac{1}{k^2}\right) \right]} \\ &= a_1 e^{-2 \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} + O(1)} = a_1 e^{-2[\ln n + O(1)] + O(1)} \\ &= a_1 e^{-2 \ln n + O(1)} \sim \frac{C}{n^2}, n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

故 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛.

2. 由条件可知, 当 n 充分大时, 有

$$n^{\alpha} \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) > 0 \implies \frac{a_n}{a_{n+1}} > 1.$$

从而不妨设 $\{a_n\}$ 递减. 再根据条件可知, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得

$$n^{\alpha} \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) > \frac{\lambda}{2}, \forall n \geq N.$$

故

$$\frac{a_n}{a_{n+1}} > 1 + \frac{\lambda}{2n^{\alpha}}, \forall n \geq N.$$

于是对 $\forall n \geq N$, 有

$$\begin{aligned} a_{n+1} &< a_N \prod_{k=N}^n \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{2k^{\alpha}}} = a_N e^{-\sum_{k=N}^n \ln\left(1 + \frac{\lambda}{2k^{\alpha}}\right)} \\ &= a_N e^{-\sum_{k=N}^n \left[\frac{\lambda}{2k^{\alpha}} + O\left(\frac{1}{k^2}\right) \right]} \xrightarrow{\text{命题 2.15}} a_N e^{-\left[\frac{\lambda n^{1-\alpha}}{2(1-\alpha)} + O(n^{1-\alpha}) + O(n^{1-2\alpha}) \right]} \end{aligned}$$

$$= a_N e^{-\left[\frac{\lambda n^{1-\alpha}}{2(1-\alpha)} + O(n^{1-\alpha})\right]} \leqslant a_N e^{-Cn^{1-\alpha}}, n \rightarrow \infty.$$

注意到 $\sum_{n=1}^{\infty} e^{-Cn^{1-\alpha}} < +\infty$, 故 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛.

□

命题 9.11

证明:

1. 实级数 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛等价于存在分解 $u_n = a_n b_n, n \in \mathbb{N}$ 使得 $\{a_n\}$ 单调趋于 0 且 $\sum b_n$ 部分和有界.
2. 实级数 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛等价于存在分解 $u_n = a_n b_n, n \in \mathbb{N}$ 使得 $\{a_n\}$ 单调有界且 $\sum b_n$ 部分和收敛.

◆

笔记 这个命题说明:A-D 判别法是级数收敛的“充要条件”. 积分版本见命题 6.2.

证明 充分性就是由级数收敛的 A-D 判别法. 下证必要性.

1. 设 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛, 由 Cauchy 收敛准则, 对 $\forall i \in \mathbb{N}$, 存在 $n_i \in \mathbb{N}$, 使得

$$\left| \sum_{n=k}^{k+p} u_n \right| \leqslant \frac{1}{i^3}, \forall k \geqslant n_i, p \in \mathbb{N}.$$

定义

$$a_0 = 1, \quad a_n \triangleq \begin{cases} 1, & 1 \leqslant n \leqslant n_1 \\ \frac{1}{i}, & n_i < n \leqslant n_{i+1} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, \quad b_n = \frac{u_n}{a_n}.$$

显然 $a_n \searrow 0$. 当 $1 \leqslant n \leqslant n_1$ 时, 我们有

$$\left| \sum_{k=1}^n b_k \right| = \left| \sum_{k=1}^n u_k \right| \leqslant \sum_{k=1}^{n_1} |u_k|.$$

当 $n > n_1$ 时, 存在 $k \in \mathbb{N}$, 使得 $n_k < n \leqslant n_{k+1}$, 于是

$$\begin{aligned} \left| \sum_{j=1}^n b_j \right| &= \left| \sum_{j=1}^{n_1} u_j + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=n_i+1}^{n_{i+1}} i u_j + k \sum_{j=n_k+1}^n u_j \right| \leqslant \sum_{j=1}^{n_1} |u_j| + \sum_{i=1}^{k-1} i \left| \sum_{j=n_i+1}^{n_{i+1}} u_j \right| + k \left| \sum_{j=n_k+1}^n u_j \right| \\ &\leqslant \sum_{j=1}^{n_1} |u_j| + \sum_{i=1}^{k-1} \frac{i}{i^3} + \frac{k}{k^3} \leqslant \sum_{j=1}^{n_1} |u_j| + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} = \sum_{j=1}^{n_1} |u_j| + \frac{\pi^2}{6}. \end{aligned}$$

2. 设 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛, 由第 1 问可知, 存在 $\{\alpha_n\}, \{\beta_n\}$ 使得 $u_n = \alpha_n \beta_n$, 并且 $\{\alpha_n\}$ 单调递减趋于 0, $\sum \beta_n$ 部分和有界. 令

$$a_n \triangleq \sqrt{\alpha_n}, \quad b_n \triangleq \beta_n \sqrt{\alpha_n} = \beta_n a_n, \quad n = 1, 2, \dots$$

显然 $a_n \searrow 0$, 进而 $\{a_n\}$ 单调有界. 又 $\sum \beta_n$ 部分和有界, 故由 Dirichlet 判别法知, $\sum b_n$ 部分和收敛.

□

例题 9.64 设实级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = s$ 条件收敛, $\sum_{n=1}^{\infty} a_{f(n)} = t \neq s$ 是一个重排. 证明: 对任何 $N \in \mathbb{N}$, 存在 $n \in \mathbb{N}$ 使得 $|n - f(n)| > N$.

证明 若 $\exists N \in \mathbb{N}$, 使得 $\forall n \in \mathbb{N}$, 有 $|n - f(n)| \leqslant N$, 那么对 $\forall m > N$, 就有

$$\sum_{k=1}^{m+N} a_{f(k)} - \sum_{k=1}^m a_k \text{ 中一定不包含 } a_1, a_2, \dots, a_m, a_{f(1)}, a_{f(2)}, \dots, a_{f(m-N)}.$$

并且 $\sum_{k=1}^{m+N} a_{f(k)} - \sum_{k=1}^m a_k$ 至多含有 $m + N + m - (2m - N) = 2N$ 项.

故对 $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $N_1 \in \mathbb{N}$, 使得当 $n > N_1$ 时, 有 $|a_n| \leq \varepsilon$. 于是对 $\forall m > N_1$, 就有

$$\left| \sum_{k=1}^{m+N} a_{f(k)} - \sum_{k=1}^m a_k \right| \leq 2N\varepsilon.$$

令 $m \rightarrow +\infty$ 得 $|s - t| \leq 2N\varepsilon$. 由 ε 的任意性知 $s = t$, 矛盾!

□

例题 9.65

1. 设 f 满足: 对任何绝对收敛级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, 都有 $\sum_{n=1}^{\infty} f(a_n)$ 绝对收敛, 证明 $f(x) = O(x), x \rightarrow 0$.

2. 设 f 满足: 对任何收敛级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, 都有 $\sum_{n=1}^{\infty} f(a_n)$ 收敛, 证明存在 $k \in \mathbb{R}$ 使得在 0 的某个邻域内有 $f(x) = kx$.

证明

1. 反证, 若 $\frac{f(x)}{x}$ 在 $x = 0$ 邻域内无界, 则 $\exists x_n \rightarrow 0$, 使得

$$\left| \frac{f(x_n)}{x_n} \right| > n, \quad n = 1, 2, \dots. \quad (9.43)$$

取 $\{x_n\}$ 的子列 $\{x_{n_k}\}$, 使得

$$|x_{n_k}| < \frac{1}{k^2}, \quad k = 1, 2, \dots.$$

从而对 $\forall k \in \mathbb{N}$, 都有

$$\frac{2}{k^2 |x_{n_k}|} - \frac{1}{k^2 |x_{n_k}|} = \frac{1}{k^2 |x_{n_k}|} > 1,$$

于是存在正整数 m_k , 使得

$$\frac{1}{k^2 |x_{n_k}|} < m_k < \frac{2}{k^2 |x_{n_k}|}. \quad (9.44)$$

令

$$a_n \triangleq x_{n_k}, \quad m_{k-1} < n \leq m_k.$$

则由(9.44)式可得

$$\sum_{k=1}^{\infty} |a_k| = \sum_{k=1}^{\infty} m_k |x_{n_k}| < \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{k^2} < +\infty.$$

由条件可知

$$\sum_{k=1}^{\infty} |f(a_n)| = \sum_{k=1}^{\infty} m_k |f(x_{n_k})| < +\infty. \quad (9.45)$$

又由(9.43)(9.44)式可得

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} |f(a_n)| &= \sum_{k=1}^{\infty} m_k |f(x_{n_k})| \geq \sum_{k=1}^{\infty} m_k n_k |x_{n_k}| \\ &\geq \sum_{k=1}^{\infty} k m_k |x_{n_k}| \geq \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} = +\infty. \end{aligned}$$

这与(9.45)式矛盾!

2. 目标证明 f 在 $x = 0$ 邻域满足 Cauchy 方程. 考虑 $g(x, y) = f(x+y) + f(-x) + f(-y)$. 如果对任何 0 的开邻域 U 都有 g 在 $U \times U$ 上不恒为 0, 那么存在 $(x_n, y_n) \rightarrow (0, 0)$ 使得 $g(x_n, y_n) \neq 0$.

考虑

$$\begin{aligned} &\underbrace{(x_1 + y_1) - x_1 - y_1, (x_1 + y_1) - x_1 - y_1, \dots, (x_1 + y_1) - x_1 - y_1 +}_{m_1} \\ &\underbrace{(x_2 + y_2) - x_2 - y_2, (x_2 + y_2) - x_2 - y_2, \dots, (x_2 + y_2) - x_2 - y_2 +}_{m_2} \end{aligned}$$

⋮

上述级数的部分和只可能出现 $x_n + y_n, y_n, 0$, 而当 $n \rightarrow +\infty$ 时它们都趋于 0, 因此上述级数收敛. 由题目条件, 我们有

$$\underbrace{(f(x_1) + f(y_1)) + f(-x_1) + f(-y_1), \dots, (f(x_1) + f(y_1)) + f(-x_1) + f(-y_1) +}_{m_1}$$

$$\underbrace{(f(x_2) + f(y_2)) + f(-x_2) + f(-y_2), \dots, (f(x_2) + f(y_2)) + f(-x_2) + f(-y_2) +}_{m_2}$$

$$\vdots$$

收敛. 由收敛级数加括号也收敛, 我们知道对任何一组 $\{m_n\}_{n=1}^{\infty} \subset \mathbb{N}$ 都有 $\sum_{n=1}^{\infty} m_n g(x_n, y_n)$ 收敛. 这显然不可能! 因此我们证明了 $f(x+y) + f(-x) + f(-y)$ 在某个 $U \times U$ 上恒为 0, 这里 U 是一个开区间. 现在由

$$f(0) + f(0) + f(0) = 0 \Rightarrow f(0) = 0$$

知

$$f(x-x) + f(x) + f(-x) = 0 \Rightarrow f \text{ 是奇函数,}$$

即 $f(x+y) = f(x) + f(y)$.

再证明 f 在 $x=0$ 连续. 设 $x_n \rightarrow 0$, 我们考虑收敛级数 $x_1 - x_1 + x_2 - x_2 + \dots$, 故级数

$$f(x_1) - f(x_1) + f(x_2) - f(x_2) + \dots$$

收敛. 考虑上述级数部分和可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = 0$, 从而 f 在 $x=0$ 连续. 现在由定理 5.9 知存在 $k \in \mathbb{R}$ 使得在 0 的某个邻域内有 $f(x) = kx$. □

例题 9.66 给定 $\{a_n\}_{n=0}^{\infty} \subset \mathbb{R}$, 设

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, \quad x \in (-1, 1).$$

若

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_k = +\infty(-\infty),$$

证明

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} f(x) = +\infty(-\infty),$$

并指出

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \sum_{k=0}^n a_k \right| = +\infty \not\Rightarrow \lim_{x \rightarrow 1^-} |f(x)| = +\infty.$$

 **笔记** 熟记命题 9.7.

证明 记 $S_n = \sum_{k=0}^n a_k$, 不妨设

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = +\infty.$$

于是对任意 $C > 0$, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得对任意 $n > N$, 成立 $S_n \geq C$. 注意到

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 1^-} f(x) &= \lim_{x \rightarrow 1^-} (1-x) \frac{f(x)}{1-x} \xrightarrow{\text{命题9.7}} \lim_{x \rightarrow 1^-} (1-x) \left[\sum_{n=0}^{\infty} S_n x^n \right] \\ &= \lim_{x \rightarrow 1^-} (1-x) \left[\sum_{n=0}^N S_n x^n + \sum_{n=N+1}^{\infty} S_n x^n \right] \\ &\geq \lim_{x \rightarrow 1^-} (1-x) \left[\sum_{n=0}^N S_n x^n + C \sum_{n=N+1}^{\infty} x^n \right] \\ &= C \lim_{x \rightarrow 1^-} (1-x) \frac{x^{N+1}}{1-x} = C, \end{aligned}$$

由 C 任意性, 我们证明了

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} f(x) = +\infty.$$

对于反例, 考虑下面的函数即可

$$f(x) = \frac{x-1}{(1+x)^2} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} (2n+1)x^n.$$

□

命题 9.12

1. 设 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 是两两不同的实数, C_1, C_2, \dots, C_n 为复数. 证明:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \sum_{j=1}^n C_j e^{\lambda_j x} = 0 \Leftrightarrow C_j = 0, j = 1, 2, \dots, n.$$

2. 设 $m \geq 2, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m \in \mathbb{R}, C_1, C_2, \dots, C_m \in \mathbb{C}$. 若

$$\lambda_j - \lambda_k \neq 2\ell\pi, \forall 1 \leq j < k \leq m, \ell \in \mathbb{Z},$$

证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^m C_j e^{n\lambda_j} = 0 \Leftrightarrow C_j = 0, j = 1, 2, \dots, m.$$

◆

 **笔记** 想法即类比傅立叶系数, 做积分使得系数暴露出来. 离散版本可以类似连续版本证明, 连续的处理方式核心是乘上某个 $e^{-i\lambda x}$ 均值形式的积分取极限, 从而离散的时候应该是乘上某个 $e^{-i\lambda y}$ 均值的取和.

证明

- 充分性显然, 只需证明必要性. 考虑 $f(x) \triangleq \sum_{j=1}^n C_j e^{i\lambda_j x}$, 其中 i 是虚数单位. 对 $T > 0, k = 1, 2, \dots, n$, 我们有
$$\begin{aligned} \int_T^{2T} e^{-i\lambda_k x} f(x) dx &= \int_T^{2T} e^{-i\lambda_k x} \left(\sum_{j=1}^n C_j e^{i\lambda_j x} \right) dx \\ &= \sum_{j=1}^n C_j \int_T^{2T} e^{i(\lambda_j - \lambda_k)x} dx = T C_k + \sum_{j \neq k} C_j \frac{e^{i(\lambda_j - \lambda_k)2T} - e^{i(\lambda_j - \lambda_k)T}}{\lambda_j - \lambda_k}, \end{aligned}$$
从而

$$\begin{aligned} |C_k| &= \left| \frac{\int_T^{2T} e^{-i\lambda_k x} f(x) dx - \sum_{j \neq k} C_j \frac{e^{i(\lambda_j - \lambda_k)2T} - e^{i(\lambda_j - \lambda_k)T}}{\lambda_j - \lambda_k}}{T} \right| \\ &\leq \frac{\int_T^{2T} |f(x)| dx + \sum_{j \neq k} |C_j| \frac{2}{|\lambda_j - \lambda_k|}}{T} = \frac{|f(\theta_T)|T + \sum_{j \neq k} |C_j| \frac{2}{|\lambda_j - \lambda_k|}}{T}, \end{aligned}$$

这里最后一个等号来自积分中值定理且 $\theta_T \in (T, 2T)$. 现在由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$ 可知

$$\lim_{T \rightarrow +\infty} C_k = 0, k = 1, 2, \dots, n,$$

这就证明了 $C_j = 0, j = 1, 2, \dots, n$, 必要性得证.

2. 充分性显然, 只需证明必要性. 对 $k = 1, 2, \dots, m$, 我们有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(C_k + \sum_{j \neq k} C_j e^{in(\lambda_j - \lambda_k)} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(e^{-in\lambda_k} \sum_{j=1}^m C_j e^{in\lambda_j} \right) = 0.$$

现在由 Stolz 定理我们有

$$\begin{aligned} C_k &= -\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j \neq k} C_j e^{in(\lambda_j - \lambda_k)} = -\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{\ell=0}^n \sum_{j \neq k} C_j e^{i\ell(\lambda_j - \lambda_k)}}{n+1} \\ &= -\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{j \neq k} \sum_{\ell=0}^n C_j e^{i\ell(\lambda_j - \lambda_k)}}{n+1} = -\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{j \neq k} C_j \frac{1-e^{i(n+1)(\lambda_j - \lambda_k)}}{1-e^{i(\lambda_j - \lambda_k)}}}{n+1}. \end{aligned}$$

结合

$$0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left| \sum_{j \neq k} C_j \frac{1-e^{i(n+1)(\lambda_j - \lambda_k)}}{1-e^{i(\lambda_j - \lambda_k)}} \right|}{n+1} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{j \neq k} |C_j| \frac{2}{|1-e^{i(\lambda_j - \lambda_k)}|}}{n+1} = 0,$$

我们知道 $C_j = 0, j = 1, 2, \dots, n$, 这就证明了必要性!

□

例题 9.67 设 $\{\alpha_i\}_{i=1}^m \subset \mathbb{R}$ 满足

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{i=1}^m \sin(n\alpha_i) = 0.$$

证明: 必有一个 $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ 使得 $\frac{\alpha_i}{\pi} \in \mathbb{Z}$.

笔记 本题是命题 9.12 的一个应用.

证明 由 Euler 公式得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{j=1}^m \frac{e^{in\alpha_j} - e^{-in\alpha_j}}{2i} = 0 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{j=1}^m (e^{in\alpha_j} - e^{-in\alpha_j}) = 0.$$

打开括号得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{\varepsilon_i \in \{-1, 1\}} (-1)^{|\{i \in \{1, 2, \dots, m\} : \varepsilon_i = -1\}|} e^{in(\varepsilon_1 \alpha_1 + \varepsilon_2 \alpha_2 + \dots + \varepsilon_m \alpha_m)} = 0. \quad (9.46)$$

注意到若有

$$\varepsilon_1 \alpha_1 + \varepsilon_2 \alpha_2 + \dots + \varepsilon_m \alpha_m = \varepsilon_1' \alpha_1 + \varepsilon_2' \alpha_2 + \dots + \varepsilon_m' \alpha_m + 2\ell\pi, \ell \in \mathbb{Z}, \quad (9.47)$$

则

$$e^{in(\varepsilon_1 \alpha_1 + \varepsilon_2 \alpha_2 + \dots + \varepsilon_m \alpha_m)} = e^{in(\varepsilon_1' \alpha_1 + \varepsilon_2' \alpha_2 + \dots + \varepsilon_m' \alpha_m)}.$$

因此将(9.46)式中满足(9.47)式的项合并, 得到新的和式的任意两项中的 $\varepsilon_1 \alpha_1 + \varepsilon_2 \alpha_2 + \dots + \varepsilon_m \alpha_m$ 的差值都不等于 $2\ell\pi, \ell \in \mathbb{Z}$. 于是由命题 9.12 知

$$\sum_{\varepsilon_i \in \{-1, 1\}} (-1)^{|\{i \in \{1, 2, \dots, m\} : \varepsilon_i = -1\}|} e^{in(\varepsilon_1 \alpha_1 + \varepsilon_2 \alpha_2 + \dots + \varepsilon_m \alpha_m)}$$

恒为 0. 否则, 上式每项系数 $(-1)^{|\{i \in \{1, 2, \dots, m\} : \varepsilon_i = -1\}|} = 0$ 矛盾! 故现在就有 $\prod_{j=1}^m (e^{in\alpha_j} - e^{-in\alpha_j}) = 0, \forall n \in \mathbb{N}$, 取 $n = 1$,

则必存在一个 $j \in \{1, 2, \dots, m\}$, 使得

$$e^{i\alpha_j} - e^{-i\alpha_j} = 0 \Rightarrow e^{2i\alpha_j} = 0 \Rightarrow 2\alpha_j = 2k\pi, k \in \mathbb{Z} \Rightarrow \frac{\alpha_j}{\pi} = k \in \mathbb{Z}.$$

□

例题 9.68 设对 $n \in \mathbb{N}$ 都有

$$u_n = \lim_{m \rightarrow \infty} (u_{n+1}^2 + u_{n+2}^2 + \cdots + u_{n+m}^2).$$

证明: 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} (u_1 + u_2 + \cdots + u_n)$ 存在, 则 $u_n = 0, \forall n \in \mathbb{N}$.

注 题目条件中写了极限等于 u_n 就是默认这个极限存在.

证明 注意到

$$u_n - u_{n+1} = u_{n+1}^2 \implies u_{n+1} = \frac{\sqrt{1+4u_n} - 1}{2}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (9.48)$$

由 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n u_k$ 存在知, $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = 0$. 若 $u_n \neq 0 (n \in \mathbb{N})$, 由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} n u_n &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{u_{n+1}} - \frac{1}{u_n} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2}{\sqrt{1+4u_n} - 1} - \frac{1}{u_n} \right) \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \left(\frac{2}{\sqrt{1+4x} - 1} - \frac{1}{x} \right) = 1. \end{aligned}$$

故 $u_n \sim \frac{1}{n}$, 从而 $\sum u_n$ 发散, 矛盾! 故存在 $n_0 \in \mathbb{N}$, 使得 $u_{n_0} = 0$. 于是由(9.48)式, 利用数学归纳法可知

$$\begin{aligned} u_{n+1} &= \frac{\sqrt{1+4u_n} - 1}{2} = \dots = 0, \quad \forall n > n_0. \\ u_n &= u_{n+1}^2 + u_{n+2}^2 + \cdots = u_{n_0}^2 + u_{n_0} = 0, \quad \forall n < n_0. \end{aligned}$$

故此时 $u_n = 0, \forall n \in \mathbb{N}$.

□

例题 9.69 设 $a_0 = 1, a_1 = \frac{1}{2}, a_{n+1} = \frac{na_n^2}{1 + (n+1)a_n}, n \in \mathbb{N}$. 证明: $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_{k+1}}{a_k}$ 收敛并求值.

注 $\mathbb{N} \triangleq \{1, 2, \dots\}$.

注 级数可求值的情况只有两种:

1. 级数通项可求.

2. 级数通项可以写成裂项形式.

证明 归纳易得 $a_n \geq 0, n \in \mathbb{N}$. 注意到

$$a_{n+1} + (n+1)a_n a_{n+1} = na_n^2 \implies \frac{a_{n+1}}{a_n} = na_n - (n+1)a_{n+1} \geq 0, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

故 $\{na_n\}$ 递减且有下界 0. 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} na_n = a$, 则

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_{k+1}}{a_k} = \frac{a_1}{a_0} + \sum_{k=1}^{\infty} [ka_k - (k+1)a_{k+1}] = \frac{1}{2} + a_1 - \lim_{n \rightarrow \infty} na_n = 1 - a < +\infty.$$

由 $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_{k+1}}{a_k} < +\infty$ 知, $\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{a_{k+1}}{a_k} = 0$, 从而存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得

$$a_{k+1} \leq \frac{1}{2}a_k, \quad \forall k \geq N.$$

于是对 $n \geq N$, 有

$$a_{n+1} \leq \frac{1}{2}a_n \leq \frac{1}{2^2}a_n \leq \cdots \leq \frac{1}{2^{n-N+1}}a_N.$$

因此

$$na_n \leq \frac{n}{2^{n-N+1}}a_N \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty.$$

故 $a = 0$, 从而 $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_{k+1}}{a_k} = 1$.

□

例题 9.70 设 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ 是单调递减的正数列并且满足 $\sum_{n=1}^{\infty} x_n = +\infty$, 并证明

$$\sum_{n=1}^{\infty} x_n e^{-\frac{x_n}{x_{n+1}}} = +\infty$$

 **笔记** 利用分组判别的想法.

证明 任取 $M > 1$, 定义

$$A_M \triangleq \left\{ n \in \mathbb{N} \mid \frac{x_n}{x_{n+1}} \leq M \right\}.$$

则

$$+\infty = \sum_{n=1}^{\infty} x_n = \sum_{n \in A_M} x_n + \sum_{n \in \mathbb{N} \setminus A_M} x_n.$$

若 $\sum_{n \in A_M} x_n = +\infty$, 则

$$\sum_{n \in A_M} x_n e^{-\frac{x_n}{x_{n+1}}} \geq \sum_{n \in A_M} x_n e^{-M} = +\infty.$$

若 $\sum_{n \in \mathbb{N} \setminus A_M} x_n = +\infty$, 显然 $\mathbb{N} \setminus A_M$ 中有无穷项, 记 $\mathbb{N} \setminus A_M = \{n_k\}$, 且满足 $n_k \nearrow +\infty$, 则

$$x_{n_{k+1}} \leq x_{n_k+1} < \frac{1}{M} x_{n_k}.$$

从而对 $\forall k \in \mathbb{N}$, 有

$$x_{n_k} \leq \frac{1}{M} x_{n_{k-1}} \leq \cdots \leq \frac{1}{M^{k-1}} x_{n_1} \rightarrow 0.$$

故

$$\sum_{n \in \mathbb{N} \setminus A_M} x_n = \sum_{k=1}^{\infty} x_{n_k} \leq C \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{M^{k-1}} x_{n_1} < +\infty,$$

这与 $\sum_{n \in \mathbb{N} \setminus A_M} x_n = +\infty$ 矛盾! 综上可知

$$\sum_{n=1}^{\infty} x_n e^{-\frac{x_n}{x_{n+1}}} \geq \sum_{n \in A_M} x_n e^{-\frac{x_n}{x_{n+1}}} = +\infty.$$

□

例题 9.71 设正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 证明 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n \ln \frac{1}{a_n}}{\ln(1+n)}$ 收敛.

 **笔记** 利用分组判别的想法.

证明

□

例题 9.72 设 $\{\lambda_n\}, \{a_n\} \subset \mathbb{R}$.

1. 如果对任何收敛于 0 的数列 $\{\lambda_n\}$ 都有 $\sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n a_n$ 收敛, 证明: $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 绝对收敛.

2. 设 $p > 1$, 如果对任何 $\sum_{n=1}^{\infty} |\lambda_n|^p < \infty$ 都有 $\sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n a_n$ 收敛, 证明: $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|^q < \infty$, 这里 $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$.

证明

1. 若 $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n| = +\infty$, 记 $S_n = \sum_{k=1}^n |a_k|$, 取 $\lambda_n = \frac{\operatorname{sgn} a_n}{S_n}$, 故由 **命题 9.4** 可知

$$\sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n a_n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|a_n|}{S_n} = +\infty$$

矛盾!
2. 若 $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|^q = +\infty$, 记 $S_n = \sum_{k=1}^n |a_k|^q$, 取 $\lambda_n = \frac{|a_n|^{q-1} \operatorname{sgn} a_n}{S_n}$, 则由 $p > 1$ 和 [命题 9.4](#) 可知

$$\sum_{n=1}^{\infty} |\lambda_n|^p = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|a_n|^{\frac{p}{p-1}}}{S_n^p} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|a_n|^q}{S_n^p} < +\infty.$$

再由 [命题 9.4](#) 可知

$$\sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n a_n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|a_n|^q}{S_n} = +\infty.$$

矛盾!

□

[例题 9.73](#) 设 a_n 递减到 0 且 $b_n = a_n - 2a_{n+1} + a_{n+2} \geq 0, n = 1, 2, \dots$, 证明: $\sum_{n=1}^{\infty} nb_n$ 收敛并计算值.

证明 注意到

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^m nb_n &= \sum_{n=1}^m n(a_n - 2a_{n+1} + a_{n+2}) = \sum_{n=1}^m n[(a_n - a_{n+1}) - (a_{n+1} - a_{n+2})] \\ &\stackrel{\text{Abel 变换}}{=} \sum_{j=1}^{m-1} (j - (j+1)) \sum_{i=1}^j [(a_i - a_{i+1}) + (a_{i+1} - a_{i+2})] + m \sum_{i=1}^m [(a_i - a_{i+1}) - (a_{i+1} - a_{i+2})] \\ &= - \sum_{j=1}^{m-1} [(a_1 - a_2) - (a_{j+1} - a_{j+2})] + m [(a_1 - a_2) - (a_{m+1} - a_{m+2})] \\ &= a_1 - a_2 + a_2 - a_{m+1} - m(a_{m+1} - a_{m+2}) \\ &= a_1 - (m+1)a_{m+1} + ma_{m+2} \\ &= a_1 - (m+1)(a_{m+1} - a_{m+2}) - a_{m+2}. \end{aligned}$$

由 $b_n = (a_n - a_{n+1}) - (a_{n+1} - a_{n+2}) \geq 0$ 可知, $\{a_n - a_{n+1}\}$ 单调递减. 又 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, 故

$$\sum_{n=1}^{\infty} (a_n - a_{n+1}) = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^m (a_n - a_{n+1}) = a_1 - \lim_{m \rightarrow \infty} a_m = a_1 < +\infty.$$

因此由 [命题 9.2](#) 可知

$$\lim_{m \rightarrow \infty} (m+1)(a_{m+1} - a_{m+2}) = 0.$$

于是

$$\sum_{n=1}^m nb_n = a_1 - (m+1)(a_{m+1} - a_{m+2}) - a_{m+2} \rightarrow a_1, m \rightarrow \infty.$$

□

[例题 9.74](#) 设 $\{a_n\}, \{b_n\} \subset (0, +\infty)$ 满足

$$b_{n+1} - b_n \geq \delta > 0, n = 1, 2, \dots.$$

若 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 证明:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n \sqrt[n]{(a_1 a_2 \cdots a_n)(b_1 b_2 \cdots b_n)}}{b_n b_{n+1}} < +\infty.$$

证明 由均值不等式可知

$$\frac{n \sqrt[n]{(a_1 a_2 \cdots a_n)(b_1 b_2 \cdots b_n)}}{b_n b_{n+1}} \leq \frac{\sum_{j=1}^n a_j b_j}{b_n b_{n+1}} = \frac{\delta \sum_{j=1}^n a_j b_j}{\delta b_n b_{n+1}} = \frac{\sum_{j=1}^n a_j b_j}{b_n b_{n+1}}$$

$$\leq \frac{b_{n+1} - b_n}{\delta b_n b_{n+1}} \sum_{j=1}^n a_j b_j = \frac{1}{\delta} \left(\frac{1}{b_{n+1}} - \frac{1}{b_n} \right) \sum_{j=1}^n a_j b_j.$$

由 $b_{n+1} - b_n > \delta > 0$ 可得

$$b_n \geq b_1 + (n-1)\delta \implies b_n \rightarrow +\infty.$$

于是

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n \sqrt[n]{(a_1 a_2 \cdots a_n)(b_1 b_2 \cdots b_n)}}{b_n b_{n+1}} &\leq \frac{1}{\delta} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{b_{n+1}} - \frac{1}{b_n} \right) a_j b_j \leq \frac{1}{\delta} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{n=j}^{\infty} \left(\frac{1}{b_{n+1}} - \frac{1}{b_n} \right) a_j b_j \\ &= \frac{1}{\delta} \sum_{j=1}^{\infty} a_j b_j \sum_{n=j}^{\infty} \left(\frac{1}{b_{n+1}} - \frac{1}{b_n} \right) = \frac{1}{\delta} \sum_{j=1}^{\infty} a_j b_j \sum_{n=j}^{\infty} \left(\frac{1}{b_{n+1}} - \frac{1}{b_n} \right) \\ &= \frac{1}{\delta} \sum_{j=1}^{\infty} a_j < +\infty. \end{aligned}$$

□

例题 9.75 设

$$S_n = \sum_{k=1}^n a_k, T_n = \sum_{k=1}^n \left(1 - \frac{k}{n+1} \right) a_k, n = 1, 2, \dots$$

若 $\sum_{k=1}^{\infty} |S_k - T_k|^2 < \infty$, 证明: $\sum_{k=1}^{\infty} a_k < \infty$.

证明 注意到

$$T_n = S_n - \frac{1}{n+1} \sum_{k=1}^n k a_k,$$

故由条件可知

$$\sum_{n=1}^{\infty} |S_n - T_n|^2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\sum_{k=1}^n k a_k \right)^2}{(n+1)^2} < +\infty. \quad (9.49)$$

注意到

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^m \frac{\sum_{k=1}^n k a_k}{n(n+1)} &= \sum_{n=1}^m \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) \sum_{k=1}^n k a_k \\ &\stackrel{\text{Abel 变换}}{=} \sum_{j=1}^{m-1} (-j+1) a_{j+1} \sum_{i=1}^j \left(\frac{1}{i} - \frac{1}{i+1} \right) + \sum_{j=1}^m j a_j \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{i} - \frac{1}{i+1} \right) \\ &= - \sum_{j=1}^{m-1} j a_{j+1} + \frac{m}{m+1} \sum_{j=1}^m j a_j \\ &= \frac{m}{m+1} a_1 + \frac{m}{m+1} \sum_{j=2}^m j a_j - \sum_{j=2}^m (j-1) a_j \\ &= \frac{m}{m+1} a_1 + \sum_{j=2}^m a_j - \frac{1}{m+1} \sum_{j=2}^m j a_j \\ &= \sum_{j=1}^m a_j - \frac{1}{m+1} \sum_{j=1}^m j a_j \\ &= S_m - \frac{1}{m+1} \sum_{j=1}^m j a_j. \end{aligned} \quad (9.50)$$

由 (9.49) 式得

$$0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(\sum_{k=1}^n k a_k \right)^2}{(n+1)^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(\sum_{k=1}^n k a_k \right)^2}{n^2} \implies \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n k a_k}{n} = 0.$$

因此只须证 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sum_{k=1}^n k a_k}{n(n+1)} < +\infty$, 即可由 (9.50) 式得

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n = \lim_{m \rightarrow \infty} S_m = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sum_{k=1}^n k a_k}{n(n+1)} + \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m+1} \sum_{j=1}^m j a_j = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sum_{k=1}^n k a_k}{n(n+1)} < +\infty.$$

下证 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sum_{k=1}^n k a_k}{n(n+1)} < +\infty$. 由均值不等式和 (9.49) 式可得

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sum_{k=1}^n k a_k}{n(n+1)} \leq \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\left(\sum_{k=1}^n k a_k \right)^2}{(n+1)^2} + \frac{1}{n^2} \right] < +\infty.$$

故结论得证. □

例题 9.76 设 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset (0, +\infty)$ 满足 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x_n}{2^{n-1}} = 1$, 证明

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^n \frac{x_k}{n^2} \leq 2, \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x_n}{n^2} < 1.$$

证明 □

例题 9.77 设 $a_n > 0, n \in \mathbb{N}$ 满足

(1) $a_n - a_{n+1}$ 递减;

(2) $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛.

证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{a_{n+1}} - \frac{1}{a_n} \right) = +\infty$$

证明 注意到

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n < +\infty \implies \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0 \implies \lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - a_{n+1}) = 0 \implies a_n - a_{n+1} \geq 0.$$

从而 $\{a_n\} \searrow 0$. 于是

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{a_{n+1}} - \frac{1}{a_n} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n - a_{n+1}}{a_{n+1} a_n} \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n - a_{n+1}}{a_n^2}.$$

注意到

$$\begin{aligned} a_n^2 &= \sum_{k=n}^{\infty} (a_k^2 - a_{k+1}^2) = \sum_{k=n}^{\infty} (a_k - a_{k+1})(a_k + a_{k+1}) \\ &\leq (a_n - a_{n+1}) \sum_{k=n}^{\infty} (a_k + a_{k+1}), \end{aligned}$$

又 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n < +\infty$, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=n}^{\infty} a_k = 0$. 故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{a_{n+1}} - \frac{1}{a_n} \right) \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n - a_{n+1}}{a_n^2} \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sum_{k=n}^{\infty} (a_k + a_{k+1})} = +\infty.$$

□

例题 9.78 设 $\phi(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_k}{x^k}, x > 0$, 证明 $\sum_{n=1}^{\infty} \phi(n)$ 收敛的充要条件是 $a_0 = a_1 = 0$.

证明 令 $g(x) = \phi\left(\frac{1}{x}\right) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k x^k$, 则 $g \in C^{\infty}(\mathbb{R})$. 于是

$$g(x) = a_0 + a_1 x + O(x^2), x \rightarrow 0.$$

从而

$$\phi(n) = g\left(\frac{1}{n}\right) = a_0 + \frac{a_1}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right), n \rightarrow \infty.$$

故

$$\sum_{n=1}^{\infty} \phi(n) < +\infty \iff \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_0 + \frac{a_1}{n} \right) < +\infty \iff a_0 = a_1 = 0.$$

□

9.6 特殊级数

命题 9.13 ($\frac{\sin x}{x}$ 因式分解)

对任意 x 都有 $\frac{\sin x}{x} = \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 - \frac{x^2}{n^2 \pi^2} \right)$, 这里 x 可以为复数.

◆

证明

□

命题 9.14

1. $\cot x = \frac{\cos x}{\sin x} = \frac{1}{x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{x+n\pi} + \frac{1}{x-n\pi} \right).$
2. $\tan x = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{(2n-1)\frac{\pi}{2}-x} - \frac{1}{(2n-1)\frac{\pi}{2}+x} \right).$
3. $\frac{1}{\sin^2 x} = \frac{1}{x^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{(x+n\pi)^2} + \frac{1}{(x-n\pi)^2} \right) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{1}{(x+n\pi)^2}.$
4. $\frac{1}{\sin x} = \frac{1}{x} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left(\frac{1}{x+n\pi} + \frac{1}{x-n\pi} \right).$

◆

证明

1. 对命题 9.13 中级数两边同时取对数得

$$\ln \frac{\sin x}{x} = \sum_{n=1}^{\infty} \ln \left(1 - \frac{x^2}{n^2 \pi^2} \right).$$

两边同时求导得

$$\frac{\cos x}{\sin x} - \frac{1}{x} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-\frac{2x}{n^2\pi^2}}{1 - \frac{x^2}{n^2\pi^2}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2x}{x^2 - n^2\pi^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{x+n\pi} + \frac{1}{x-n\pi} \right).$$

故

$$\cot x = \frac{1}{x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{x+n\pi} + \frac{1}{x-n\pi} \right).$$

2. 由第 1 问及 $\cot\left(\frac{\pi}{2} - x\right) = \tan x$ 可得

$$\begin{aligned} \tan x &= \cot\left(\frac{\pi}{2} - x\right) = \frac{1}{\frac{\pi}{2} - x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\frac{\pi}{2} - x + n\pi} + \frac{1}{\frac{\pi}{2} - x - n\pi} \right) \\ &= \frac{1}{\frac{\pi}{2} - x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{(2n+1)\frac{\pi}{2} - x} - \frac{1}{(2n-1)\frac{\pi}{2} + x} \right) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{(2n-1)\frac{\pi}{2} - x} - \frac{1}{(2n-1)\frac{\pi}{2} + x} \right). \end{aligned}$$

3.

4.

□

第 10 章 Fourier 级数

10.1 Fourier 级数及基本性质

我们首先需要熟悉傅立叶级数的现代形式:

定义 10.1

设 f 是周期 1 的可积函数, 则定义 f 的傅立叶系数为

$$\hat{f}(m) = \int_0^1 f(x) e^{-2\pi i mx} dx, m \in \mathbb{Z}.$$

f 的傅立叶级数为

$$f(x) \sim \sum_{m=-\infty}^{\infty} \hat{f}(m) e^{2\pi i mx}.$$



注 定义 10.1 中的傅立叶级数(??)不意味着收敛到 f 或者收敛.

定义 10.2

对每个 $N \in \mathbb{N}_0$,

1. 我们称

$$D_N(x) = \sum_{|m| \leq N} e^{2\pi i mx} = \frac{\sin((2N+1)\pi x)}{\sin(\pi x)}.$$

为 **Dirichlet 核**.

2. 我们称

$$\begin{aligned} F_N(x) &= \frac{1}{N+1} [D_0(x) + D_1(x) + \cdots + D_N(x)] \\ &= \sum_{j=-N}^N \left(1 - \frac{|j|}{N+1}\right) e^{2\pi i j x} \\ &= \frac{1}{N+1} \left(\frac{\sin(\pi(N+1)x)}{\sin(\pi x)}\right)^2 \end{aligned}$$

为 **Fejér 核**.



注 定义 10.2 中的等式关系都是等比数列求和和欧拉公式, 二重求和换序的应用. 我们略去证明

下面我们在高数框架下给出 Dirichlet 核和 Fejér 核, 为了形式上的统一, 我们定义

定义 10.3

对每个 $n \in \mathbb{N}_0$,

1. 我们称

$$D_0(x) = 1, D_n(x) = 1 + 2 \sum_{k=1}^n \cos kx = \frac{\sin\left(n + \frac{1}{2}\right)x}{\sin\left(\frac{x}{2}\right)}, n = 1, 2, \dots. \quad (10.1)$$

为 **Dirichlet 核**.

2. 我们称

$$F_n(x) = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n D_j(x) = 1 + \frac{2}{n+1} \sum_{k=1}^n (n-k+1) \cos kx = \frac{1}{n+1} \left[\frac{\sin\left(\frac{(n+1)x}{2}\right)}{\sin\left(\frac{x}{2}\right)} \right]^2 \quad (10.2)$$

为 **Fejér 核**.



证明 证明的关键是如下结论

结论 [三角函数复合等差数列时, 部分和计算方法] 三角函数复合等差数列时, 部分和计算方法可以通过欧拉公式之后用等比数列求和公式或者乘 $\frac{\sin \frac{nx}{2}}{\sin \frac{x}{2}}$ 之后对分子和差化积得到.

1. 我们有

$$\begin{aligned} 1 + 2 \sum_{k=1}^n \cos kx &= 1 + 2 \sum_{k=1}^n \frac{\sin \frac{x}{2} \cos kx}{2 \sin \frac{x}{2}} = 1 + \frac{1}{\sin \frac{x}{2}} \sum_{k=1}^n [\sin \left(k + \frac{1}{2} \right) x - \sin \left(k - \frac{1}{2} \right) x] \\ &= 1 + \frac{\sin \left(n + \frac{1}{2} \right) x - \sin \frac{x}{2}}{\sin \frac{x}{2}} = \frac{\sin \left(n + \frac{1}{2} \right) x}{\sin \frac{x}{2}}. \end{aligned}$$

我们证明了式(10.1)式.

2. 我们有

$$\begin{aligned} F_n(x) &= \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n D_j(x) = \frac{1}{n+1} \left(1 + \sum_{j=1}^n \left(1 + 2 \sum_{k=1}^j \cos kx \right) \right) \\ &= \frac{1}{n+1} \left(n + 1 + 2 \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^j \cos kx \right) = \frac{1}{n+1} \left(n + 1 + 2 \sum_{k=1}^n \sum_{j=k}^n \cos kx \right) \\ &= \frac{1}{n+1} \left(n + 1 + 2 \sum_{k=1}^n (n-k+1) \cos kx \right) = 1 + \frac{2}{n+1} \sum_{k=1}^n (n-k+1) \cos kx, \end{aligned}$$

以及

$$\begin{aligned} F_n(x) &= \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n D_j(x) = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n \frac{\sin \left(j + \frac{1}{2} \right) x}{\sin \frac{x}{2}} \\ &= \frac{1}{n+1} \cdot \frac{\sin \frac{x}{2}}{\sin^2 \frac{x}{2}} \sum_{j=0}^n \sin \left(j + \frac{1}{2} \right) x = -\frac{1}{2(n+1) \sin^2 \frac{x}{2}} \sum_{j=0}^n [\cos(j+1)x - \cos jx] \\ &= -\frac{\cos(n+1)x - 1}{2(n+1) \sin^2 \frac{x}{2}} = \frac{\sin^2 \frac{n+1}{2} x}{(n+1) \sin^2 \frac{x}{2}}. \end{aligned}$$

这就证明了(10.2)式.

□

定理 10.1 (傅立叶部分和积分表达式)

设 f 是周期 2π 的可积函数, 其傅立叶系数为 a_n, b_n . 记 $S_0(x) = \sigma_0(x) = \frac{a_0}{2}$ 以及

$$S_n(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kx + b_k \sin kx), \sigma_n(x) = \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n S_k(x), n = 1, 2, \dots$$

则我们有

Dirichlet :

$$S_n(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) D_n(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) \frac{\sin \left(n + \frac{1}{2} \right) t}{\sin \frac{t}{2}} dt, n = 0, 1, \dots$$

Fejér :

$$\sigma_n(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) F_n(t) dt = \frac{1}{2(n+1)\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) \frac{\sin^2 \frac{n+1}{2} t}{\sin^2 \frac{t}{2}} dt, n = 0, 1, \dots$$

♡

笔记 根据经验, 取平均性质会更好一些, 因此 Fejér 是一个好核而 Dirichlet 核性质就相当糟糕, 在后面的证明中我们将充分感受到这一点.

证明 当 $n = 0$, 这个定理显然成立. 当 $n > 0$, 一方面, 我们有

$$\begin{aligned}
 S_n(x) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(y) dy + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^n \left(\int_{-\pi}^{\pi} f(y) \cos ky \cos kx dy + \int_{-\pi}^{\pi} f(y) \sin ky \sin kx dy \right) \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(y) dy + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^n \left(\int_{-\pi}^{\pi} f(y) \cos k(y-x) dy \right) \\
 &\xrightarrow{\text{注意周期 } 2\pi} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+y) dy + \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^n \left(\int_{-\pi}^{\pi} f(x+y) 2 \cos ky dy \right) \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+y) \left(1 + 2 \sum_{k=1}^n \cos ky \right) dy \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+y) D_n(y) dy.
 \end{aligned}$$

另外一方面, 我们有

$$\begin{aligned}
 \sigma_n(x) &= \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n S_j(x) = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+y) D_j(y) dy \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+y) \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n D_j(y) dy = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+y) F_n(y) dy.
 \end{aligned}$$

这就证明了这个定理. □

定理 10.2 (Fourier 级数的逐项积分定理)

设 $f(x)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 上可积或绝对可积,

$$f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx),$$

则 $f(x)$ 的 Fourier 级数可以逐项积分, 即对于任意 $c, x \in [-\pi, \pi]$,

$$\int_c^x f(t) dt = \int_c^x \frac{a_0}{2} dt + \sum_{n=1}^{\infty} \int_c^x (a_n \cos nt + b_n \sin nt) dt.$$

定理 10.3 (Fourier 级数的逐项微分定理)

设 $f(x)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 上连续,

$$f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx),$$

$f(-\pi) = f(\pi)$, 且除了有限个点外 $f(x)$ 可导. 进一步假设 $f'(x)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 上可积或绝对可积 (注意: $f'(x)$ 在有限个点可能无定义, 但这并不影响其可积性). 则 $f'(x)$ 的 Fourier 级数可由 $f(x)$ 的 Fourier 级数逐项微分得到, 即

$$f'(x) \sim \frac{d}{dx} \left(\frac{a_0}{2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d}{dx} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) = \sum_{n=1}^{\infty} (-a_n n \sin nx + b_n n \cos nx).$$

推论 10.1

$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$ 是某个在 $[-\pi, \pi]$ 上可积或绝对可积函数的 Fourier 级数的必要条件是 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{n}$ 收敛. ♡

定理 10.4 (Bessel 不等式)

设 $f(x)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 上可积或平方可积, 则 $f(x)$ 的 Fourier 系数满足不等式

$$\frac{a_0^2}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2) \leq \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(x) dx.$$



笔记 这表示 Fourier 系数的平方组成了一个收敛的级数.

定理 10.5 (Parseval 恒等式)

设 $f(x)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 上可积或平方可积, 则 $f(x)$ 的 Fourier 系数满足恒等式

$$\frac{a_0^2}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(x) dx.$$

**引理 10.1**

设 f 为 $[-\pi, \pi]$ 上的连续可微函数, 且 $f(-\pi) = f(\pi)$. a_n, b_n 为 f 的 Fourier 系数, a'_n, b'_n 为 f 的导函数 f' 的 Fourier 系数, 证明

$$a'_0 = 0, a'_n = nb_n, b'_n = -na'_n (n = 1, 2, \dots).$$



注 分部积分的条件, 需要 f 的导函数 f' 在积分区域上连续.

证明 由于 f 为 $[-\pi, \pi]$ 上的连续可微函数, 因此 $f' \in C([- \pi, \pi])$. 又 $f(\pi) = f(-\pi)$, 故

$$\begin{aligned} a'_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f'(x) dx = \frac{1}{\pi} f(x) \Big|_{-\pi}^{\pi} = 0, \\ a'_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f'(x) \cos nx dx = \frac{1}{\pi} f(x) \cos nx \Big|_{-\pi}^{\pi} + \frac{n}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx = nb_n (n = 1, 2, \dots), \\ b'_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f'(x) \sin nx dx = \frac{1}{\pi} f(x) \sin nx \Big|_{-\pi}^{\pi} - \frac{n}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx = -na_n (n = 1, 2, \dots), \end{aligned}$$

因此结论得证.



例题 10.1 设 f 以 2π 为周期且具有二阶连续的导函数, 证明 f 的 Fourier 级数在 $(-\infty, +\infty)$ 上一致收敛于 f .

证明 因为 $f(x)$ 是以 2π 为周期的具有二阶连续导数的函数, 故 $f(x), f'(x)$ 可展开成傅里叶级数, 不妨设

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx), \quad f'(x) = \frac{a'_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a'_n \cos nx + b'_n \sin nx).$$

先证 $\frac{|a_0|}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (|a_n| + |b_n|)$ 收敛. 由引理 10.1 可知

$$a'_0 = 0, a'_n = nb_n, b'_n = -nb_n (n = 1, 2, \dots),$$

从而

$$|a_n| + |b_n| = \frac{|b'_n|}{n} + \frac{|a'_n|}{n} \leq \frac{1}{2} \left[(b'_n)^2 + \frac{1}{n^2} \right] + \frac{1}{2} \left[(a'_n)^2 + \frac{1}{n^2} \right] = \frac{1}{n^2} + \frac{1}{2} [(a'_n)^2 + (b'_n)^2]. \quad (10.3)$$

又由 Bessel 不等式 可知

$$\frac{a'_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [(a'_n)^2 + (b'_n)^2] \leq \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [f'(x)]^2 dx < +\infty.$$

故 $\sum_{n=1}^{\infty} [(a'_n)^2 + (b'_n)^2]$ 收敛. 再结合 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}$ 收敛及 (10.3) 式可知 $\sum_{n=1}^{\infty} (|a_n| + |b_n|)$ 收敛, 进而 $\frac{|a_0|}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (|a_n| + |b_n|)$ 收敛. 注意到

$$\left| \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \right| \leq \frac{|a_0|}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (|a_n| + |b_n|), \forall x \in (-\infty, +\infty).$$

因此由 Weierstrass 判别法可知, $\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 上一致收敛, 即 f 的 Fourier 级数在 $(-\infty, +\infty)$ 上一致收敛于 f .

□

第 11 章 多元函数

11.1 多元函数的连续性和微分

我们的极限采用聚点定义, 即只需要沿着有定义的地方趋近即可.

例题 11.1 设 $f(x, y) = \begin{cases} \frac{x^2 y}{x^4 + y^2}, & x^2 + y^2 \neq 0 \\ 0, & x^2 + y^2 = 0 \end{cases}$, 证明 f 沿着每条射线 $\begin{cases} x = t \cos \alpha, & t > 0, \alpha \in [0, 2\pi) \\ y = t \sin \alpha, & t > 0, \alpha \in [0, 2\pi) \end{cases}$ 趋于 $(0, 0)$

时都趋于 0, 但是 f 在 $(0, 0)$ 不连续.

笔记 本结果表明, 使用极坐标求二重极限不一定正确. 实际上, 我们用极坐标求二重极限时, 都是固定 α , 再令 $t \rightarrow 0$ 求极限. 因此得到的只是沿着每个过原点的射线 (与 x 轴的夹角为 α) 趋于 $(0, 0)$ 的极限, 比如还可以沿 $y = kx^2$ 这条曲线趋于 $(0, 0)$.

证明 一方面,

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} f(t \cos \alpha, t \sin \alpha) = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{t^3 \cos \alpha \sin \alpha}{t^4 \cos^4 \alpha + t^2 \sin^2 \alpha} = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{t \cos \alpha \sin \alpha}{t^2 \cos^4 \alpha + \sin^2 \alpha} = 0,$$

另外一方面

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x, kx^2) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{kx^4}{x^4 + k^2 x^4} = \frac{k}{1 + k^2}.$$

故 f 在 $(0, 0)$ 不连续. 矛盾!

□

注 实际上, 使用极坐标变换求极限时, 只需要在 $t \rightarrow 0$ 的时候让 α 也发生变化 (不再固定 α), 再求极限才能得到正确的极限值, 但这样反而不方便求极限.

那么什么时候固定 α 后求出来的极限就是原函数的极限呢? 实际上只需要极限关于 $\alpha \in [0, 2\pi)$ 一致, 因为你直接考察定义 $\varepsilon - \delta$ 语言即可. 实际做题中可以体现为

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \sup_{\alpha \in [0, 2\pi)} |f(t \cos \alpha, t \sin \alpha) - A| = 0$$

更直白的, 你需要得到形如

$$|f(t \cos \alpha, t \sin \alpha) - A| \leq g(t)$$

的不等式且 $\lim_{t \rightarrow 0^+} g(t) = 0$.

命题 11.1

设二元函数 $f(x, y)$ 在点 (a, b) 的某个去心邻域内有定义, 若对 $\forall \alpha \in [0, 2\pi)$, 都有

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} f(a + t \cos \alpha, b + t \sin \alpha) = A \in \mathbb{R},$$

并且

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \sup_{\alpha \in [0, 2\pi)} |f(t \cos \alpha, t \sin \alpha) - A| = 0,$$

或者存在函数 $g(t)$ 满足对 $\forall \alpha \in [0, 2\pi)$, 都有

$$|f(a + t \cos \alpha, b + t \sin \alpha) - A| \leq g(t), \quad \lim_{t \rightarrow 0^+} g(t) = 0,$$

则

$$\lim_{(x, y) \rightarrow (a, b)} f(x, y) = A.$$

证明 显然条件 $\lim_{t \rightarrow 0^+} \sup_{\alpha \in [0, 2\pi)} |f(t \cos \alpha, t \sin \alpha) - A| = 0$ 和条件存在函数 $g(t)$ 满足对 $\forall \alpha \in [0, 2\pi)$, 都有

$$|f(a + t \cos \alpha, b + t \sin \alpha) - A| \leq g(t), \quad \lim_{t \rightarrow 0^+} g(t) = 0$$

等价. 由 $\lim_{t \rightarrow 0^+} g(t) = 0$ 知, $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $\delta > 0$, 使得

$$|g(t)| < \varepsilon, \forall t \in (0, \delta).$$

对 $\forall (x, y)$, 满足 $0 < \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2} < \delta$, 令

$$t = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}, \alpha = \arctan \frac{y-b}{x-a},$$

则 $x = a + t \cos \alpha, y = b + t \sin \alpha$. 于是

$$|f(x, y) - A| = |f(a + t \cos \alpha, b + t \sin \alpha) - A| \leq g(t) < \varepsilon, \forall (x, y) \in B((a, b), \delta).$$

□

例题 11.2 计算

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{x^3 + y^3}{x + y}$$

证明 考虑

$$|f(t \cos \alpha, t \sin \alpha)| = t^2 \left| \frac{\cos^3 \alpha + \sin^3 \alpha}{\cos \alpha + \sin \alpha} \right| = t^2 |\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha - \cos \alpha \sin \alpha| \leq 2t^2,$$

于是

$$0 \leq \lim_{t \rightarrow 0^+} |f(t \cos \alpha, t \sin \alpha)| \leq 2 \lim_{t \rightarrow 0^+} t^2 = 0$$

故我们得到了

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{x^3 + y^3}{x + y} = 0.$$

□

例题 11.3 设 f 在 $(0,0)$ 连续且满足

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{f(x, y) - xy}{x^2 + y^2} = a > 0$$

求 a 的范围使得 f 在 $(0,0)$ 一定取到极值. 再求 a 的范围使得 f 在 $(0,0)$ 一定取不到极值.

笔记 注意到 $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{xy}{x^2 + y^2}$ 不存在, 但是

$$\left| \frac{xy}{x^2 + y^2} \right| \leq \frac{1}{2}$$

即猜测 $\frac{1}{2}$ 是 a 的分界点.

证明 由条件容易得到

$$\begin{aligned} & \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{f(x, y) - xy}{x^2 + y^2} = a \\ \Rightarrow & \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f(x, y) = a \cdot \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} (x^2 + y^2) + \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} xy = 0 \\ \Rightarrow & f(0, 0) = \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f(x, y) = 0 \end{aligned}$$

以及

$$f(x, y) = (a + g(x, y))(x^2 + y^2) + xy, \quad \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} g(x, y) = 0.$$

当 $a > \frac{1}{2}$, 当 (x, y) 足够靠近 0 使得 $g(x, y) > \frac{1}{2} - a$. 此时我们有

$$f(x, y) = (a + g(x, y))(x^2 + y^2) + xy > \frac{1}{2}(x^2 + y^2) + xy = \frac{1}{2}(x + y)^2 \geq 0$$

故 $a > \frac{1}{2}$ 时, f 在 $(0,0)$ 处取得极小值.

当 $0 < a < \frac{1}{2}$, 当 (x, y) 足够靠近 0 使得 $-a < g(x, y) < \frac{1-2a}{4}$, 则此时当 $x > 0, y > 0$ 有 $f(x, y) > 0$. 但是

$$f(x, y) = (a + g(x, y))(x^2 + y^2) + xy < \frac{1+2a}{4}(x^2 + y^2) + xy$$

又 $\frac{1+2a}{4}(x^2 + y^2) + xy$ 在 $y = -x$ 上有

$$\frac{1+2a}{4}2x^2 - x^2 = \frac{2a-1}{2}x^2 < 0,$$

故此时 $(0, 0)$ 不是 f 的极值点.

当 $a = \frac{1}{2}$ 问题无法判断, 这是因为考虑 $f(x, y) = xy + \frac{1}{2}(x^2 + y^2) + x^2(x^2 + y^2)$, 则

$$f(x, y) = \frac{1}{2}(x+y)^2 + x^2(x^2 + y^2) > 0,$$

即 $(0, 0)$ 是极值. 但是考虑 $f(x, y) = \frac{1}{2}(x^2 + y^2) + xy - x(x^2 + y^2)$, 就有

$$f(x, -x) = x^2 - x^2 - 2x^3 = -2x^3 < 0, x > 0,$$

$$f(x, x) = x^2 + x^2 - 2x^3 = 2x^2 - 2x^3 > 0, 0 < x < 1.$$

即 $(0, 0)$ 不是极值.

□

定理 11.1

设 $u = f(x, y), v = g(x, y)$ 在区域 $D \subset \mathbb{R}^2$ 上有连续偏导数, 则 u 与 v 之间有函数关系当且仅当

$$J = \frac{\partial(u, v)}{\partial(x, y)} = 0.$$

♡

证明 必要性. 假定 u, v 满足 $F(u, v) = 0$, 则由 $F(u, v) = F[f(x, y), g(x, y)]$ 可知

$$F'_u \cdot f'_x + F'_v g'_x = 0, \quad F'_u f'_y + F'_v g'_y = 0.$$

注意到 F'_u, F'_v 不同时为 0, 故上述方程组存在非零解, 从而有 $J = \frac{\partial(u, v)}{\partial(x, y)} = 0$.

充分性. 若 u'_x, u'_y, v'_x, v'_y 全为 0, 则 u, v 是常数, 从而有关系 $u = cv$. 若上述四个值有一个非 0, 例如是 $v'_y \neq 0$, 则由隐函数存在定理, 可从 $v = g(x, y)$ 可确定函数 $y = \psi(x, v)$. 代入 $u = f(x, y)$ 可得 $u = f(x, \psi(x, v))$, 记为 $F(x, v)$. 因此, 我们有

$$0 = J = \begin{vmatrix} u_x & u_y \\ v_x & v_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} F'_x + F'_v v'_x & F'_v v'_y \\ v'_x & v'_y \end{vmatrix} = F'_x v'_y.$$

由此知 $F'_x = 0$. 这说明 F 不是 x 的函数, 即 $u = F(v)$.

□

例题 11.4 设 $xf'_x + yf'_y = 0$, 证明 f 是 $\frac{y}{x}$ 的函数.

证明 注意到

$$\begin{vmatrix} f'_x & f'_y \\ -\frac{y}{x^2} & \frac{1}{x} \end{vmatrix} = \frac{1}{x^2} (xf'_x + yf'_y) = 0, \quad \frac{\partial(\frac{y}{x})}{\partial x} = -\frac{y}{x^2}, \quad \frac{\partial(\frac{y}{x})}{\partial y} = \frac{1}{x}$$

我们由定理 11.1 知 f 是 $\frac{y}{x}$ 的函数.

□

定理 11.2 (用矩阵判定极值)

设 f 是某个区域 $V \subset \mathbb{R}^n$ 的二阶连续可微函数, 我们定义其 Hess(黑塞) 矩阵为

$$Hf = \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)_{1 \leq i, j \leq n},$$

则对 $\mathbf{x}_0 \in V$ 满足 $\frac{\partial f}{\partial x_i}(\mathbf{x}_0) = 0, i = 1, 2, \dots, n$ 有

1. $Hf(\mathbf{x}_0)$ 是正定的, 则 \mathbf{x}_0 是 f 严格极小值点;
2. $Hf(\mathbf{x}_0)$ 是负定的, 则 \mathbf{x}_0 是 f 严格极大值点;
3. $Hf(\mathbf{x}_0)$ 是不定的 (既不是正定, 也不是负定), 则 \mathbf{x}_0 不是 f 极值点;
4. 若 \mathbf{x}_0 是 f 极小值点, 则 $Hf(\mathbf{x}_0)$ 是半正定的;
5. 若 \mathbf{x}_0 是 f 极大值点, 则 $Hf(\mathbf{x}_0)$ 是半负定的.



证明



定义 11.1

我们称 $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ 为齐 $n (n \in \mathbb{N})$ 次函数, 如果 f 满足

$$f(tx, ty) = t^n f(x, y), \forall x, y \in \mathbb{R}, t > 0.$$



命题 11.2 (齐次函数基本性质)

若 $f \in D^2(\mathbb{R}^2)$, 则 f 是齐 n 次函数的充要条件是

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} = nf.$$



证明 若 f 是齐 n 次函数, 则

$$f(tx, ty) = t^n f(x, y), \forall x, y \in \mathbb{R}, t > 0.$$

两边对 t 求导得

$$x \frac{\partial f}{\partial x}(tx, ty) + y \frac{\partial f}{\partial y}(tx, ty) = nt^{n-1} f(x, y),$$

于是

$$tx \frac{\partial f}{\partial x}(tx, ty) + ty \frac{\partial f}{\partial y}(tx, ty) = nt^n f(x, y) = nf(tx, ty),$$

再令 $\mathbf{x} = tx, \mathbf{y} = ty$, 即证.

反过来若

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} = nf$$

成立, 固定 $x, y \in \mathbb{R}$ 并考虑 $g(t) = f(tx, ty)$. 则有

$$tg'(t) = tx \frac{\partial f}{\partial x}(tx, ty) + ty \frac{\partial f}{\partial y}(tx, ty) = nf(tx, ty) = ng(t).$$

故解微分方程得 $g(t) = Ct^n$, 从而将 $g(1) = f(x, y)$ 代入得 $C = f(x, y)$, 于是

$$g(t) = f(tx, ty) = t^n f(x, y).$$

这就证明了

$$f(tx, ty) = t^n f(x, y), \forall x, y \in \mathbb{R}, t > 0.$$



例题 11.5 设 $\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0$ 且 $u(0, y) = y^2, u(x, 1) = \cos x$, 求 u .

证明 对 $\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0$ 两边关于 y 积分得 $\frac{\partial u}{\partial x} + u = C(x)$. 由 $u(x, 1) = \cos x$ 得

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x, 1) = -\sin x \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial x}(x, 1) + u(x, 1) = C(x) = \cos x - \sin x.$$

又

$$\frac{\partial(ue^x)}{\partial x} = e^x \left(\frac{\partial u}{\partial x} + u \right) = e^x(\cos x - \sin x) \Rightarrow ue^x = e^x \cos x + C_2(y),$$

我们有

$$u(x, y) = \cos x + C_2(y)e^{-x}.$$

现在

$$y^2 = u(0, y) = 1 + C_2(y) \Rightarrow C_2(y) = y^2 - 1.$$

故

$$u(x, y) = \cos x + (y^2 - 1)e^{-x}.$$

□

例题 11.6 设 l_1, l_2 夹角为 $\varphi \in (0, \pi)$ 且 f 连续可微, 证明

$$\left| \frac{\partial f}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right|^2 \leq \frac{2}{\sin^2 \varphi} \left[\left| \frac{\partial f}{\partial l_1} \right|^2 + \left| \frac{\partial f}{\partial l_2} \right|^2 \right].$$

证明 由可微时方向导数计算公式有

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial l_1} &= \cos a \cdot \frac{\partial f}{\partial x} + \sin a \cdot \frac{\partial f}{\partial y}, \\ \frac{\partial f}{\partial l_2} &= \cos(a + \varphi) \cdot \frac{\partial f}{\partial x} + \sin(a + \varphi) \cdot \frac{\partial f}{\partial y}, \end{aligned}$$

则

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial l_1} \\ \frac{\partial f}{\partial l_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos a & \sin a \\ \cos(a + \varphi) & \sin(a + \varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{pmatrix}.$$

于是

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial f}{\partial l_1} \right|^2 + \left| \frac{\partial f}{\partial l_2} \right|^2 &= \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial l_1} & \frac{\partial f}{\partial l_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial l_1} \\ \frac{\partial f}{\partial l_2} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos a & \sin a \\ \cos(a + \varphi) & \sin(a + \varphi) \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \cos a & \sin a \\ \cos(a + \varphi) & \sin(a + \varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos^2 a + \cos^2(a + \varphi) & \sin(a + \varphi) \cos(a + \varphi) + \sin a \cos a \\ \sin(a + \varphi) \cos(a + \varphi) + \sin a \cos a & \sin^2 a + \sin^2(a + \varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

利用

$$\begin{pmatrix} \cos^2 a + \cos^2(a + \varphi) & \sin(a + \varphi) \cos(a + \varphi) + \sin a \cos a \\ \sin(a + \varphi) \cos(a + \varphi) + \sin a \cos a & \sin^2 a + \sin^2(a + \varphi) \end{pmatrix}$$

的特征值为 $1 \pm \cos \varphi$ 和 Rayleigh quotient(瑞丽商) 的基本性质, 我们知道

$$\left| \frac{\partial f}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right|^2 \leq \frac{1}{1 - |\cos \varphi|} \left[\left| \frac{\partial f}{\partial l_1} \right|^2 + \left| \frac{\partial f}{\partial l_2} \right|^2 \right] \leq \frac{2}{\sin^2 \varphi} \left[\left| \frac{\partial f}{\partial l_1} \right|^2 + \left| \frac{\partial f}{\partial l_2} \right|^2 \right],$$

即证. 上式最后一个不等式是因为

$$\begin{aligned} \frac{1}{1 - |\cos \varphi|} &\geq \frac{2}{\sin^2 \varphi} \\ \iff 1 - |\cos \varphi| &\leq \frac{\sin^2 \varphi}{2} \\ \iff 2 - 2|\cos \varphi| &\leq 1 - \cos^2 \varphi \\ \iff \cos^2 \varphi - 2|\cos \varphi| + 1 &\geq 0 \end{aligned}$$

$$\iff (|\cos \varphi| - 1)^2 \geq 0.$$

□

例题 11.7 设 D 为单位圆盘, 考虑 $f \in C^1(D) \cap C(\bar{D})$ 且 $|f| \leq 1$, 证明: 存在 D 中的一个点 (x_0, y_0) 使得

$$\left| \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0) \right|^2 + \left| \frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0) \right|^2 \leq 16.$$

笔记 摄动想法, 考虑 $g(x, y) = f(x, y) + \varepsilon(x^2 + y^2)$, 其中 ε 待定. 此外很多同学疑惑构造函数咋来的, 实际上这是完全没有必要的! 因为大家几乎都是记的. 本题有一些更高端的技术可以加强到最佳系数.

证明 考虑 $g(x, y) = f(x, y) + 2(x^2 + y^2)$, 则由 $|f| \leq 1$ 知 $g|_{\partial D} \geq 1$, $g(0, 0) = f(0, 0) \leq 1$. 故 g 最小值在 D 内取到. 又由 $g \in C(D)$, 从而存在 D 中的一个 g 的最小值点 (x_0, y_0) 使得 $\frac{\partial g}{\partial x}(x_0, y_0) = 0$, $\frac{\partial g}{\partial y}(x_0, y_0) = 0$, 即

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0) = -4x_0, \quad \frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0) = -4y_0,$$

这就得到了证明.

□

命题 11.3

设 $f(x, y)$ 是 D 上的二元函数且偏导数都存在, 令 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta, g(r, \theta) = f(r \cos \theta, r \sin \theta)$, 则

$$\begin{aligned} r \frac{\partial g}{\partial r} &= x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y}, \\ \frac{\partial g}{\partial \theta} &= -y \frac{\partial f}{\partial x} + x \frac{\partial f}{\partial y}. \end{aligned}$$

◆

证明 直接求导得证.

□

例题 11.8 设 $\lim_{r \rightarrow \sqrt{x^2+y^2} \rightarrow +\infty} \left(x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} \right) = a > 0$, 证明 f 在 \mathbb{R}^2 取得最小值.

注 本题关键是有一个隐藏条件: 条件极限关于角度 θ 的一致性.

笔记 积累想法设 $g(r, \theta) = f(r \cos \theta, r \sin \theta)$, 则

$$r \frac{\partial g}{\partial r} = x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y}, \quad \frac{\partial g}{\partial \theta} = -y \frac{\partial f}{\partial x} + x \frac{\partial f}{\partial y}.$$

即联想命题 11.3.

证明 注意到

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} r g'_r = \lim_{r \rightarrow +\infty} r \frac{\partial g}{\partial r} = a > 0,$$

于是存在 $r_0 > 0$ 使得 $g'_r > 0, \forall r \geq r_0$. 则此时

$$g(r, \theta) \geq g(r_0, \theta), \forall r \geq r_0, \theta \in [0, 2\pi],$$

故 g 的最小值在 $D = \{(r, \theta) : r \in [0, r_0], \theta \in [0, 2\pi]\}$ 取到, 因此 $\min_{\substack{r \in [0, r_0], \\ \theta \in [0, 2\pi]}} g(r, \theta)$ 为 g 最小值.

□

例题 11.9 设 f 是 \mathbb{R}^2 上的连续可微函数且 $f(0, 1) = f(1, 0)$, 证明存在单位圆周上两个不同的点使得 $y \frac{\partial f}{\partial x} = x \frac{\partial f}{\partial y}$.

笔记 联想命题 11.3.

证明 令 $x = \cos \theta, y = \sin \theta$, 考虑 $g(\theta) = f(\cos \theta, \sin \theta)$, 注意到

$$g(0) = g\left(\frac{\pi}{2}\right) = g(2\pi).$$

由 Rolle 中值定理知, 存在 $\theta_1 \neq \theta_2 \in [0, 2\pi]$, 记 $x_i = \cos \theta_i, y_i = \sin \theta_i (i = 1, 2)$, 使得

$$g'(\theta_1) = g'(\theta_2) = 0$$

$$\begin{aligned} &\iff \begin{cases} -\sin \theta_1 \frac{\partial f}{\partial x}(\cos \theta_1, \sin \theta_1) + \cos \theta_1 \frac{\partial f}{\partial y}(\cos \theta_1, \sin \theta_1) = 0, \\ -\sin \theta_2 \frac{\partial f}{\partial x}(\cos \theta_2, \sin \theta_2) + \cos \theta_2 \frac{\partial f}{\partial y}(\cos \theta_2, \sin \theta_2) = 0. \end{cases} \\ &\iff \begin{cases} y_1 \frac{\partial f}{\partial x}(x_1, y_1) = x_1 \frac{\partial f}{\partial y}(x_1, y_1), \\ y_2 \frac{\partial f}{\partial x}(x_2, y_2) = x_2 \frac{\partial f}{\partial y}(x_2, y_2). \end{cases} \end{aligned}$$

即单位圆周上有两个不同的点, 使得 $y \frac{\partial f}{\partial x} = x \frac{\partial f}{\partial y}$.

□

例题 11.10

1. 设 $f \in C^1(\mathbb{R}^2)$, $f(0, 0) = 0$ 且 $|\nabla f| \leq 1$, 证明 $|f(1, 2)| \leq \sqrt{5}$.

2. 设 $f \in C^1(\mathbb{R}^2)$, $f(0, 0) = 0$ 且

$$\left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \leq 2|x - y|, \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \leq 2|x - y|,$$

证明: $|f(5, 4)| \leq 1$.

注 梯度及其模定义为 $\nabla f \triangleq \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right)$, $|\nabla f| \triangleq \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}$.

注 第二问如果和上一问完全类似, 取积分路径为连接 $(0, 0), (5, 4)$ 的线段, 那么由第一型曲线积分和第二型曲面积分的联系和 Cauchy 不等式 (离散版本) 我们有

$$\begin{aligned} |f(5, 4)| &= \left| \int_{(0,0)}^{(5,4)} \left(\frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy \right) \right| = \left| \int_{(0,0)}^{(5,4)} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \cos(\widehat{t, x}) + \frac{\partial f}{\partial y} \sin(\widehat{t, x}) \right) ds \right| \\ &\leq \int_{(0,0)}^{(5,4)} |\nabla f| ds \leq \sqrt{8} \int_{(0,0)}^{(5,4)} |x - y| ds \\ &= \frac{\sqrt{8}}{5} \int_0^5 x \sqrt{1 + \left(\frac{4}{5} \right)^2} dx = \sqrt{82}. \end{aligned}$$

其中 $(\cos(\widehat{t, x}), \sin(\widehat{t, y}))$ 为积分路径曲线正切向的方向余弦. 没能成功的原因就是两类曲线积分转换时的损失, 没有充分利用题目条件: 当 $y = x$ 时, f 的两个偏导数都为 0. 上述证明中选取的积分路径与 $y = x$ 这条直线关系不大.

证明

1. 注意到

$$f(1, 2) - f(0, 0) = \int_{(0,0)}^{(1,2)} \left(\frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy \right)$$

这里积分路径待定. 于是由第一型曲线积分和第二型曲面积分的联系和 Cauchy 不等式 (离散版本) 得

$$\begin{aligned} |f(1, 2)| &= \left| \int_{(0,0)}^{(1,2)} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \cos(\widehat{t, x}) + \frac{\partial f}{\partial y} \sin(\widehat{t, x}) \right) ds \right|, \\ &\leq \int_{(0,0)}^{(1,2)} |\nabla f| ds \leq \int_{(0,0)}^{(1,2)} 1 ds \end{aligned}$$

其中 $(\cos(\widehat{t, x}), \sin(\widehat{t, y}))$ 为积分路径曲线正切向的方向余弦. 为了得到这个方法最佳的估计, 我们取积分路径为连接 $(0, 0), (1, 2)$ 的线段, 这恰好给出了 $|f(1, 2)| \leq \sqrt{5}$.

2. 先沿着 $y = x, 0 \leq x \leq 4$ 积分, 此时知积分 $\int_{(0,0)}^{(4,4)} \left(\frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy \right)$ 为 0. 于是

$$\begin{aligned} |f(5, 4)| &= \left| \int_{(0,0)}^{(5,4)} \left(\frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy \right) \right| = \left| \int_{(4,4)}^{(5,4)} \left(\frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy \right) \right| \\ &= \left| \int_4^5 \frac{\partial f}{\partial x} dx \right| \leq 2 \int_4^5 |x - 4| dx = 1. \end{aligned}$$

□

11.2 隐函数

定义 11.2

设 $E \subset \mathbf{R}^2$, 函数 $F: E \rightarrow \mathbf{R}$. 对于方程

$$F(x, y) = 0, \quad (11.1)$$

如果存在集合 $I, J \subset \mathbf{R}$, 对任何 $x \in I$, 有惟一确定的 $y \in J$, 使得 $(x, y) \in E$, 且满足方程(11.1), 则称方程(11.1)确定了一个定义在 I 上, 值域含于 J 的 **隐函数**. 若把它记为

$$y = f(x), \quad x \in I, y \in J,$$

则成立恒等式

$$F(x, f(x)) \equiv 0, \quad x \in I.$$



定理 11.3 (隐函数存在唯一性定理)

若函数 $F(x, y)$ 满足下列条件:

- (i) F 在以 $P_0(x_0, y_0)$ 为内点的某一区域 $D \subseteq \mathbf{R}^2$ 上连续;
- (ii) $F(x_0, y_0) = 0$ (通常称为初始条件);
- (iii) F 在 D 上存在连续的偏导数 $F_y(x, y)$;
- (iv) $F_y(x_0, y_0) \neq 0$.

则

1° 存在点 P_0 的某邻域 $U(P_0) \subseteq D$, 在 $U(P_0)$ 上方程 $F(x, y) = 0$ 惟一地决定了一个定义在某区间 $(x_0 - \alpha, x_0 + \alpha)$ 上的 (隐) 函数 $y = f(x)$, 使得当 $x \in (x_0 - \alpha, x_0 + \alpha)$ 时, $(x, f(x)) \in U(P_0)$, 且 $F(x, f(x)) \equiv 0, f(x_0) = y_0$;

2° $f(x)$ 在 $(x_0 - \alpha, x_0 + \alpha)$ 上连续.



证明 先证隐函数 f 的存在性与惟一性.

由条件 (iv), 不妨设 $F_y(x_0, y_0) > 0$ (若 $F_y(x_0, y_0) < 0$, 则可讨论 $-F(x, y) = 0$). 由条件 (iii) F_y 在 D 上连续, 由连续函数的局部保号性, 存在点 P_0 的某一闭的方邻域 $[x_0 - \beta, x_0 + \beta] \times [y_0 - \beta, y_0 + \beta] \subseteq D$, 使得在其上每一点都有 $F_y(x, y) > 0$. 因而, 对每个固定的 $x \in [x_0 - \beta, x_0 + \beta]$, $F(x, y)$ 作为 y 的一元函数, 必定在 $[y_0 - \beta, y_0 + \beta]$ 上严格增且连续. 由初始条件 (ii) 可知

$$F(x_0, y_0 - \beta) < 0, \quad F(x_0, y_0 + \beta) > 0.$$

再由 F 的连续性条件 (i), 又可知道 $F(x, y_0 - \beta)$ 与 $F(x, y_0 + \beta)$ 在 $[x_0 - \beta, x_0 + \beta]$ 上也是连续的. 因此由保号性存在 $\alpha > 0$ ($\alpha \leq \beta$), 当 $x \in (x_0 - \alpha, x_0 + \alpha)$ 时恒有

$$F(x, y_0 - \beta) < 0, \quad F(x, y_0 + \beta) > 0.$$

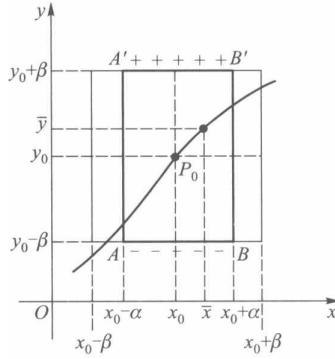


图 11.1

如图 11.1 所示, 在矩形 $ABB'A'$ 的 AB 边上 F 取负值, 在 $A'B'$ 边上 F 取正值. 因此对 $(x_0 - \alpha, x_0 + \alpha)$ 上每个固定值 \bar{x} , 同样有 $F(\bar{x}, y_0 - \beta) < 0, F(\bar{x}, y_0 + \beta) > 0$. 根据前已指出的 $F(\bar{x}, y)$ 在 $[y_0 - \beta, y_0 + \beta]$ 上严格增且连续, 由介值性定理知存在惟一的 $\bar{y} \in (y_0 - \beta, y_0 + \beta)$, 满足 $F(\bar{x}, \bar{y}) = 0$. 由 \bar{x} 在 $(x_0 - \alpha, x_0 + \alpha)$ 中的任意性, 这就证明了存在惟一的一个隐函数 $y = f(x)$, 它的定义域为 $(x_0 - \alpha, x_0 + \alpha)$, 值域含于 $(y_0 - \beta, y_0 + \beta)$. 若记

$$U(P_0) = (x_0 - \alpha, x_0 + \alpha) \times (y_0 - \beta, y_0 + \beta),$$

则 $y = f(x)$ 在 $U(P_0)$ 上满足结论 1° 的各项要求.

再证明 f 的连续性.

对于 $(x_0 - \alpha, x_0 + \alpha)$ 上的任意点 $\bar{x}, \bar{y} = f(\bar{x})$. 由上述结论可知 $y_0 - \beta < \bar{y} < y_0 + \beta$. 任给 $\varepsilon > 0$, 且 ε 足够小, 使得

$$y_0 - \beta \leq \bar{y} - \varepsilon < \bar{y} < \bar{y} + \varepsilon \leq y_0 + \beta.$$

由 $F(\bar{x}, \bar{y}) = 0$ 及 $F(x, y)$ 关于 y 严格递增, 可得 $F(\bar{x}, \bar{y} - \varepsilon) < 0, F(\bar{x}, \bar{y} + \varepsilon) > 0$. 根据保号性, 知存在 \bar{x} 的某邻域 $(\bar{x} - \delta, \bar{x} + \delta) \subset (x_0 - \alpha, x_0 + \alpha)$, 使得当 $x \in (\bar{x} - \delta, \bar{x} + \delta)$ 时同样有

$$F(x, \bar{y} - \varepsilon) < 0, F(x, \bar{y} + \varepsilon) > 0.$$

因此存在惟一的 y , 使得 $F(x, y) = 0$, 即 $y = f(x), |y - \bar{y}| < \varepsilon$. 这就证明了当 $|x - \bar{x}| < \delta$ 时, $|f(x) - f(\bar{x})| < \varepsilon$, 即 $f(x)$ 在 \bar{x} 连续. 由 \bar{x} 的任意性, 可得 $f(x)$ 在 $(x_0 - \alpha, x_0 + \alpha)$ 上连续.

□

定理 11.4 (隐函数可微性定理)

设函数 $F(x, y)$ 满足下列条件:

- (i) F 在以 $P_0(x_0, y_0)$ 为内点的某一区域 $D \subseteq \mathbf{R}^2$ 上连续;
- (ii) $F(x_0, y_0) = 0$ (通常称为初始条件);
- (iii) F 在 D 上存在连续的偏导数 $F_y(x, y)$;
- (iv) $F_y(x_0, y_0) \neq 0$.

又设在 D 上还存在连续的偏导数 $F_x(x, y)$, 则由方程 (1) 所确定的隐函数 $y = f(x)$ 在其定义域 $(x_0 - \alpha, x_0 + \alpha)$ 上有连续导函数, 且

$$f'(x) = -\frac{F_x(x, y)}{F_y(x, y)}.$$

♡

证明 设 x 与 $x + \Delta x$ 都属于 $(x_0 - \alpha, x_0 + \alpha)$, 它们所对应的函数值 $y = f(x)$ 与 $y + \Delta y = f(x + \Delta x)$ 都含于 $(y_0 - \beta, y_0 + \beta)$ 内. 由于

$$F(x, y) = 0, F(x + \Delta x, y + \Delta y) = 0,$$

因此由 F_x, F_y 的连续性以及二元函数中值定理, 有

$$0 = F(x + \Delta x, y + \Delta y) - F(x, y) = F_x(x + \theta \Delta x, y + \theta \Delta y) \Delta x + F_y(x + \theta \Delta x, y + \theta \Delta y) \Delta y,$$

其中 $0 < \theta < 1$. 因而

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = -\frac{F_x(x + \theta\Delta x, y + \theta\Delta y)}{F_y(x + \theta\Delta x, y + \theta\Delta y)}.$$

注意到上式右端是连续函数 $F_x(x, y), F_y(x, y)$ 与 $f(x)$ 的复合函数, 而且 $F_y(x, y)$ 在 $U(P_0)$ 上不等于零, 故有

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = -\frac{F_x(x, y)}{F_y(x, y)}.$$

且 $f'(x)$ 在 $(x_0 - \alpha, x_0 + \alpha)$ 上连续. □

定理 11.5

若

- (i) 函数 $F(x_1, x_2, \dots, x_n, y)$ 在以点 $P_0(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0, y^0)$ 为内点的区域 $D \subseteq \mathbf{R}^{n+1}$ 上连续;
- (ii) $F(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0, y^0) = 0$;
- (iii) 偏导数 $F_{x_1}, F_{x_2}, \dots, F_{x_n}, F_y$ 在 D 上存在且连续;
- (iv) $F_y(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0, y^0) \neq 0$.

则

1° 存在点 P_0 的某邻域 $U(P_0) \subseteq D$, 在 $U(P_0)$ 上方程 $F(x_1, \dots, x_n, y) = 0$ 惟一地确定了一个定义在 $Q_0(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ 的某邻域 $U(Q_0) \subseteq \mathbf{R}^n$ 上的 n 元连续函数 (隐函数) $y = f(x_1, \dots, x_n)$, 使得当 $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in U(Q_0)$ 时,

$$(x_1, x_2, \dots, x_n, f(x_1, x_2, \dots, x_n)) \in U(P_0),$$

且

$$F(x_1, \dots, x_n, f(x_1, \dots, x_n)) \equiv 0,$$

$$y^0 = f(x_1^0, \dots, x_n^0);$$

2° $y = f(x_1, \dots, x_n)$ 在 $U(Q_0)$ 上有连续偏导数 $f_{x_1}, f_{x_2}, \dots, f_{x_n}$, 而且

$$f_{x_1} = -\frac{F_{x_1}}{F_y}, f_{x_2} = -\frac{F_{x_2}}{F_y}, \dots, f_{x_n} = -\frac{F_{x_n}}{F_y}.$$



定理 11.6 (反函数的存在性及其导数)

设 $y = f(x)$ 在 x_0 的某邻域上有连续的导函数 $f'(x)$, 且 $f(x_0) = y_0$, 则在 y_0 的某邻域 $U(y_0)$ 上的连续可微隐函数 $x = g(y)$, 并称它为函数 $y = f(x)$ 的反函数. 反函数的导数是

$$g'(y) = -\frac{F_y}{F_x} = -\frac{1}{-f'(x)} = \frac{1}{f'(x)}.$$



证明 考虑方程

$$F(x, y) = y - f(x) = 0. \quad (11.2)$$

由于

$$F(x_0, y_0) = 0, F_y = 1, F_x(x_0, y_0) = -f'(x_0),$$

所以只要 $f'(x_0) \neq 0$, 就能满足 **隐函数存在唯一性定理** 的所有条件, 这时方程(11.2)能确定出在 y_0 的某邻域 $U(y_0)$ 上的连续可微隐函数 $x = g(y)$. 再由 **隐函数可微性定理** 可得

$$g'(y) = -\frac{F_y}{F_x} = -\frac{1}{-f'(x)} = \frac{1}{f'(x)}.$$



11.2.1 隐函数组

定义 11.3

设有方程组

$$\begin{cases} F(x, y, u, v) = 0, \\ G(x, y, u, v) = 0, \end{cases}$$

其中 $F(x, y, u, v), G(x, y, u, v)$ 为定义在 $V \subseteq \mathbf{R}^4$ 上的 4 元函数. 若存在平面区域 $D, E \subseteq \mathbf{R}^2$, 对于 D 中每一点 (x, y) , 有惟一的 $(u, v) \in E$, 使得 $(x, y, u, v) \in V$, 且满足方程组(12.11), 则称由方程组(12.11)确定了**隐函数组**

$$\begin{cases} u = f(x, y), \\ v = g(x, y), \end{cases} \quad (x, y) \in D, \quad (u, v) \in E,$$

并在 D 上成立恒等式

$$\begin{cases} F(x, y, f(x, y), g(x, y)) \equiv 0, \\ G(x, y, f(x, y), g(x, y)) \equiv 0, \end{cases} \quad (x, y) \in D.$$

若还有(12.11)中的函数 F 与 G 是可微的, 而且由(12.11)所确定的两个隐函数 u 与 v 也是可微的, 则称

$$\begin{vmatrix} F_u & F_v \\ G_u & G_v \end{vmatrix}$$

为函数 F, G 关于变量 u, v 的**函数行列式** (或**雅可比 (Jacobi) 行列式**), 亦可记作 $\frac{\partial(F, G)}{\partial(u, v)}$.



注 若(12.11)中的函数 F 与 G 是可微的, 而且由(12.11)所确定的两个隐函数 u 与 v 也是可微的. 那么通过对方程组(12.11)关于 x, y 分别求偏导数, 得到

$$\begin{cases} F_x + F_u u_x + F_v v_x = 0, \\ G_x + G_u u_x + G_v v_x = 0, \end{cases} \quad (11.3)$$

$$\begin{cases} F_y + F_u u_y + F_v v_y = 0, \\ G_y + G_u u_y + G_v v_y = 0. \end{cases} \quad (11.4)$$

要想从(11.3)解出 u_x 与 v_x , 从(11.4)解出 u_y 与 v_y , 其充分条件是它们的系数行列式不为零, 即

$$\frac{\partial(F, G)}{\partial(u, v)} = \begin{vmatrix} F_u & F_v \\ G_u & G_v \end{vmatrix} \neq 0.$$

定理 11.7

若

- (i) $F(x, y, u, v)$ 与 $G(x, y, u, v)$ 在以点 $P_0(x_0, y_0, u_0, v_0)$ 为内点的区域 $V \subseteq \mathbf{R}^4$ 上连续;
- (ii) $F(x_0, y_0, u_0, v_0) = 0, G(x_0, y_0, u_0, v_0) = 0$ (初始条件);
- (iii) 在 V 上 F, G 具有一阶连续偏导数;
- (iv) $J = \frac{\partial(F, G)}{\partial(u, v)}$ 在点 P_0 不等于零.

则

1° 存在点 P_0 的某一 (四维空间) 邻域 $U(P_0) \subseteq V$, 在 $U(P_0)$ 上方程组(12.11)惟一地确定了定义在点 $Q_0(x_0, y_0)$ 的某一 (二维空间) 邻域 $U(Q_0)$ 上的两个二元隐函数

$$u = f(x, y), \quad v = g(x, y),$$

使得 $u_0 = f(x_0, y_0), v_0 = g(x_0, y_0)$, 且当 $(x, y) \in U(Q_0)$ 时,

$$(x, y, f(x, y), g(x, y)) \in U(P_0),$$

$$F(x, y, f(x, y), g(x, y)) \equiv 0,$$

$$G(x, y, f(x, y), g(x, y)) \equiv 0;$$

2° $f(x, y), g(x, y)$ 在 $U(Q_0)$ 上连续;

3° $f(x, y), g(x, y)$ 在 $U(Q_0)$ 上有一阶连续偏导数, 且

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= -\frac{1}{J} \frac{\partial(F, G)}{\partial(x, v)}, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{J} \frac{\partial(F, G)}{\partial(u, x)}, \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{J} \frac{\partial(F, G)}{\partial(y, v)}, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{J} \frac{\partial(F, G)}{\partial(u, y)}. \end{aligned} \quad (11.5)$$



定义 11.4

设函数组

$$u = u(x, y), \quad v = v(x, y) \quad (11.6)$$

是定义在 xy 平面上的两个函数, 对每一点 $P(x, y) \in B$, 由方程组(11.6)有 uv 平面上唯一的一点 $Q(u, v) \in \mathbf{R}^2$ 与之对应. 我们称方程组(11.6)确定了 B 到 \mathbf{R}^2 的一个映射(变换), 记作 T . 这时映射(11.6)可写成如下函数形式:

$$T : B \rightarrow \mathbf{R}^2,$$

$$P(x, y) \mapsto Q(u, v)$$

或写成点函数形式 $Q = T(P), P \in B$, 并称 $Q(u, v)$ 为映射 T 下 $P(x, y)$ 的象, 而 P 则是 Q 的原象. 记 B 在映射 T 下的象集为 $B' = T(B)$.

反过来, 若 T 为一一映射(即不仅每一原象只对应一个象, 而且不同的原象对应不同的象). 这时每一点 $Q \in B'$, 由方程组(11.6)都有唯一的一点 $P \in B$ 与之相对应. 由此所产生的新映射称为映射 T 的逆映射(逆变换), 记作 T^{-1} , 即

$$T^{-1} : B' \rightarrow B,$$

$$Q \mapsto P$$

或

$$P = T^{-1}(Q), Q \in B'.$$

亦即存在定义在 B' 上的一个函数组

$$x = x(u, v), \quad y = y(u, v), \quad (11.7)$$

把它代入(11.6)而成为恒等式:

$$u \equiv u(x(u, v), y(u, v)), \quad v \equiv v(x(u, v), y(u, v)), \quad (11.8)$$

这时我们又称函数组(11.7)是函数组(11.6)的反函数组.



定理 11.8

设函数组

$$u = u(x, y), \quad v = v(x, y) \quad (11.9)$$

及其一阶偏导数在某区域 $D \subseteq \mathbf{R}^2$ 上连续, 点 $P_0(x_0, y_0)$ 是 D 的内点, 且

$$u_0 = u(x_0, y_0), \quad v_0 = v(x_0, y_0), \quad \left. \frac{\partial(u, v)}{\partial(x, y)} \right|_{P_0} \neq 0,$$

则在点 $P'_0(u_0, v_0)$ 的某一邻域 $U(P'_0)$ 上存在唯一的一组反函数

$$x = x(u, v), \quad y = y(u, v), \quad (11.10)$$

使得 $x_0 = x(u_0, v_0), y_0 = y(u_0, v_0)$, 且当 $(u, v) \in U(P'_0)$ 时, 有

$$(x(u, v), y(u, v)) \in U(P_0)$$

以及恒等式

$$u \equiv u(x(u, v), y(u, v)), \quad v \equiv v(x(u, v), y(u, v)).$$

此外, 反函数组(11.10)在 $U(P'_0)$ 上存在连续的一阶偏导数, 且

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial u} &= \frac{\partial v}{\partial y} / \frac{\partial(u, v)}{\partial(x, y)}, \quad \frac{\partial x}{\partial v} = -\frac{\partial u}{\partial y} / \frac{\partial(u, v)}{\partial(x, y)}, \\ \frac{\partial y}{\partial u} &= -\frac{\partial v}{\partial x} / \frac{\partial(u, v)}{\partial(x, y)}, \quad \frac{\partial y}{\partial v} = \frac{\partial u}{\partial x} / \frac{\partial(u, v)}{\partial(x, y)}. \end{aligned}$$

由上式看到: 互为反函数组的(11.9)与(11.10), 它们的雅可比行列式互为倒数, 即

$$\frac{\partial(u, v)}{\partial(x, y)} \cdot \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = 1.$$



第 12 章 曲线积分和重积分

12.1 第一型曲线积分

定义 12.1

设 L 为平面上可求长度的曲线段, $f(x, y)$ 为定义在 L 上的函数. 对曲线 L 作分割 T , 它把 L 分成 n 个可求长度的小曲线段 L_i ($i = 1, 2, \dots, n$), L_i 的弧长记为 Δs_i , 分割 T 的细度为 $\|T\| = \max_{1 \leq i \leq n} \Delta s_i$, 在 L_i 上任取一点 (ξ_i, η_i) ($i = 1, 2, \dots, n$). 若有极限

$$\lim_{\|T\| \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(\xi_i, \eta_i) \Delta s_i = J,$$

且 J 的值与分割 T 和点 (ξ_i, η_i) 的取法无关, 则称此极限为 $f(x, y)$ 在 L 上的第一型曲线积分, 记作

$$\int_L f(x, y) ds.$$

若 L 为空间可求长曲线段, $f(x, y, z)$ 为定义在 L 上的函数, 则可类似地定义 $f(x, y, z)$ 在空间曲线 L 上的第一型曲线积分, 并且记作

$$\int_L f(x, y, z) ds.$$



注 第一型曲线积分的几何意义: 若 L 为平面 Oxy 上分段光滑曲线, $f(x, y)$ 为定义在 L 上非负连续函数. 由第一型曲面积分的定义, 以 L 为准线, 母线平行于 z 轴的柱面上截取 $0 \leq z \leq f(x, y)$ 的部分面积就是 $\int_L f(x, y) ds$.

定理 12.1

(1) 若 $\int_L f_i(x, y) ds$ ($i = 1, 2, \dots, k$) 存在, c_i ($i = 1, 2, \dots, k$) 为常数, 则 $\int_L \sum_{i=1}^k c_i f_i(x, y) ds$ 也存在, 且

$$\int_L \sum_{i=1}^k c_i f_i(x, y) ds = \sum_{i=1}^k c_i \int_L f_i(x, y) ds.$$

(2) 若曲线段 L 由曲线 L_1, L_2, \dots, L_k 首尾相接而成, 且 $\int_{L_i} f(x, y) ds$ ($i = 1, 2, \dots, k$) 都存在, 则 $\int_L f(x, y) ds$ 也存在, 且

$$\int_L f(x, y) ds = \sum_{i=1}^k \int_{L_i} f(x, y) ds.$$

(3) 若 $\int_L f(x, y) ds$ 与 $\int_L g(x, y) ds$ 都存在, 且在 L 上 $f(x, y) \leq g(x, y)$, 则

$$\int_L f(x, y) ds \leq \int_L g(x, y) ds.$$

(4) 若 $\int_L f(x, y) ds$ 存在, 则 $\int_L |f(x, y)| ds$ 也存在, 且

$$\left| \int_L f(x, y) ds \right| \leq \int_L |f(x, y)| ds.$$

(5) 若 $\int_L f(x, y) ds$ 存在, L 的弧长为 s , 则存在常数 c , 使得

$$\int_L f(x, y) ds = cs,$$

这里 $\inf_L f(x, y) \leq c \leq \sup_L f(x, y)$.



证明



定理 12.2

设有光滑曲线

$$L : \begin{cases} x = \varphi(t), \\ y = \psi(t), \end{cases} \quad t \in [\alpha, \beta],$$

函数 $f(x, y)$ 为定义在 L 上的连续函数, 则

$$\int_L f(x, y) ds = \int_{\alpha}^{\beta} f(\varphi(t), \psi(t)) \sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t)} dt. \quad (12.1)$$

特别地, 当曲线 L 由方程

$$y = \psi(x), \quad x \in [a, b]$$

表示, 且 $\psi(x)$ 在 $[a, b]$ 上有连续的导函数时, (12.1) 式成为

$$\int_L f(x, y) ds = \int_a^b f(x, \psi(x)) \sqrt{1 + \psi'^2(x)} dx;$$

当曲线 L 由方程

$$x = \varphi(y), \quad y \in [c, d]$$

表示, 且 $\varphi(y)$ 在 $[c, d]$ 上有连续导函数时, (12.1) 式成为

$$\int_L f(x, y) ds = \int_c^d f(\varphi(y), y) \sqrt{1 + \varphi'^2(y)} dy.$$



证明 由弧长公式知道, L 上由 $t = t_{i-1}$ 到 $t = t_i$ 的弧长

$$\Delta s_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t)} dt.$$

由 $\sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t)}$ 的连续性与积分中值定理, 有

$$\Delta s_i = \sqrt{\varphi'^2(\tau'_i) + \psi'^2(\tau'_i)} \Delta t_i \quad (t_{i-1} < \tau'_i < t_i).$$

所以

$$\sum_{i=1}^n f(\xi_i, \eta_i) \Delta s_i = \sum_{i=1}^n f(\varphi(\tau''_i), \psi(\tau''_i)) \sqrt{\varphi'^2(\tau'_i) + \psi'^2(\tau'_i)} \Delta t_i,$$

这里 $t_{i-1} \leq \tau'_i, \tau''_i \leq t_i$. 设

$$\sigma = \sum_{i=1}^n f(\varphi(\tau''_i), \psi(\tau''_i)) \left[\sqrt{\varphi'^2(\tau'_i) + \psi'^2(\tau'_i)} - \sqrt{\varphi'^2(\tau''_i) + \psi'^2(\tau''_i)} \right] \Delta t_i,$$

则有

$$\sum_{i=1}^n f(\xi_i, \eta_i) \Delta s_i = \sum_{i=1}^n f(\varphi(\tau''_i), \psi(\tau''_i)) \sqrt{\varphi'^2(\tau''_i) + \psi'^2(\tau''_i)} \Delta t_i + \sigma. \quad (12.2)$$

令 $\Delta t = \max\{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n\}$, 则当 $\|T\| \rightarrow 0$ 时, 必有 $\Delta t \rightarrow 0$. 现在证明 $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sigma = 0$.

因为复合函数 $f(\varphi(t), \psi(t))$ 关于 t 连续, 所以在闭区间 $[\alpha, \beta]$ 上有界, 即存在常数 M , 使对一切 $t \in [\alpha, \beta]$, 都有

$$|f(\varphi(t), \psi(t))| \leq M.$$

再由 $\sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t)}$ 在 $[\alpha, \beta]$ 上连续, 所以它在 $[\alpha, \beta]$ 上一致连续, 即对任给的 $\varepsilon > 0$, 必存在 $\delta > 0$, 使当 $\Delta t < \delta$

时有

$$\left| \sqrt{\varphi'^2(\tau_i'') + \psi'^2(\tau_i'')} - \sqrt{\varphi'^2(\tau_i') + \psi'^2(\tau_i')} \right| < \varepsilon,$$

从而

$$|\sigma| \leq \varepsilon M \sum_{i=1}^n \Delta t_i = \varepsilon M(\beta - \alpha),$$

所以

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sigma = 0.$$

再由定积分定义,

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(\varphi(\tau_i''), \psi(\tau_i'')) \sqrt{\varphi'^2(\tau_i'') + \psi'^2(\tau_i'')} \Delta t_i = \int_{\alpha}^{\beta} f(\varphi(t), \psi(t)) \sqrt{\varphi'^2(t) + \psi'^2(t)} dt.$$

因此当在(12.2)式两边取极限后, 即得所要证的(12.1)式.

□

12.2 第二型曲线积分

定义 12.2

设函数 $P(x, y)$ 与 $Q(x, y)$ 定义在平面有向可求长度曲线 $L: \widehat{AB}$ 上. 对 L 的任一分割 T , 它把 L 分成 n 个小弧段

$$\widehat{M_{i-1}M_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

其中 $M_0 = A, M_n = B$. 记各小弧段 $\widehat{M_{i-1}M_i}$ 的弧长为 Δs_i , 分割 T 的细度 $\|T\| = \max_{1 \leq i \leq n} \Delta s_i$. 又设 T 的分点 M_i 的坐标为 (x_i, y_i) , 并记 $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}, \Delta y_i = y_i - y_{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots, n$). 在每个小弧段 $\widehat{M_{i-1}M_i}$ 上任取一点 (ξ_i, η_i) , 若极限

$$\lim_{\|T\| \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n P(\xi_i, \eta_i) \Delta x_i + \lim_{\|T\| \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n Q(\xi_i, \eta_i) \Delta y_i$$

存在且与分割 T 和点 (ξ_i, η_i) 的取法无关, 则称此极限为函数 $P(x, y), Q(x, y)$ 沿有向曲线 L 上的第二型曲线积分, 记为

$$\int_L P(x, y) dx + Q(x, y) dy \quad \text{或} \quad \int_{\widehat{AB}} P(x, y) dx + Q(x, y) dy. \quad (12.3)$$

上述积分(12.3)也可写作

$$\int_L P(x, y) dx + \int_L Q(x, y) dy$$

或

$$\int_{\widehat{AB}} P(x, y) dx + \int_{\widehat{AB}} Q(x, y) dy.$$

为书写简洁起见,(12.3)式常简写成

$$\int_L P dx + Q dy \quad \text{或} \quad \int_{\widehat{AB}} P dx + Q dy.$$

若 L 为封闭的有向曲线, 则记为

$$\oint_L P dx + Q dy.$$

若记 $\mathbf{F}(x, y) = (P(x, y), Q(x, y))$, $ds = (dx, dy)$, 则(12.3)式可写成向量形式

$$\int_L \mathbf{F} \cdot ds \quad \text{或} \quad \int_{\widehat{AB}} \mathbf{F} \cdot ds.$$

◆

定义 12.3

倘若 L 为空间有向可求长度曲线, $P(x, y, z), Q(x, y, z), R(x, y, z)$ 为定义在 L 上的函数, 则可按**定义 12.2**类似地定义沿空间有向曲线 L 上的**第二型曲线积分**, 并记为

$$\int_L P(x, y, z)dx + Q(x, y, z)dy + R(x, y, z)dz, \quad (12.4)$$

或简写成

$$\int_L Pdx + Qdy + Rdz.$$

当把 $\mathbf{F}(x, y, z) = (P(x, y, z), Q(x, y, z), R(x, y, z))$ 与 $ds = (dx, dy, dz)$ 看作三维向量时, (12.4) 式也可表示成向量形式

$$\int_L \mathbf{F} \cdot ds.$$

定理 12.3

(1) 若 $\int_{\widehat{AB}} Pdx + Qdy$ 存在, 则

$$\int_{\widehat{AB}} Pdx + Qdy = - \int_{\widehat{BA}} Pdx + Qdy.$$

(2) 若 $\int_L P_i dx + Q_i dy$ ($i = 1, 2, \dots, k$) 存在, 则 $\int_L \left(\sum_{i=1}^k c_i P_i \right) dx + \left(\sum_{i=1}^k c_i Q_i \right) dy$ 也存在, 且

$$\int_L \left(\sum_{i=1}^k c_i P_i \right) dx + \left(\sum_{i=1}^k c_i Q_i \right) dy = \sum_{i=1}^k c_i \left(\int_L P_i dx + Q_i dy \right),$$

其中 c_i ($i = 1, 2, \dots, k$) 为常数.

(3) 若有向曲线 L 是由有向曲线 L_1, L_2, \dots, L_k 首尾相接而成, 且 $\int_{L_i} Pdx + Qdy$ ($i = 1, 2, \dots, k$) 存在, 则

$\int_L Pdx + Qdy$ 也存在, 且

$$\int_L Pdx + Qdy = \sum_{i=1}^k \int_{L_i} Pdx + Qdy.$$

**证明**

□

定理 12.4

(1) 设平面曲线

$$L : \begin{cases} x = \varphi(t), \\ y = \psi(t), \end{cases} \quad t \in [\alpha, \beta],$$

其中 $\varphi(t), \psi(t)$ 在 $[\alpha, \beta]$ 上具有一阶连续导函数, 且点 A 与 B 的坐标分别为 $(\varphi(\alpha), \psi(\alpha))$ 与 $(\varphi(\beta), \psi(\beta))$.

又设 $P(x, y)$ 与 $Q(x, y)$ 为 L 上的连续函数, 则沿 L 从 A 到 B 的第二型曲线积分

$$\int_L P(x, y)dx + Q(x, y)dy = \int_{\alpha}^{\beta} [P(\varphi(t), \psi(t))\varphi'(t) + Q(\varphi(t), \psi(t))\psi'(t)] dt. \quad (12.5)$$

(2) 设空间有向光滑曲线 L 的参量方程为

$$\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t), \\ z = z(t), \end{cases} \quad \alpha \leq t \leq \beta,$$

起点为 $(x(\alpha), y(\alpha), z(\alpha))$, 终点为 $(x(\beta), y(\beta), z(\beta))$, 则

$$\int_L Pdx + Qdy + Rdz = \int_{\alpha}^{\beta} [P(x(t), y(t), z(t))x'(t) + Q(x(t), y(t), z(t))y'(t) + R(x(t), y(t), z(t))z'(t)] dt.$$

这里要注意曲线方向与积分上下限的确定应该一致.



证明



定理 12.5 (两类曲线积分的联系)

设 L 为从 A 到 B 的有向光滑曲线, 它以弧长 s 为参数, 于是

$$L : \begin{cases} x = x(s), \\ y = y(s), \end{cases} \quad 0 \leq s \leq l,$$

其中 l 为曲线 L 的全长, 且点 A 与 B 的坐标分别为 $(x(0), y(0))$ 与 $(x(l), y(l))$. 曲线 L 上每一点的切线方向指向弧长增加的一方. 现以 $(\widehat{t, x}), (\widehat{t, y})$ 分别表示切线方向 t 与 x 轴和 y 轴正向的夹角, 则在曲线上的每一点的切线方向余弦是

$$\frac{dx}{ds} = \cos(\widehat{t, x}), \quad \frac{dy}{ds} = \cos(\widehat{t, y}). \quad (12.6)$$

若 $P(x, y), Q(x, y)$ 为曲线 L 上的连续函数, 则由(12.5)式得

$$\begin{aligned} \int_L Pdx + Qdy &= \int_0^l [P(x(s), y(s)) \cos(\widehat{t, x}) + Q(x(s), y(s)) \cos(\widehat{t, y})] ds \\ &= \int_L [P(x, y) \cos(\widehat{t, x}) + Q(x, y) \cos(\widehat{t, y})] ds, \end{aligned} \quad (12.7)$$

这里必须指出, 当(12.7)式左边第二型曲线积分中 L 改变方向时, 积分值改变符号, 相应在(12.7)式右边第一型曲线积分中, 曲线上各点的切线方向指向相反的方向(即指向弧长减少的方向). 这时夹角 $(\widehat{t, x})$ 和 $(\widehat{t, y})$ 分别与原来的夹角相差一个弧度 π , 从而 $\cos(\widehat{t, x})$ 和 $\cos(\widehat{t, y})$ 都要变号. 因此, 一旦方向确定了, 公式(12.7)总是成立的.

类似讨论可以得到

$$\int_L Pdx + Qdy + Rdz = \int_L [P(x, y, z) \cos(\widehat{t, x}) + Q(x, y, z) \cos(\widehat{t, y}) + R(x, y, z) \cos(\widehat{t, z})] ds,$$

其中 P, Q, R 为空间有向曲线 L 上的连续函数, $(\cos(\widehat{t, x}), \cos(\widehat{t, y}), \cos(\widehat{t, z}))$ 为曲线 L 正切向的方向余弦.



证明



12.3 二重积分

12.3.1 二重积分的定义及其存在性

定义 12.4

我们称一个平面图形 P 是有界的或平面有界图形, 是指构成这个平面图形的点集是平面上的有界点集, 即存在一矩形 R , 使得 $P \subset R$.

设 P 是一平面有界图形, 用某一平行于坐标轴的一组直线网 T 分割这个图形(图 12.1). 这时直线网 T 的网眼——小闭矩形 Δ_i 可分为三类:

- (i) Δ_i 上的点都是 P 的内点,
- (ii) Δ_i 上的点都是 P 的外点,

(iii) Δ_i 上含有 P 的边界点.

我们将所有属于直线网 T 的第 (i) 类小矩形 (图 12.1 中阴影部分) 的面积加起来, 记这个和数为 $s_P(T)$, 则有 $s_P(T) \leq \Delta_R$ (这里 Δ_R 表示包含 P 的那个矩形 R 的面积); 将所有第 (i) 类与第 (iii) 类小矩形 (图 12.1 中含有粗线的小矩形) 的面积加起来, 记这个和数为 $S_P(T)$, 则有 $s_P(T) \leq S_P(T)$.

由确界存在定理可以推得, 对于平面上所有直线网, 数集 $\{s_P(T)\}$ 有上确界, 数集 $\{S_P(T)\}$ 有下确界, 记

$$\underline{I}_P = \sup_T \{s_P(T)\}, \quad \bar{I}_P = \inf_T \{S_P(T)\}.$$

显然有

$$0 \leq \underline{I}_P \leq \bar{I}_P.$$

通常称 \underline{I}_P 为 P 的内面积, \bar{I}_P 为 P 的外面积.

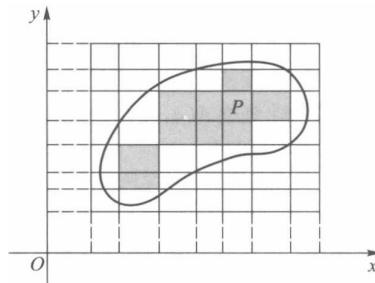


图 12.1

定义 12.5

若平面有界图形 P 的内面积 \underline{I}_P 等于它的外面积 \bar{I}_P , 则称 P 为可求面积, 并称其共同值 $I_P = \underline{I}_P = \bar{I}_P$ 为 P 的面积.

定理 12.6

平面有界图形 P 可求面积的充要条件是: 对任给的 $\varepsilon > 0$, 总存在直线网 T , 使得

$$S_P(T) - s_P(T) < \varepsilon. \quad (12.8)$$



证明 必要性: 设平面有界图形 P 的面积为 I_P . 由定义 1, 有 $I_P = \underline{I}_P = \bar{I}_P$. 对任给的 $\varepsilon > 0$, 由 \underline{I}_P 及 \bar{I}_P 的定义知道, 分别存在直线网 T_1 与 T_2 , 使得

$$s_P(T_1) > I_P - \frac{\varepsilon}{2}, \quad S_P(T_2) < I_P + \frac{\varepsilon}{2}. \quad (12.9)$$

记 T 为由 T_1 与 T_2 这两个直线网合并而成的直线网, 可证得

$$s_P(T_1) \leq s_P(T), \quad S_P(T_2) \geq S_P(T).$$

于是由(12.9)可得

$$s_P(T) > I_P - \frac{\varepsilon}{2}, \quad S_P(T) < I_P + \frac{\varepsilon}{2}.$$

从而得到对直线网 T 有 $S_P(T) - s_P(T) < \varepsilon$.

充分性: 设对任给的 $\varepsilon > 0$, 存在某直线网 T , 使得(12.8)式成立. 但

$$s_P(T) \leq \underline{I}_P \leq \bar{I}_P \leq S_P(T).$$

所以

$$\bar{I}_P - \underline{I}_P \leq S_P(T) - s_P(T) < \varepsilon.$$

由 ε 的任意性可得 $\underline{I}_P = \bar{I}_P$, 因而平面图形 P 可求面积.

□

推论 12.1

平面有界图形 P 的面积为零的充要条件是它的外面积 $\bar{I}_P = 0$, 即对任给的 $\varepsilon > 0$, 存在直线网 T , 使得

$$S_P(T) < \varepsilon,$$

或对任给的 $\varepsilon > 0$, 平面图形 P 能被有限个其面积总和小于 ε 的小矩形所覆盖.

♡

定理 12.7

平面有界图形 P 可求面积的充要条件是: P 的边界 K 的面积为零.

♡

证明 由定理 12.6, P 可求面积的充要条件是: 对任给的 $\varepsilon > 0$, 存在直线网 T , 使得 $S_P(T) - s_P(T) < \varepsilon$. 由于

$$S_K(T) = S_P(T) - s_P(T),$$

所以也有 $S_K(T) < \varepsilon$. 由推论 12.1, P 的边界 K 的面积为零.

□

定理 12.8

若曲线 K 为定义在 $[a, b]$ 上的连续函数 $f(x)$ 的图像, 则曲线 K 的面积为零.

♡

证明 由于 $f(x)$ 在闭区间 $[a, b]$ 上连续, 所以它在 $[a, b]$ 上一致连续. 因而对任给的 $\varepsilon > 0$, 总存在 $\delta > 0$, 当把区间 $[a, b]$ 分成 n 个小区间 $[x_{i-1}, x_i]$ ($i = 1, 2, \dots, n, x_0 = a, x_n = b$) 并且满足

$$\max\{\Delta x_i = x_i - x_{i-1} \mid i = 1, 2, \dots, n\} < \delta$$

时, 可使 $f(x)$ 在每个小区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 上的振幅都成立 $\omega_i < \frac{\varepsilon}{b-a}$. 现把曲线 K 按自变量 $x = x_0, x_1, \dots, x_n$ 分成 n 个小段, 这时每一个小段都能被以 Δx_i 为宽, ω_i 为高的小矩形所覆盖. 由于这 n 个小矩形面积的总和为

$$\sum_{i=1}^n \omega_i \Delta x_i < \frac{\varepsilon}{b-a} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \varepsilon,$$

所以由推论 12.1 即得曲线 K 的面积为零.

□

推论 12.2

参数方程 $x = \varphi(t), y = \psi(t), t \in [\alpha, \beta]$ 所表示的光滑曲线 (或按段光滑曲线) K 的面积为零.

♡

证明 由光滑曲线的定义, $\varphi'(t), \psi'(t)$ 在 $[\alpha, \beta]$ 上连续且不同时为零. 对任意 $t_0 \in [\alpha, \beta]$, 不妨设 $\varphi'(t_0) \neq 0$, 于是存在 t_0 的邻域 $U(t_0)$, 使得 $x = \varphi(t)$ 在此邻域上严格单调, 从而存在反函数 $t = \varphi^{-1}(x)$. 再由有限覆盖定理可把 $[\alpha, \beta]$ 分成有限段: $\alpha = t_0 < t_1 < \dots < t_n = \beta$, 在每一小区间段上, $y = \psi(\varphi^{-1}(x))$ 或 $x = \varphi(\psi^{-1}(y))$. 由定理 12.8, 每一小段的曲线面积为零, 因此整条曲线面积为零.

□

推论 12.3

由平面上分段光滑曲线所围成的有界闭区域是可求面积的.

♡

注 并非平面中所有的点集都是可求面积的. 例如

$$D = \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{Q} \cap [0, 1]\}.$$

易知 $0 = \underline{I}_D < \bar{I}_D = 1, D$ 是不可求面积的.

定义 12.6

设 D 为 xy 平面上可求面积的有界闭区域, $f(x, y)$ 为定义在 D 上的函数. 用任意的曲线把 D 分成 n 个可求面积的小区域

$$\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n.$$

以 $\Delta\sigma_i$ 表示小区域 σ_i 的面积, 这些小区域构成 D 的一个 **分割** T , 以 d_i 表示小区域 σ_i 的直径, 称 $\|T\| = \max_{1 \leq i \leq n} d_i$ 为分割 T 的 **细度**. 在每个 σ_i 上任取一点 (ξ_i, η_i) , 作和式

$$\sum_{i=1}^n f(\xi_i, \eta_i) \Delta\sigma_i.$$

称它为函数 $f(x, y)$ 在 D 上属于分割 T 的一个 **积分和**, (ξ_i, η_i) 称为 **介点**.

**定义 12.7**

设 $f(x, y)$ 是定义在可求面积的有界闭区域 D 上的函数. J 是一个确定的数, 若对任给的正数 ε , 总存在某个正数 δ , 使对于 D 的任何分割 T , 当它的细度 $\|T\| < \delta$ 时, 属于 T 的所有积分和都有

$$\left| \sum_{i=1}^n f(\xi_i, \eta_i) \Delta\sigma_i - J \right| < \varepsilon, \quad (12.10)$$

则称 $f(x, y)$ 在 D 上可积, 数 J 称为函数 $f(x, y)$ 在 D 上的 **二重积分**, 记作

$$J = \iint_D f(x, y) d\sigma,$$

其中 $f(x, y)$ 称为二重积分的 **被积函数**, x, y 称为 **积分变量**, D 称为 **积分区域**.

若选用平行于坐标轴的直线网 T_1 来分割 D , 只要当 $\|T_1\| < \delta$ 时, (12.10) 式都成立, 则每一小网眼区域 σ 的面积 $\Delta\sigma = \Delta x \Delta y$. 此时通常把 $\iint_D f(x, y) d\sigma$ 记作

$$\iint_D f(x, y) dx dy.$$



注 当 $f(x, y) \geq 0$ 时, 二重积分 $\iint_D f(x, y) d\sigma$ 在几何上就表示以 $z = f(x, y)$ 为曲顶, D 为底的曲顶柱体的体积. 当 $f(x, y) = 1$ 时, 二重积分 $\iint_D f(x, y) d\sigma$ 的值就等于积分区域 D 的面积.

定理 12.9

函数 $f(x, y)$ 在有界、可求面积区域 D 上可积的必要条件是它在 D 上有界.

**证明****定义 12.8**

设函数 $f(x, y)$ 在 D 上有界, T 为 D 的一个分割, 它把 D 分成 n 个可求面积的小区域 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$. 令

$$M_i = \sup_{(x, y) \in \sigma_i} f(x, y), \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

$$m_i = \inf_{(x, y) \in \sigma_i} f(x, y)$$

作和式 $S(T) = \sum_{i=1}^n M_i \Delta\sigma_i$, $s(T) = \sum_{i=1}^n m_i \Delta\sigma_i$. 它们分别称为函数 $f(x, y)$ 关于分割 T 的 **上和与下和**.



定理 12.10

$f(x, y)$ 在 D 上可积的充要条件是:

$$\lim_{\|T\| \rightarrow 0} S(T) = \lim_{\|T\| \rightarrow 0} s(T).$$

定理 12.11

$f(x, y)$ 在 D 上可积的充要条件是: 对于任给的正数 ε , 存在 D 的某个分割 T , 使得 $S(T) - s(T) < \varepsilon$.

定理 12.12

有界闭区域 D 上的连续函数必可积.

定理 12.13

设 $f(x, y)$ 在有界闭域 D 上有界, 且其不连续点集 E 是零面积集, 则 $f(x, y)$ 在 D 上可积.

证明 对任意 $\varepsilon > 0$, 存在有限个矩形(不含边界)覆盖了 E , 而这些矩形面积之和小于 ε . 记这些矩形之并集为 K , 则 $D \setminus K$ 是有界闭域(也可能是有限多个不交的有界闭域的并集). 设 $K \cap D$ 的面积为 Δ_K , 则 $\Delta_K < \varepsilon$. 由于 $f(x, y)$ 在 $D \setminus K$ 上连续, 因此由定理 12.11 和定理 12.12, 存在 $D \setminus K$ 上的分割 $T_1 = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$, 使得 $S(T_1) - s(T_1) < \varepsilon$. 令 $T = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n, K \cap D\}$, 则 T 是 D 的一个分割. 且

$$S(T) - s(T) = S(T_1) - s(T_1) + \omega_K \Delta_K < \varepsilon + \omega \varepsilon,$$

其中 ω_K 是 $f(x, y)$ 在 $K \cap D$ 上的振幅, ω 是 $f(x, y)$ 在 D 上的振幅. 由定理 12.11, $f(x, y)$ 在 D 上可积. □

定理 12.14

(1) 若 $f(x, y)$ 在区域 D 上可积, k 为常数, 则 $k f(x, y)$ 在 D 上也可积, 且

$$\iint_D k f(x, y) d\sigma = k \iint_D f(x, y) d\sigma.$$

(2) 若 $f(x, y), g(x, y)$ 在 D 上都可积, 则 $f(x, y) \pm g(x, y)$ 在 D 上也可积, 且

$$\iint_D [f(x, y) \pm g(x, y)] d\sigma = \iint_D f(x, y) d\sigma \pm \iint_D g(x, y) d\sigma.$$

(3) 若 $f(x, y)$ 在 D_1 和 D_2 上都可积, 且 D_1 与 D_2 无公共内点, 则 $f(x, y)$ 在 $D_1 \cup D_2$ 上也可积, 且

$$\iint_{D_1 \cup D_2} f(x, y) d\sigma = \iint_{D_1} f(x, y) d\sigma + \iint_{D_2} f(x, y) d\sigma.$$

(4) 若 $f(x, y)$ 与 $g(x, y)$ 在 D 上可积, 且

$$f(x, y) \leq g(x, y), \quad (x, y) \in D,$$

则

$$\iint_D f(x, y) d\sigma \leq \iint_D g(x, y) d\sigma.$$

(5) 若 $f(x, y)$ 在 D 上可积, 则函数 $|f(x, y)|$ 在 D 上也可积, 且

$$\left| \iint_D f(x, y) d\sigma \right| \leq \iint_D |f(x, y)| d\sigma.$$

(6) 若 $f(x, y)$ 在 D 上可积, 且

$$m \leq f(x, y) \leq M, \quad (x, y) \in D,$$

则

$$m S_D \leq \iint_D f(x, y) d\sigma \leq M S_D,$$

这里 S_D 是积分区域 D 的面积.

(7) (中值定理) 若 $f(x, y)$ 在有界闭区域 D 上连续, 则存在 $(\xi, \eta) \in D$, 使得

$$\iint_D f(x, y) d\sigma = f(\xi, \eta) S_D,$$

这里 S_D 是积分区域 D 的面积.



注 中值定理的几何意义: 以 D 为底, $z = f(x, y)$ ($f(x, y) \geq 0$) 为曲顶的曲顶柱体体积等于一个同底的平顶柱体的体积, 这个平顶柱体的高等于 $f(x, y)$ 在区域 D 中某点 (ξ, η) 的函数值 $f(\xi, \eta)$.

证明



12.3.2 直角坐标系下二重积分的计算

定理 12.15

设 $f(x, y)$ 在矩形区域 $D = [a, b] \times [c, d]$ 上可积, 且对每个 $x \in [a, b]$, 积分 $\int_c^d f(x, y) dy$ 存在, 则累次积分

$$\int_a^b dx \int_c^d f(x, y) dy$$

也存在, 且

$$\iint_D f(x, y) d\sigma = \int_a^b dx \int_c^d f(x, y) dy. \quad (12.11)$$

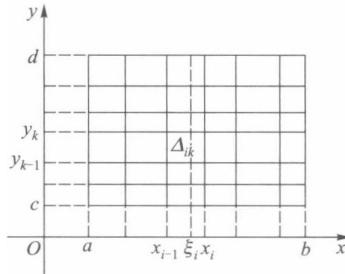


图 12.2

证明 令 $F(x) = \int_c^d f(x, y) dy$, 定理要求证明 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上可积, 且积分的结果恰为二重积分. 为此, 对区间 $[a, b]$ 与 $[c, d]$ 分别作分割

$$a = x_0 < x_1 < \cdots < x_r = b,$$

$$c = y_0 < y_1 < \cdots < y_s = d.$$

按这些分点作两组直线

$$x = x_i \quad (i = 1, 2, \dots, r - 1)$$

及

$$y = y_k \quad (k = 1, 2, \dots, s - 1),$$

它把矩形 D 分为 rs 个小矩形 (图 12.2). 记 Δ_{ik} 为小矩形 $[x_{i-1}, x_i] \times [y_{k-1}, y_k]$ ($i = 1, 2, \dots, r, k = 1, 2, \dots, s$); 设 $f(x, y)$ 在 Δ_{ik} 上的上确界和下确界分别为 M_{ik} 和 m_{ik} . 在区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 中任取一点 ξ_i , 于是就有不等式

$$m_{ik} \Delta y_k \leq \int_{y_{k-1}}^{y_k} f(\xi_i, y) dy \leq M_{ik} \Delta y_k,$$

其中 $\Delta y_k = y_k - y_{k-1}$. 因此

$$\sum_{k=1}^s m_{ik} \Delta y_k \leq F(\xi_i) = \int_c^d f(\xi_i, y) dy \leq \sum_{k=1}^s M_{ik} \Delta y_k,$$

$$\sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^s m_{ik} \Delta y_k \Delta x_i \leq \sum_{i=1}^r F(\xi_i) \Delta x_i \leq \sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^s M_{ik} \Delta y_k \Delta x_i,$$

其中 $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$. 记 Δ_{ik} 的对角线长度为 d_{ik} 和

$$\|T\| = \max_{i,k} d_{ik}.$$

由于二重积分存在, 由定理 12.10, 当 $\|T\| \rightarrow 0$ 时, $\sum_{i,k} m_{ik} \Delta y_k \Delta x_i$ 和 $\sum_{i,k} M_{ik} \Delta y_k \Delta x_i$ 有相同的极限, 且极限值等于

$$\iint_D f(x, y) d\sigma.$$

$$\lim_{\|T\| \rightarrow 0} \sum_{i=1}^r F(\xi_i) \Delta x_i = \iint_D f(x, y) d\sigma.$$

由于当 $\|T\| \rightarrow 0$ 时, 必有 $\max_{1 \leq i \leq r} \Delta x_i \rightarrow 0$, 因此由定积分定义, (??)式左边

$$\lim_{\|T\| \rightarrow 0} \sum_{i=1}^r F(\xi_i) \Delta x_i = \int_a^b F(x) dx = \int_a^b dx \int_c^d f(x, y) dy.$$

□

定理 12.16

设 $f(x, y)$ 在矩形区域 $D = [a, b] \times [c, d]$ 上可积, 且对每个 $y \in [c, d]$, 积分 $\int_a^b f(x, y) dx$ 存在, 则累次积分

$$\int_c^d dy \int_a^b f(x, y) dx$$

也存在, 且

$$\iint_D f(x, y) d\sigma = \int_c^d dy \int_a^b f(x, y) dx.$$

♡

推论 12.4

当 $f(x, y)$ 在矩形区域 $D = [a, b] \times [c, d]$ 上连续时, 则有

$$\iint_D f(x, y) d\sigma = \int_a^b dx \int_c^d f(x, y) dy = \int_c^d dy \int_a^b f(x, y) dx.$$

♡

证明 由定理 12.15 和定理 12.16 易得.

□

定义 12.9

称平面点集

$$D = \{(x, y) \mid y_1(x) \leq y \leq y_2(x), a \leq x \leq b\} \quad (12.12)$$

为 x 型区域 (图 12.3(a)); 称平面点集

$$D = \{(x, y) \mid x_1(y) \leq x \leq x_2(y), c \leq y \leq d\} \quad (12.13)$$

为 y 型区域 (图 12.3(b)).

♣

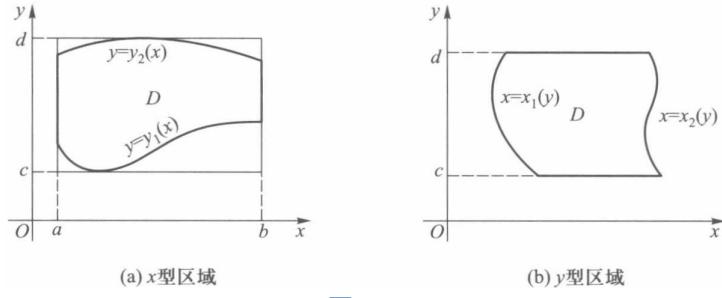


图 12.3

注 这些区域的特点是当 D 为 x 型区域时, 垂直于 x 轴的直线 $x = x_0$ ($a < x_0 < b$) 至多与区域 D 的边界交于两点; 当 D 为 y 型区域时, 直线 $y = y_0$ ($c < y_0 < d$) 至多与 D 的边界交于两点.

许多常见的区域都可以分解成有限个除边界外无公共内点的 x 型区域或 y 型区域 (如图 12.4 所示的区域 D 可分解成三个区域, 其 I 为 x 型区域, II 为 y 型区域). 因而解决了 x 型区域或 y 型区域上二重积分的计算问题, 那么一般区域上二重积分的计算问题也就得到了解决.

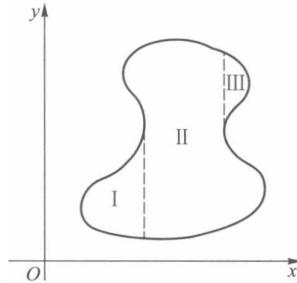


图 12.4

定理 12.17

(1) 若 $f(x, y)$ 在如(12.12)式所示的 x 型区域 D 上连续, 其中 $y_1(x), y_2(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 则

$$\iint_D f(x, y) d\sigma = \int_a^b dx \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} f(x, y) dy.$$

即二重积分可化为先对 y 后对 x 的累次积分.

(2) 若 D 为(12.13)式所示的 y 型区域, 其中 $x_1(y), x_2(y)$ 在 $[c, d]$ 上连续, 则二重积分可化为先对 x 后对 y 的累次积分

$$\iint_D f(x, y) d\sigma = \int_c^d dy \int_{x_1(y)}^{x_2(y)} f(x, y) dx.$$

即二重积分可化为先对 x 后对 y 的累次积分.



证明 只证 (1), (2) 类似可证. 由于 $y_1(x)$ 与 $y_2(x)$ 在闭区间 $[a, b]$ 上连续, 故存在矩形区域 $[a, b] \times [c, d] \supset D$ (如图 12.3(a)), 现作一定义在 $[a, b] \times [c, d]$ 上的函数

$$F(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & (x, y) \in D, \\ 0, & (x, y) \notin D. \end{cases}$$

可以验证, 函数 $F(x, y)$ 在 $[a, b] \times [c, d]$ 上可积, 而且

$$\begin{aligned} \iint_D f(x, y) d\sigma &= \iint_{[a, b] \times [c, d]} F(x, y) d\sigma = \int_a^b dx \int_c^d F(x, y) dy \\ &= \int_a^b dx \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} F(x, y) dy = \int_a^b dx \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} f(x, y) dy. \end{aligned}$$



注 从几何意义上可以这样来理解化二重积分为累次积分, 二重积分是计算以 D 为底面, $f(x, y) (\geq 0)$ 为高的曲顶柱体的体积, 这个曲顶柱体可视为介于平行平面 $x = a$ 与 $x = b$ 之间的立体, 可以利用截面面积 $S(x), x \in [a, b]$ 的积分求出. 而截面面积 $S(x)$ 是一元函数 $f(x, y)$ (其中 x 为参量) 与 y 轴以及直线 $y = y_1(x), y = y_2(x)$ 所围图形的面积 (图 12.5), 所以

$$S(x) = \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} f(x, y) dy.$$

那么曲顶柱体的体积

$$V = \int_a^b S(x) dx = \int_a^b dx \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} f(x, y) dy.$$

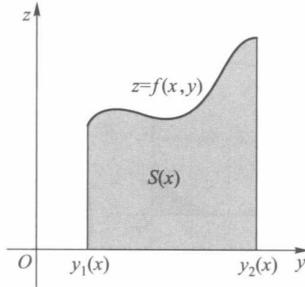


图 12.5

12.3.3 Green 公式

定义 12.10

设区域 D 的边界 L 由一条或几条光滑曲线所组成. 边界曲线的正方向规定为: 当人沿边界行走时, 区域 D 总在他的左边, 如图 12.6 所示. 与上述规定的方向相反的方向称为负方向, 记为 $-L$.

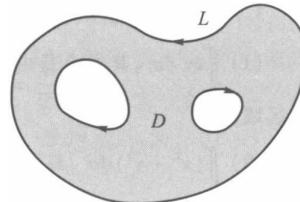


图 12.6

定理 12.18

若函数 $P(x, y), Q(x, y)$ 在闭区域 D 上连续, 且有连续的一阶偏导数, 则有

$$\iint_D \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) d\sigma = \oint_L P dx + Q dy, \quad (12.14)$$

这里 L 为区域 D 的边界曲线, 分段光滑, 并取正方向. 公式(12.14)称为格林 (Green) 公式.

注 格林公式沟通了沿闭曲线的积分与二重积分之间的联系. 为便于记忆, 格林公式(12.14)也可写成下述形式:

$$\iint_D \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \\ P & Q \end{vmatrix} d\sigma = \oint_L P dx + Q dy.$$

证明 根据区域 D 的不同形状, 一般可分三种情形来证明:

(i) 若区域 D 既是 x 型区域又是 y 型区域, 即平行于坐标轴的直线和 L 至多交于两点 (图 12.7).

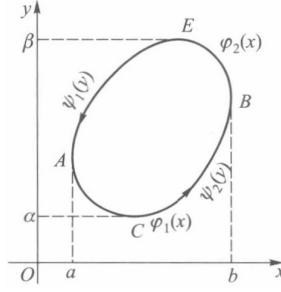


图 12.7

这时区域 D 可表示为

$$\varphi_1(x) \leq y \leq \varphi_2(x), a \leq x \leq b$$

或

$$\psi_1(y) \leq x \leq \psi_2(y), \alpha \leq y \leq \beta.$$

这里 $y = \varphi_1(x)$ 和 $y = \varphi_2(x)$ 分别为曲线 \widehat{ACB} 和 \widehat{AEB} 的方程. 而 $x = \psi_1(y)$ 和 $x = \psi_2(y)$ 则分别是曲线 \widehat{CAE} 和 \widehat{CBE} 的方程. 于是

$$\begin{aligned} \iint_D \frac{\partial Q}{\partial x} d\sigma &= \int_{\alpha}^{\beta} dy \int_{\psi_1(y)}^{\psi_2(y)} \frac{\partial Q}{\partial x} dx \\ &= \int_{\alpha}^{\beta} Q(\psi_2(y), y) dy - \int_{\alpha}^{\beta} Q(\psi_1(y), y) dy \\ &= \int_{\widehat{CBE}} Q(x, y) dy - \int_{\widehat{CAE}} Q(x, y) dy \\ &= \int_{\widehat{CBE}} Q(x, y) dy + \int_{\widehat{EAC}} Q(x, y) dy \\ &= \oint_L Q(x, y) dy. \end{aligned}$$

同理可以证得

$$-\iint_D \frac{\partial P}{\partial y} d\sigma = \oint_L P(x, y) dx.$$

将上述两个结果相加即得

$$\iint_D \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) d\sigma = \oint_L P dx + Q dy.$$

- (ii) 若区域 D 是由一条按段光滑的闭曲线围成, 如图 12.8 所示, 则先用几段光滑曲线将 D 分成有限个既是 x 型又是 y 型的子区域, 然后逐块按 (i) 得到它们的格林公式, 并相加即可. 如图 12.8 所示的区域 D . 可将 D 分成三个既是 x 型又是 y 型的区域 D_1, D_2, D_3 .

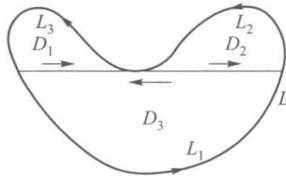


图 12.8

于是

$$\begin{aligned} \iint_D \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) d\sigma &= \iint_{D_1} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) d\sigma + \iint_{D_2} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) d\sigma + \iint_{D_3} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) d\sigma \\ &= \oint_{L_1} P dx + Q dy + \oint_{L_2} P dx + Q dy + \oint_{L_3} P dx + Q dy \end{aligned}$$

$$= \oint_L P dx + Q dy.$$

(iii) 若区域 D 由几条闭曲线所围成, 如图 12.9 所示, 这时可适当添加直线段 AB, CE , 把区域转化为 (ii) 的情况来处理. 在图 12.9 中联结了 AB, CE 后, 则 D 的边界曲线由 $AB, L_2, BA, \widehat{AFC}, CE, L_3, EC$ 及 \widehat{CGA} 构成.

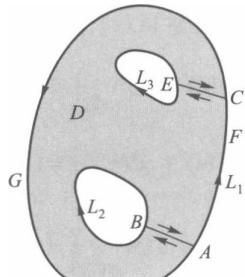


图 12.9

由 (ii) 知

$$\begin{aligned} \iint_D \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) d\sigma &= \left\{ \int_{AB} + \int_{L_2} + \int_{BA} + \int_{\widehat{AFC}} + \int_{CE} + \int_{L_3} + \int_{EC} + \int_{\widehat{CGA}} \right\} (P dx + Q dy) \\ &= \left(\oint_{L_2} + \oint_{L_3} + \oint_{L_1} \right) (P dx + Q dy) \\ &= \oint_L P dx + Q dy. \end{aligned}$$

□

定义 12.11

若对于平面区域 D 上任一封闭曲线, 皆可不经过 D 以外的点而连续收缩于属于 D 的某一点, 则称此平面区域为单连通区域, 否则称为复连通区域.

♣

定理 12.19

设 D 是单连通闭区域. 若函数 $P(x, y), Q(x, y)$ 在 D 内连续, 且具有一阶连续偏导数, 则以下四个条件等价:

(i) 沿 D 内任一按段光滑封闭曲线 L , 有

$$\oint_L P dx + Q dy = 0;$$

(ii) 对 D 中任一按段光滑曲线 L , 曲线积分

$$\int_L P dx + Q dy$$

与路线无关, 只与 L 的起点及终点有关;

(iii) $P dx + Q dy$ 是 D 内某一函数 $u(x, y)$ 的全微分, 即在 D 内有

$$du = P dx + Q dy;$$

(iv) 在 D 内处处成立

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial Q}{\partial x}.$$

♡

证明 (i) \Rightarrow (ii) 如图 12.10, 设 \widehat{ARB} 与 \widehat{ASB} 为联结点 A, B 的任意两条按段光滑曲线.

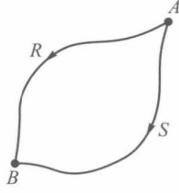


图 12.10

由 (i) 可推得

$$\int_{\widehat{ARB}} Pdx + Qdy - \int_{\widehat{ASB}} Pdx + Qdy = \int_{\widehat{ARB}} Pdx + Qdy + \int_{\widehat{BSA}} Pdx + Qdy = \oint_{\widehat{ARBSA}} Pdx + Qdy = 0,$$

所以

$$\int_{\widehat{ARB}} Pdx + Qdy = \int_{\widehat{ASB}} Pdx + Qdy.$$

(ii) \Rightarrow (iii) 设 $A(x_0, y_0)$ 为 D 内某一定点, $B(x, y)$ 为 D 内任意一点. 由 (ii), 曲线积分

$$\int_{\widehat{AB}} Pdx + Qdy$$

与路线的选择无关, 故当 $B(x, y)$ 在 D 内变动时, 其积分值是 $B(x, y)$ 的函数, 即有

$$u(x, y) = \int_{\widehat{AB}} Pdx + Qdy.$$

取 Δx 充分小, 使 $(x + \Delta x, y) \in D$, 则函数 $u(x, y)$ 对于 x 的偏增量 (图 12.11)

$$u(x + \Delta x, y) - u(x, y) = \int_{\widehat{AC}} Pdx + Qdy - \int_{\widehat{AB}} Pdx + Qdy.$$

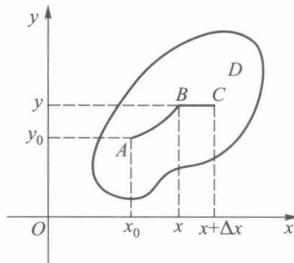


图 12.11

因为在 D 内曲线积分与路线无关, 所以

$$\int_{\widehat{AC}} Pdx + Qdy = \int_{\widehat{AB}} Pdx + Qdy + \int_{BC} Pdx + Qdy.$$

由于直线段 BC 平行于 x 轴, 所以 $dy = 0$, 从而由积分中值定理可得

$$\Delta u = u(x + \Delta x, y) - u(x, y) = \int_{BC} Pdx + Qdy = \int_x^{x+\Delta x} P(s, y)ds = P(x + \theta\Delta x, y)\Delta x,$$

其中 $0 < \theta < 1$. 根据 $P(x, y)$ 在 D 上连续, 于是有

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} P(x + \theta\Delta x, y) = P(x, y).$$

同理可证 $\frac{\partial u}{\partial y} = Q(x, y)$. 因此

$$du = Pdx + Qdy.$$

(iii) \Rightarrow (iv) 设存在函数 $u(x, y)$, 使得

$$du = Pdx + Qdy,$$

所以 $P(x, y) = \frac{\partial}{\partial x}u(x, y), Q(x, y) = \frac{\partial}{\partial y}u(x, y)$. 因此

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x}.$$

因为 $P(x, y), Q(x, y)$ 在区域 D 内具有一阶连续偏导数, 所以

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x}.$$

从而在 D 内每一点处都有

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial Q}{\partial x}.$$

(iv) \Rightarrow (i) 设 L 为 D 内任一按段光滑封闭曲线, 记 L 所围的区域为 σ . 由于 D 为单连通区域, 所以区域 σ 含在 D 内. 应用格林公式及在 D 内恒有 $\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial Q}{\partial x}$ 的条件, 就得到

$$\oint_L P dx + Q dy = \iint_{\sigma} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) d\sigma = 0.$$

上面我们将四个条件循环推导了一遍, 这就证明了它们是相互等价的. □

定义 12.12

设 D 是单连通闭区域. 若函数 $P(x, y), Q(x, y)$ 在 D 内连续, 且具有一阶连续偏导数, 则由定理 12.19 的证明可看到二元函数

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \int_{AB} P(x, y) dx + Q(x, y) dy \\ &= \int_{A(x_0, y_0)}^{B(x, y)} P(s, t) ds + Q(s, t) dt \end{aligned}$$

具有性质

$$du(x, y) = P(x, y) dx + Q(x, y) dy.$$

它与一元函数的原函数相仿. 所以我们也称 $u(x, y)$ 为 $P dx + Q dy$ 的一个原函数. ♣

12.3.4 二重积分的变量替换

引理 12.1

设变换 $T : x = x(u, v), y = y(u, v)$ 将 uv 平面上由按段光滑封闭曲线所围的闭区域 Δ 一对一地映成 xy 平面上的闭区域 D , 函数 $x(u, v), y(u, v)$ 在 Δ 内分别具有一阶连续偏导数且它们的函数行列式

$$J(u, v) = \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} \neq 0, \quad (u, v) \in \Delta,$$

则区域 D 的面积

$$\mu(D) = \iint_{\Delta} |J(u, v)| du dv.$$

证明 下面给出当 $y(u, v)$ 在 Δ 内具有二阶连续偏导数时的证明. 对 $y(u, v)$ 具有一阶连续偏导数条件下的证明后续给出.

由于 T 是一对变换, 且 $J(u, v) \neq 0$, 因而 T 把 Δ 的内点变为 D 的内点, 所以 Δ 的按段光滑边界曲线 L_{Δ} 变换到 D 时, 其边界曲线 L_D 也是按段光滑的.

设曲线 L_{Δ} 的参数方程为

$$u = u(t), \quad v = v(t) \quad (\alpha \leq t \leq \beta).$$

由于 L_{Δ} 按段光滑, 所以 $u'(t), v'(t)$ 在 $[\alpha, \beta]$ 上至多除去有限个第一类间断点外, 在其他的点上都连续. 因为 $L_D =$

$T(L_\Delta)$, 所以 L_D 的参数方程为

$$x = x(t) = x(u(t), v(t)), \quad (\alpha \leq t \leq \beta).$$

$$y = y(t) = y(u(t), v(t))$$

若规定 t 从 α 变到 β 时, 对应于 L_D 的正向, 则根据格林公式, 取 $P(x, y) = 0, Q(x, y) = x$, 有

$$\mu(D) = \oint_{L_D} x \, dy = \int_\alpha^\beta x(t) y'(t) \, dt = \int_\alpha^\beta x(u(t), v(t)) \left[\frac{\partial y}{\partial u} u'(t) + \frac{\partial y}{\partial v} v'(t) \right] \, dt. \quad (12.15)$$

另一方面, 在 uv 平面上

$$\oint_{L_\Delta} x(u, v) \left[\frac{\partial y}{\partial u} du + \frac{\partial y}{\partial v} dv \right] = \pm \int_\alpha^\beta x(u(t), v(t)) \left[\frac{\partial y}{\partial u} u'(t) + \frac{\partial y}{\partial v} v'(t) \right] \, dt, \quad (12.16)$$

其中正号及负号分别由 t 从 α 变到 β 时, 是对应于 L_Δ 的正方向或负方向所决定. 由(12.15)及(12.16)式得到

$$\mu(D) = \pm \oint_{L_\Delta} x(u, v) \left[\frac{\partial y}{\partial u} du + \frac{\partial y}{\partial v} dv \right] = \pm \oint_{L_\Delta} x(u, v) \frac{\partial y}{\partial u} du + x(u, v) \frac{\partial y}{\partial v} dv.$$

令 $P(u, v) = x(u, v) \frac{\partial y}{\partial u}, Q(u, v) = x(u, v) \frac{\partial y}{\partial v}$, 在 uv 平面上对上式应用格林公式, 得到

$$\mu(D) = \pm \iint_{\Delta} \left(\frac{\partial Q}{\partial u} - \frac{\partial P}{\partial v} \right) \, du \, dv.$$

由于函数 $y(u, v)$ 具有二阶连续偏导数, 即有 $\frac{\partial^2 y}{\partial u \partial v} = \frac{\partial^2 y}{\partial v \partial u}$, 因此, $\frac{\partial Q}{\partial u} - \frac{\partial P}{\partial v} = J(u, v)$, 于是

$$\mu(D) = \pm \iint_{\Delta} J(u, v) \, du \, dv.$$

又因为 $\mu(D)$ 总是非负的, 而 $J(u, v)$ 在 Δ 上不为零且连续, 故其函数值在 Δ 上不变号, 所以

$$\mu(D) = \iint_{\Delta} |J(u, v)| \, du \, dv.$$

□

定理 12.20

设 $f(x, y)$ 在有界闭区域 D 上可积, 变换 $T : x = x(u, v), y = y(u, v)$ 将 uv 平面上按段光滑封闭曲线所围成的闭区域 Δ 一对一地映成 xy 平面上的闭区域 D , 函数 $x(u, v), y(u, v)$ 在 Δ 内分别具有一阶连续偏导数且它们的函数行列式

$$J(u, v) = \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} \neq 0, \quad (u, v) \in \Delta,$$

则

$$\iint_D f(x, y) \, dx \, dy = \iint_{\Delta} f(x(u, v), y(u, v)) |J(u, v)| \, du \, dv.$$

♥

证明 用曲线网把 Δ 分成 n 个小区域 Δ_i , 在变换 T 作用下, 区域 D 也相应地被分成 n 个小区域 D_i . 记 Δ_i 及 D_i 的面积为 $\mu(\Delta_i)$ 及 $\mu(D_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$). 由引理 12.1 及二重积分中值定理, 有

$$\mu(D_i) = \iint_{\Delta_i} |J(u, v)| \, du \, dv = |J(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)| \mu(\Delta_i),$$

其中 $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i) \in \Delta_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$).

令 $\xi_i = x(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i), \eta_i = y(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)$, 则 $(\xi_i, \eta_i) \in D_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$). 作二重积分 $\iint_D f(x, y) \, dx \, dy$ 的积分和

$$\sigma = \sum_{i=1}^n f(\xi_i, \eta_i) \mu(D_i) = \sum_{i=1}^n f(x(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i), y(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)) |J(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)| \mu(\Delta_i).$$

上式右边的和式是 Δ 上可积函数 $f(x(u, v), y(u, v)) |J(u, v)|$ 的积分和. 又由变换 T 的连续性可知, 当区域 Δ 的分割 $T_\Delta : |\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n|$ 的细度 $\|T_\Delta\| \rightarrow 0$ 时, 区域 D 相应的分割 $T_D : |D_1, D_2, \dots, D_n|$ 的细度 $\|T_D\|$ 也趋于零. 因此

得到

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \iint_{\Delta} f(x(u, v), y(u, v)) |J(u, v)| du dv.$$

□

定理 12.21

设 $f(x, y)$ 在有界闭区域 D 上可积, 且在极坐标变换

$$T : \begin{cases} x = r \cos \theta, \\ t = r \sin \theta, \end{cases} \quad 0 \leq r < +\infty, 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

下, xy 平面上有界闭区域 D 与 $r\theta$ 平面上区域 Δ 对应, 则成立

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \iint_{\Delta} f(r \cos \theta, r \sin \theta) r dr d\theta. \quad (12.17)$$

♡

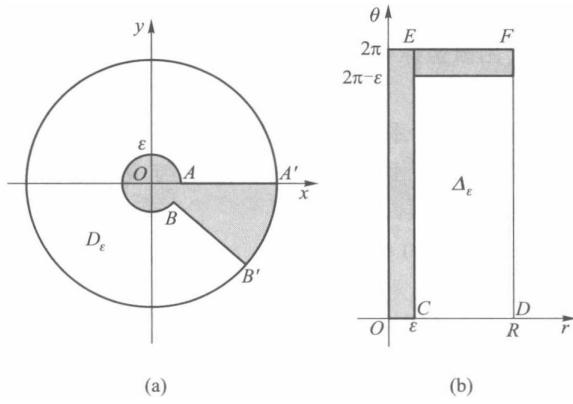


图 12.12

证明 若 D 为圆域 $\{(x, y) | x^2 + y^2 \leq R^2\}$, 则 Δ 为 $r\theta$ 平面上矩形区域 $[0, R] \times [0, 2\pi]$. 设 D_ϵ 为在圆环 $\{(x, y) | 0 < \epsilon^2 \leq x^2 + y^2 \leq R^2\}$ 中除去中心角为 ϵ 的扇形 $BB'A'A$ 所得的区域 (图 12.12(a)), 则在变换 T 下, D_ϵ 对应于 $r\theta$ 平面上的矩形区域 $\Delta_\epsilon = [\epsilon, R] \times [0, 2\pi - \epsilon]$ (图 12.12(b)). 但极坐标变换 T 在 D_ϵ 与 Δ_ϵ 之间是一对一变换, 且在 Δ_ϵ 上函数行列式 $J(r, \theta) > 0$. 于是由定理 12.20, 有

$$\iint_{D_\epsilon} f(x, y) dx dy = \iint_{\Delta_\epsilon} f(r \cos \theta, r \sin \theta) r dr d\theta.$$

因为 $f(x, y)$ 在有界闭域 D 上有界, 在上式中令 $\epsilon \rightarrow 0$, 即得

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \iint_{\Delta} f(r \cos \theta, r \sin \theta) r dr d\theta.$$

若 D 是一般的有界闭区域, 则取足够大的 $R > 0$, 使 D 包含在圆域 $D_R = \{(x, y) | x^2 + y^2 \leq R^2\}$ 内, 并且在 D_R 上定义函数

$$F(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & (x, y) \in D, \\ 0, & (x, y) \notin D. \end{cases}$$

函数 $F(x, y)$ 在 D_R 内至多在有限条按段光滑曲线上间断, 因此, 对函数 $F(x, y)$, 由前述有

$$\iint_{D_R} F(x, y) dx dy = \iint_{\Delta_R} F(r \cos \theta, r \sin \theta) r dr d\theta,$$

其中 Δ_R 为 $r\theta$ 平面上矩形区域 $[0, R] \times [0, 2\pi]$. 由函数 $F(x, y)$ 的定义, 即得(12.17)式.

□

命题 12.1

(i) 若原点 $O \notin D$, 且 xy 平面上射线 $\theta = \text{常数}$ 与 D 的边界至多交于两点 (图 12.13), 则 Δ 必可表示成

$$r_1(\theta) \leq r \leq r_2(\theta), \alpha \leq \theta \leq \beta,$$

于是有

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \int_{\alpha}^{\beta} d\theta \int_{r_1(\theta)}^{r_2(\theta)} f(r \cos \theta, r \sin \theta) r dr.$$

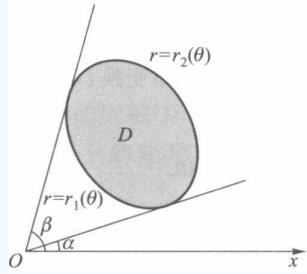


图 12.13

(ii) 类似地, 若 xy 平面上的圆 $r = \text{常数}$ 与 D 的边界至多交于两点 (图 12.14), 则 Δ 必可表示成

$$\theta_1(r) \leq \theta \leq \theta_2(r), r_1 \leq r \leq r_2,$$

所以

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \int_{r_1}^{r_2} r dr \int_{\theta_1(r)}^{\theta_2(r)} f(r \cos \theta, r \sin \theta) d\theta.$$

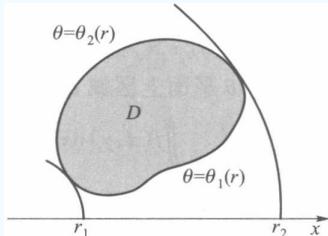


图 12.14

(iii) 若原点为 D 的内点 (图 12.15), D 的边界的极坐标方程为 $r = r(\theta)$, 则 Δ 可表示成

$$0 \leq r \leq r(\theta), 0 \leq \theta \leq 2\pi.$$

所以

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{r(\theta)} f(r \cos \theta, r \sin \theta) r dr.$$

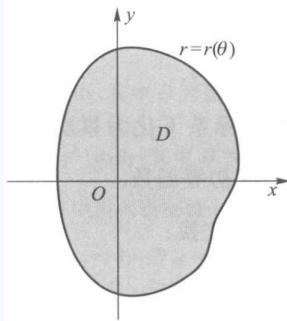


图 12.15

(iv) 若原点 O 在 D 的边界上 (图 12.15), 则 Δ 为

$$0 \leq r \leq r(\theta), \alpha \leq \theta \leq \beta,$$

于是

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \int_{\alpha}^{\beta} d\theta \int_0^{r(\theta)} f(r \cos \theta, r \sin \theta) r dr.$$

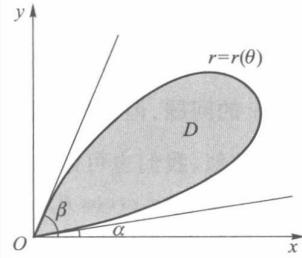


图 12.16

证明

□

定理 12.22

设 $f(x, y)$ 在有界闭区域 D 上可积, 作如下广义极坐标变换

$$T: \begin{cases} x = ar \cos \theta, \\ y = br \sin \theta, \end{cases} \quad 0 \leq r < +\infty, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi.$$

xy 平面上有界闭区域 D 与 $r\theta$ 平面上区域 Δ 对应, 并计算得

$$J(r, \theta) = \begin{vmatrix} a \cos \theta & -ar \sin \theta \\ b \sin \theta & br \cos \theta \end{vmatrix} = abr.$$

则成立

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \iint_{\Delta} f(r \cos \theta, r \sin \theta) abr dr d\theta.$$

♡

证明

□

12.4 重积分换元法

定理 12.23 (重积分换元法)

1. 考虑换元 $w : \begin{cases} x = x(u, v) \\ y = y(u, v) \end{cases}$, 则有

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \iint_{w^{-1}(D)} f(x(u, v), y(u, v)) \cdot |\det J| du dv,$$

这里

$$J \triangleq \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{pmatrix}.$$

2. 考虑换元 $w : \begin{cases} x = x(u, v, w) \\ y = y(u, v, w) \\ z = z(u, v, w) \end{cases}$, 则有

$$\iiint_D f(x, y, z) dx dy dz = \iiint_{w^{-1}(D)} f(x(u, v, w), y(u, v, w), z(u, v, w)) \cdot |\det J| du dv dw,$$

这里

$$J \triangleq \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(u, v, w)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} & \frac{\partial x}{\partial w} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} & \frac{\partial y}{\partial w} \\ \frac{\partial z}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial v} & \frac{\partial z}{\partial w} \end{pmatrix}.$$



笔记

1. 记忆结论

$$\left[\frac{\partial(u, v)}{\partial(x, y)} \right]^{-1} = \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)}, \quad \left[\frac{\partial(u, v, w)}{\partial(x, y, z)} \right]^{-1} = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(u, v, w)},$$

于是有

$$\left| \det \frac{\partial(u, v)}{\partial(x, y)} \right| \cdot \left| \det \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} \right| = 1, \quad \left| \det \frac{\partial(u, v, w)}{\partial(x, y, z)} \right| \cdot \left| \det \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(u, v, w)} \right| = 1.$$

2. 换元法的区域确定重点是: 边界对应边界.

3. 极坐标, 柱坐标, 球坐标等方法是换元法的特例, 我们课本上记忆的经典确定上下限的几何直观是他们独有的. 对于一般没有, 或者很难有几何意义的换元法, 只能把换元后的新变量用直角坐标的方法确定上下限. 特别的, 极坐标, 柱坐标, 球坐标等方法也可以视换元后的新变量用直角坐标的方法确定上下限.

第 13 章 无理数初步

定理 13.1 (狄利克雷定理)

对于无理数 a , 则存在无穷多对互素的整数 p, q 使得 $\left|a - \frac{p}{q}\right| \leq \frac{1}{q^2}$, 而对有理数 a , 这样的互素整数对 (p, q) 只能是有限个.



笔记 这通常称为“齐次逼近”, 证明利用抽屉原理即可.

推论 13.1

对于实数 a , 则 a 为无理数当且仅当任意 $\varepsilon > 0$, 存在整数 x, y 使得 $0 < |ax - y| < \varepsilon$.



证明 对任意正整数 N , 将 $[0, 1]$ 均分为 N 个闭区间, 每一个长度 $\frac{1}{N}$, 则 $n+1$ 个数 $0, \{a\}, \{2a\}, \dots, \{Na\}$ 全部落在 $[0, 1]$ 中, 根据抽屉原理必定有两个数落入同一区间, 也即存在 $0 \leq i < j \leq N$ 使得 $\{ia\}, \{ja\} \in \left[\frac{k}{N}, \frac{k+1}{N}\right]$. 注: 因为 a 是无理数, 所以任意 $i \neq j$ 都一定有 $\{ia\} \neq \{ja\}$, 否则 $ia - [ia] = ja - [ja]$ 意味着 a 是有理数. 所以

$$|\{ia\} - \{ja\}| = |(j-i)a - M| \leq \frac{1}{N} \Rightarrow \left|a - \frac{M}{j-i}\right| \leq \frac{1}{N(j-i)}$$

这里 M 是一个整数, 现在不一定有 M 与 $j-i$ 互素, 但是我们可以将其写成既约分数 $M = up, j-i = uq$, 其中 $(p, q) = 1, u \in \mathbb{N}^+$, 代入得到: 对任意正整数 N , 都存在互素的整数 p, q , 其中 $1 \leq q \leq N$ 是正整数, 使得 $\left|a - \frac{p}{q}\right| \leq \frac{1}{Nq} \leq \frac{1}{q^2}$. 现在还没有说明“无穷多个”, 采用反证法, 假如使得 $\left|a - \frac{p}{q}\right| \leq \frac{1}{q^2}$ 成立的互素的整数 (p, q) 只有有限对, 记为 $(p_1, q_1), \dots, (p_m, q_m)$, 那么(在上面证明的结论里面)依次取 $N = 3, 4, \dots$, 则每一个 N 都能够对应这 m 对 (p, q) 中的某一个, 而 $N = 3, 4, \dots$ 是无限的, m 是有限的, 所以必定有一个 (p_i, q_i) 对应了无穷多个正整数 N . 不妨设 $i = 1$, 换句话说: 存在一列正整数 N_k 单调递增趋于正无穷, 使得 $\left|a - \frac{p_1}{q_1}\right| \leq \frac{1}{N_k q_1}$ 恒成立, 令 $k \rightarrow \infty$ 可知 $a = \frac{p}{q}$ 是有理数, 导致矛盾.

而如果 $a = \frac{m}{n}$ 是有理数, 但是有无穷个互素的 (p, q) 使得 $\left|\frac{m}{n} - \frac{p}{q}\right| \leq \frac{1}{q^2}$, 则当 q 充分大时, 所有这些 (p, q) 中的 p 也都会充分大(相当于同时趋于无穷), 然而不等式等价于 $\frac{1}{q} \geq \frac{|mq - np|}{n}$, 则当 p, q 都充分大时 $mq - np \neq 0$ (不然会导致 $p|mq$ 结合互素有 $p|m$ (对充分大的 p 均成立), 显然矛盾), 于是 $\frac{1}{q} \geq \frac{|mq - np|}{n} \geq \frac{1}{n}$ 导致 q 有上界, 还是矛盾, 结论得证.



第 14 章 求和与求积符号

14.1 求和符号

定义 14.1 (空和 (Empty sum))

$$\sum_{i=b+1}^b f(i) \triangleq 0, b \in \mathbb{Z}. \quad (14.1)$$

定理 14.1 (关于求和号下限大于上限的计算)

$$\sum_{i=a}^c f(i) \equiv - \sum_{i=c+1}^{a-1} f(i), a, c \in \mathbb{Z} \text{ 且 } a > c. \quad (14.2)$$

笔记 上述空和的定义与关于求和号下限大于上限的计算定理都来自论文:Interpreting the summation notation when the lower limit is greater than the upper limit(Kunle Adegoke).

定理 14.2 (求和号基本性质)

1. (倒序求和) 当 n 为非负整数时, 有

$$\sum_{k=1}^n a_k = \sum_{k=1}^n a_{n-k+1}.$$

笔记

1. 看到求和号内部有两个变量, 都可以尝试一下将其转化为倒序求和的形式.

14.1.1 求和号交换顺序

定理 14.3 (基本结论)

1. 当 n, m 均为非负整数时, 有

$$\sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} a_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n a_{ij}.$$

2. 当 n, m 均为非负整数, $p \leq n, q \leq m$ 且 $p, q \in \mathbb{N}_+$ 时, 有

$$\sum_{\substack{p \leq i \leq n \\ q \leq j \leq m}} a_{ij} = \sum_{i=p}^n \sum_{j=q}^m a_{ij} = \sum_{j=q}^m \sum_{i=p}^n a_{ij}.$$

3. 当 n 为非负整数时, 有

$$\sum_{1 \leq i \leq j \leq n} a_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n a_{ij} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^j a_{ij}.$$

4. 当 n 为非负整数时, 有

$$\sum_{1 \leq i < j \leq n} a_{ij} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^{j-1} a_{ij}.$$

5. 当 n 为非负整数时, 有

$$\sum_{i=1}^n a_i \cdot \sum_{j=1}^n b_j = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i b_j.$$

6. 当 n 为非负整数时, 有

$$\left(\sum_{i=1}^n a_i \right)^2 = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \sum_{j=1}^n a_j \geq 0, \forall a_1, a_2, \dots, a_n \in \mathbb{R} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j.$$



 **笔记** 如果上述命题第 1 条中的 n 或 m 取到无穷, 第 2 条中的 n 取到无穷, 则求和号不能直接交换顺序. 此时, 往往要添加一个条件, 相应的交换和号的结论才能成立. 比如, 著名的 *Fubini* 定理(见关于无限和的 *Fubini* 定理).

证明 1. 利用矩阵证明该结论.

设一个 m 行 n 列的矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}.$$

则矩阵 A 的第 i 行的和记为

$$r_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} (i = 1, 2, \dots, n).$$

矩阵 A 的第 j 列的和记为

$$c_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} (j = 1, 2, \dots, m).$$

易知, 矩阵所有元素的和等于所有行和 $r_i, i = 1, 2, \dots, n$ 求和也等于所有列和 $c_j, j = 1, 2, \dots, m$ 求和, 即

$$\sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n}} a_{ij} = \sum_{i=1}^n r_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij},$$

$$\sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n}} a_{ij} = \sum_{j=1}^m c_j = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n a_{ij}.$$

故

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n a_{ij} = \sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n}} a_{ij}.$$

2. 同理利用矩阵证明该结论.

设一个 m 行 n 列的矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} a_{pq} & a_{p,q+1} & \cdots & a_{pm} \\ a_{p+1,q} & a_{p+1,q+1} & \cdots & a_{p+1,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{nq} & a_{n,q+1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}.$$

则矩阵 A 的第 i 行的和记为

$$r_i = \sum_{j=q}^m a_{ij} (i = p, p+1, \dots, n).$$

矩阵 A 的第 j 列的和记为

$$c_j = \sum_{i=p}^n a_{ij} \quad (j = q, q+1, \dots, m).$$

易知, 矩阵所有元素的和等于所有行和 $r_i, i = p, p+1, \dots, n$ 求和也等于所有列和 $c_j, j = q, q+1, \dots, m$ 求和, 即

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{p \leq i \leq n \\ q \leq j \leq n}} a_{ij} &= \sum_{i=p}^n r_i = \sum_{i=p}^n \sum_{j=q}^m a_{ij}, \\ \sum_{\substack{p \leq i \leq n \\ q \leq j \leq n}} a_{ij} &= \sum_{j=q}^m c_j = \sum_{j=q}^m \sum_{i=p}^n a_{ij}. \end{aligned}$$

故

$$\sum_{i=p}^n \sum_{j=q}^m a_{ij} = \sum_{j=q}^m \sum_{i=p}^n a_{ij} = \sum_{\substack{p \leq i \leq n \\ q \leq j \leq n}} a_{ij}.$$

3. 根据 (1) 的结论可得

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^j a_{ij} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_{ij} \chi_{i \leq j}(i) \xrightarrow{1.的结论} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \chi_{i \leq j}(i) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n a_{ij}.$$

4. 根据 (1) 的结论可得

$$\sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^{j-1} a_{ij} = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^{n-1} a_{ij} \chi_{i < j}(i) \xrightarrow{1.的结论} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n a_{ij} \chi_{i < j}(i) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij}.$$

5. 结论是显然的.

6. 结论是显然的.

□

注 设 X 是全集, 对任意集合 $A \subset X$, 把函数

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}.$$

称为集合 A 的示性函数.

例题 14.1 计算

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{i}{2^{i+j}(i+j)}.$$

解 令 $I = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{i}{2^{i+j}(i+j)}$, 则

$$\begin{aligned} I &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{i}{2^{i+j}(i+j)} \xrightarrow[\text{(轮换换元)}]{\text{将 } i \text{ 换成 } j, \text{ 换成 } i} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{j}{2^{i+j}(i+j)} \\ &= \frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{i}{2^{i+j}(i+j)} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{j}{2^{i+j}(i+j)} \right) = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{i}{2^{i+j}(i+j)} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{j}{2^{i+j}(i+j)} \right) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{i+j}{2^{i+j}(i+j)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{2^{i+j}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2^i} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{2^j} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{2^i} \right)^2 \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{1}{2} - \frac{1}{2^{n+1}}}{1 - \frac{1}{2}} \right)^2 = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{2^n} \right]^2. \end{aligned}$$

□

例题 14.2 记

$$T = \{(a, b, c) \in \mathbb{N}^3 : a, b, c \text{ 可以构成某个三角形的三边长}\}.$$

证明:

$$\sum_{(a, b, c) \in T} A_{a, b, c} = \sum_{(x, y, z) \in \mathbb{N}^3 \text{ 且有相同的奇偶性}} A_{\frac{x+y}{2}, \frac{y+z}{2}, \frac{z+x}{2}}.$$

笔记 核心想法: 两个集合间可以建立一一映射.

结论 若 $x, y, z \in \mathbb{N}_+, x, y, z$ 具有相同奇偶性的充要条件为

$$x + y = 2a, y + z = 2b, x + z = 2c, \text{ 其中 } a, b, c \in \mathbb{N}_+.$$

证明 必要性显然. 下面证明充分性. 假设 x, y, z 具有不同的奇偶性, 则不妨设 x, z 为奇数, y 为偶数. 从而 $x + y$ 一定为奇数, 这与 $x + y = 2a$ 矛盾. 故 x, y, z 具有相同奇偶性. \square

证明 设 $T = \{(a, b, c) \in \mathbb{N}^3 : a, b, c \text{ 可以构成某个三角形的三边长}\}.$

$$\sum_{(a, b, c) \in T} A_{a, b, c} = \sum_{(x, y, z) \in \mathbb{N}^3 \text{ 且有相同的奇偶性}} A_{\frac{x+y}{2}, \frac{y+z}{2}, \frac{z+x}{2}}.$$

记 $S = \{(x, y, z) \in \mathbb{N}^3 : x, y, z \text{ 有相同的奇偶性}\}$, 则对 $\forall (x, y, z) \in S$, 取 $a = \frac{x+y}{2}, b = \frac{y+z}{2}, c = \frac{z+x}{2}$. 此时我们有

$$\begin{aligned} a + b &= \frac{x+2y+z}{2} > \frac{z+x}{2} = c, \\ b + c &= \frac{x+y+2z}{2} > \frac{x+y}{2} = a, \\ a + c &= \frac{2x+y+z}{2} > \frac{y+z}{2} = b. \end{aligned}$$

从而 a, b, c 可以构成某个三角形的三边长, 即此时 $(a, b, c) = (\frac{x+y}{2}, \frac{y+z}{2}, \frac{z+x}{2}) \in T$.

于是我们可以构造映射

$$\tau : S \rightarrow T, (x, y, z) \mapsto (a, b, c) = \left(\frac{x+y}{2}, \frac{y+z}{2}, \frac{z+x}{2}\right).$$

反之, 对 $\forall (a, b, c) \in T$, 取 $x = a + c - b, y = a + b - c, z = b + c - a$. 此时我们有

$$x + y = 2a, y + z = 2b, x + z = 2c.$$

从而 x, y, z 具有相同的奇偶性, 即此时 $(x, y, z) = (a + c - b, a + b - c, b + c - a) \in S$.

于是我们可以构造映射

$$\tau' : T \rightarrow S, (a, b, c) \mapsto (x, y, z) = (a + c - b, a + b - c, b + c - a).$$

因此对 $\forall (x, y, z) \in S$, 都有 $\tau\tau'(x, y, z) = \tau'\tau(x, y, z) = (x, y, z)$. 即 $\tau\tau' = I$. 故映射 τ 存在逆映射 τ' . 从而映射 τ 是双射.

因此集合 S 中的每一个元素都能在集合 T 中找到与之一一对应的元素. 于是两和式 $\sum_{(x, y, z) \in S} A_{\frac{x+y}{2}, \frac{y+z}{2}, \frac{z+x}{2}}$ 和 $\sum_{(a, b, c) \in T} A_{a, b, c}$ 的项数一定相同. 并且任取 $\sum_{(x, y, z) \in S} A_{\frac{x+y}{2}, \frac{y+z}{2}, \frac{z+x}{2}}$ 中 (x, y, z) 所对应的一项 $A_{\frac{x+y}{2}, \frac{y+z}{2}, \frac{z+x}{2}}$, $\sum_{(a, b, c) \in T} A_{a, b, c}$ 中一定存在与之一一对应的 $\tau(x, y, z)$ 所对应的一项 $A_{\tau(x, y, z)}$. 而 $\tau(x, y, z) = \left(\frac{x+y}{2}, \frac{y+z}{2}, \frac{z+x}{2}\right)$, 因此 $A_{\tau(x, y, z)} = A_{\frac{x+y}{2}, \frac{y+z}{2}, \frac{z+x}{2}}$. 故 $\sum_{(x, y, z) \in S} A_{\frac{x+y}{2}, \frac{y+z}{2}, \frac{z+x}{2}} = \sum_{(a, b, c) \in T} A_{a, b, c}$. \square

注 上述证明中逆映射的构造可以通过联立方程 $a = \frac{x+y}{2}, b = \frac{y+z}{2}, c = \frac{z+x}{2}$ 解出 $x = a + c - b, y = a + b - c, z = b + c - a$ 得到.

定理 14.4 (关于无限和的 Fubini 定理)

设 $f : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ 是一个使得 $\sum_{(n,m) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}} f(n, m)$ 绝对收敛的函数. 那么

(1)

$$\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} f(n, m) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} f(n, m).$$

(2)

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n f(n, m) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} f(n, m).$$



笔记 这个命题是关于求和号换序的基本结论的推广.

证明

□

例题 14.3 (Putnam A3) 已知 a_0, a_1, \dots, a_n, x 是实数, 且 $0 < x < 1$, 并且满足

$$\frac{a_0}{1-x} + \frac{a_1}{1-x^2} + \dots + \frac{a_n}{1-x^{n+1}} = 0.$$

证明: 存在一个 $0 < y < 1$, 使得

$$a_0 + a_1 y + \dots + a_n y^n = 0.$$

证明 由题意可知, 将 $\frac{1}{1-x^{k+1}}$ ($k = 0, 1, \dots, n$) 根据幂级数展开可得

$$\sum_{k=0}^n \frac{a_k}{1-x^{k+1}} = \sum_{k=0}^n a_k \sum_{i=0}^{+\infty} x^{(k+1)i} = \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^{+\infty} a_k x^{(k+1)i}.$$

又因为 $0 < x < 1$, 所以几何级数 $\sum_{i=0}^{+\infty} x^{(k+1)i}$ 是绝对收敛的. 从而有限个绝对收敛的级数的线性组合 $\sum_{k=0}^n a_k \sum_{i=0}^{+\infty} x^{(k+1)i}$ 也是绝对收敛的. 于是根据关于无限和的 Fubini 定理可得

$$\sum_{k=0}^n \frac{a_k}{1-x^{k+1}} = \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^{+\infty} a_k x^{(k+1)i} = \sum_{i=0}^{+\infty} \sum_{k=0}^n a_k x^{(k+1)i} = \sum_{i=0}^{+\infty} x^i \sum_{k=0}^n a_k x^{ki}.$$

设 $f(y) = a_0 + a_1 y + \dots + a_n y^n = 0$, $y \in (0, 1)$, 则 $f \in \mathbb{C}(0, 1)$. 假设对任意的 $y \in (0, 1)$, 有 $f(y) \neq 0$. 则 f 要么恒为正数, 要么恒为负数. 否则, 存在 $y_1, y_2 \in (0, 1)$, 使得 $f(y_1) > 0, f(y_2) < 0$. 那么由连续函数介值定理可知, 一定存在 $y_0 \in (0, 1)$, 使得 $f(y_0) = 0$. 这与假设矛盾. 因此不失一般性, 我们假设 $f(y) > 0, \forall y \in (0, 1)$. 又由 $0 < x < 1$ 可知 $x^i \in (0, 1)$. 从而

$$\sum_{k=0}^n \frac{a_k}{1-x^{k+1}} = \sum_{i=0}^{+\infty} x^i \sum_{k=0}^n a_k x^{ki} = \sum_{i=0}^{+\infty} x^i f(x^i) > 0.$$

这与题设矛盾. 故原结论成立.

□

14.1.2 裂项求和

定理 14.5 (基本结论)

(1) 当 $a, b \in \mathbb{Z}$ 且 $a \leq b$ 时, 有

$$\sum_{n=a}^b [f(n) - f(n+1)] = f(a) - f(b+1);$$

$$\begin{aligned}\sum_{n=a}^b [f(n+1) - f(n)] &= f(b+1) - f(a); \\ \sum_{n=a}^b [f(n) - f(n-1)] &= f(b) - f(a-1); \\ \sum_{n=a}^b [f(n-1) - f(n)] &= f(a-1) - f(b).\end{aligned}$$

(2) 当 $a, b, m \in \mathbb{Z}$ 且 $a \leq b$ 时, 有

$$\sum_{n=a}^b [f(n+m) - f(n)] = \sum_{n=b+1}^{b+m} f(n) - \sum_{n=a}^{a+m-1} f(n); \quad (14.3)$$

$$\sum_{n=a}^b [f(n) - f(n+m)] = \sum_{n=a}^{a+m-1} f(n) - \sum_{n=b+1}^{b+m} f(n). \quad (14.4)$$



证明 (1) 将求和展开后很容易得到证明.

(2) 因为 (2) 中上下两个式子(14.3)(14.4)互为相反数, 所以我们只证明(14.3)即可.

当 $m \geq 0$ 时, 若 $m \leq b - a$, 则

$$\begin{aligned}\sum_{n=a}^b [f(n+m) - f(n)] &= f(a+m) + \cdots + f(b) + f(b+1) + \cdots + f(b+m) - f(a) - \cdots - f(a+m-1) - f(a+m) - \cdots - f(b) \\ &= f(b+1) + \cdots + f(b+m) - f(a) - \cdots - f(a+m-1) \\ &= \sum_{n=b+1}^{b+m} f(n) - \sum_{n=a}^{a+m-1} f(n)\end{aligned}$$

若 $m > b - a$, 则

$$\begin{aligned}\sum_{n=b+1}^{b+m} f(n) - \sum_{n=a}^{a+m-1} f(n) &= f(b+1) + \cdots + f(a+m-1) + f(a+m) + \cdots + f(b+m) - f(a) - \cdots - f(b) - f(b+1) - \cdots - f(a+m-1) \\ &= f(a+m) + \cdots + f(b+m) - f(a) - \cdots - f(b) \\ &= \sum_{n=a}^b [f(n+m) - f(n)]\end{aligned}$$

综上, 当 $m \geq 0$ 时, 有 $\sum_{n=a}^b [f(n+m) - f(n)] = \sum_{n=b+1}^{b+m} f(n) - \sum_{n=a}^{a+m-1} f(n)$.

当 $m < 0$ 时, 我们有 $-m > 0$, 从而

$$\begin{aligned}\sum_{n=a}^b [f(n+m) - f(n)] &= \sum_{n=a+m}^{b+m} [f(n) - f(n-m)] = - \sum_{n=a+m}^{b+m} [f(n-m) - f(n)] \\ &= - \left(\sum_{n=b+m+1}^{b+m-m} f(n) - \sum_{n=a+m}^{a+m-m-1} f(n) \right) = \sum_{n=a+m}^{a-1} f(n) - \sum_{n=b+m+1}^b f(n) \\ &\stackrel{\text{求和号下限大于上限}}{=} \sum_{n=b+1}^{b+m} f(n) - \sum_{n=a}^{a+m-1} f(n).\end{aligned}$$

综上所述, 结论得证.

□

例题 14.4 1. 对 $m \in \mathbb{N}$, 计算 $\sum_{n=1}^m (\sin n^2 \cdot \sin n)$. 2. 对 $n, m \in \mathbb{N}$, 计算 $\sum_{k=1}^n \frac{1}{k(k+m)}$.

解 1.

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^m (\sin n^2 \cdot \sin n) &\xrightarrow{\text{积化和差公式}} -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^m [\cos(n^2 + n) - \cos(n^2 - n)] \\ &= -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^m [\cos(n(n+1)) - \cos(n(n-1))] \\ &= -\frac{1}{2} [\cos(m(m+1)) - 1] \end{aligned}$$

2.

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k(k+m)} &= \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k+m} \right) \\ &= \frac{1}{m} \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{m} - \frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2} - \cdots - \frac{1}{n+m} \right) \end{aligned}$$

□

14.2 求积符号

定义 14.2 (求积符号)

$$\prod_{k=1}^n a_k \stackrel{\Delta}{=} a_1 a_2 \cdots a_n.$$

♣

定理 14.6 (基本结论)

当 $p, q \in \mathbb{Z}$ 且 $p \leq q$ 时, 有

$$\begin{aligned} \prod_{n=p}^q \frac{a_{n+1}}{a_n} &= \frac{a_{q+1}}{a_p}; \\ \prod_{n=p}^q \frac{a_n}{a_{n+1}} &= \frac{a_p}{a_{q+1}}. \end{aligned}$$

♡

证明 由求积符号定义很容易得到证明.

□

注 对于正数列的乘积, 我们可以通过取对数的方式, 将其转化为 $\ln \prod_{k=1}^n a_k = \sum_{k=1}^n \ln a_k$ 来研究.

例题 14.5 计算: $\prod_{k=2}^n \frac{k^3 - 1}{k^3 + 1}$.

解

$$\begin{aligned} \prod_{k=2}^n \frac{k^3 - 1}{k^3 + 1} &= \prod_{k=2}^n \left(\frac{k-1}{k+1} \cdot \frac{k^2 + k + 1}{k^2 - k + 1} \right) = \prod_{k=2}^n \frac{k-1}{k+1} \cdot \prod_{k=2}^n \frac{k(k+1)+1}{k(k-1)+1} \\ &= \frac{1 \cdot 2 \cdots n-1}{3 \cdot 4 \cdots n+1} \cdot \frac{n(n+1)+1}{2+1} = \frac{2}{n+1} \cdot \frac{n(n+1)+1}{3} \\ &= \frac{2n^2 + 2n + 2}{3n + 3} \end{aligned}$$

□

例题 14.6 证明:

$$\frac{(2n-1)!!}{2n!!} < \frac{1}{\sqrt{2n+1}}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

笔记 利用“糖水”不等式: 对任意真分数 $\frac{b}{a}, a, b, c > 0$, 都有 $\frac{b}{a} < \frac{b+c}{a+c}$ 成立.

证明 根据“糖水”不等式, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 我们有

$$\begin{aligned} \left[\frac{(2n-1)!!}{2n!!} \right]^2 &= \left(\prod_{k=1}^n \frac{2k-1}{2k} \right)^2 = \prod_{k=1}^n \frac{2k-1}{2k} \cdot \prod_{k=1}^n \frac{2k-1}{2k} \\ &< \prod_{k=1}^n \frac{2k-1}{2k} \cdot \prod_{k=1}^n \frac{2k}{2k+1} = \prod_{k=1}^n \frac{2k-1}{2k+1} = \frac{1}{2n+1} \end{aligned}$$

故对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有 $\frac{(2n-1)!!}{2n!!} < \frac{1}{\sqrt{2n+1}}$, $\forall n \in \mathbb{N}$ 成立.

□

第 15 章 未分类习题

15.1 杂题

例题 15.1 设 $Y, x_0, \delta > 0$, 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \int_{x_0 - \delta}^{x_0 + \delta} e^{-nY(x-x_0)^2} dx.$$

证明

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \int_{x_0 - \delta}^{x_0 + \delta} e^{-nY(x-x_0)^2} dx &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \int_{-\delta}^{\delta} e^{-nYx^2} dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{Y}} \int_{-\delta\sqrt{nY}}^{\delta\sqrt{nY}} e^{-x^2} dx \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2}{\sqrt{Y}} \int_0^{\delta\sqrt{nY}} e^{-x^2} dx = \frac{2}{\sqrt{Y}} \int_0^{+\infty} e^{-x^2} dx \\ &= \sqrt{\frac{\pi}{Y}}. \end{aligned}$$

□

例题 15.2 设 $f \in C^3[0, x], x > 0$, 证明: 存在 $\xi \in (0, x)$ 使得

$$\int_0^x f(t) dt = \frac{x}{2}[f(0) + f(x)] - \frac{x^3}{12}f''(\xi). \quad (15.1)$$

若还有 $f'''(0) \neq 0$, 计算 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\xi}{x}$.

笔记 我们当然可以直接用 Lagrange 插值公式得到

$$f(t) = (f(x) - f(0))t + f(0) + f''(\xi)t(t-x), t \in [0, x].$$

两边同时对 t 在 $[0, x]$ 上积分就能得到(15.1)式.

证明 设 $K \in \mathbb{R}$ 使得

$$\int_0^x f(t) dt = \frac{x}{2}[f(0) + f(x)] - \frac{x^3}{12}K,$$

则考虑

$$g(y) \triangleq \int_0^y f(t) dt - \frac{y}{2}[f(0) + f(y)] + \frac{y^3}{12}K,$$

于是

$$g'(y) = f(y) - \frac{1}{2}[f(0) + f(y)] - \frac{yf'(y)}{2} + \frac{y^2K}{4} = \frac{f(y) - f(0)}{2} - \frac{yf'(y)}{2} + \frac{y^2K}{4}$$

以及

$$g''(y) = -\frac{yf''(y)}{2} + \frac{yK}{2}.$$

由 $g(x) = g(0) = 0$ 和罗尔中值定理得 $\xi_1 \in (0, x)$ 使得 $g'(\xi_1) = 0$. 注意到 $g'(0) = 0$. 再次由罗尔中值定理得 $\xi \in (0, x)$ 使得

$$g''(\xi) = -\frac{\xi f''(\xi)}{2} + \frac{\xi K}{2} = 0,$$

即 $K = f''(\xi)$, 这就得到了(15.1)式. 由(15.1)式得

$$f''(\xi) = -12 \frac{\int_0^x f(t) dt - \frac{x}{2}[f(0) + f(x)]}{x^3}$$

由 Lagrange 中值定理得

$$f''(\xi) = f''(0) + f'''(\eta)\xi, \eta \in (0, \xi).$$

于是

$$f'''(\eta) \frac{\xi}{x} = \frac{-12 \frac{\int_0^x f(t) dt - \frac{x}{2} [f(0) + f(x)]}{x^3} - f''(0)}{x}$$

现在利用 L'Hospital 法则就有

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0^+} f'''(\eta) \frac{\xi}{x} &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{-12 \frac{\int_0^x f(t) dt - \frac{x}{2} [f(0) + f(x)]}{x^3} - f''(0)}{x} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{-12 \int_0^x f(t) dt + 6x [f(0) + f(x)] - f''(0)x^3}{x^4} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{-12f(x) + 6[f(x) + f(0)] + 6xf'(x) - 3f''(0)x^2}{4x^3} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{6xf''(x) - 6f''(0)x}{12x^2} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f''(x) - f''(0)}{2x} = \frac{1}{2} f'''(0). \end{aligned}$$

因为 $0 < \eta < \xi < x$, 所以

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f'''(\eta) = f'''(0),$$

我们有

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\xi}{x} = \frac{1}{2}.$$

□

例题 15.3 设 f 是 $[0, +\infty)$ 上的递增正函数. 若 $g \in C^2[0, +\infty)$ 满足

$$g''(x) + f(x)g(x) = 0. \quad (15.2)$$

证明: 存在 $M > 0$ 使得

$$|g(x)| \leq M, \quad |g'(x)| \leq M\sqrt{f(x)}, \quad \forall x > 0. \quad (15.3)$$

证明 对 $\forall x > 0$, 有 f 在 $[0, x]$ 上单调递增, 从而由 **闭区间上单调函数必可积** 可知 $f \in R[0, x]$, $\forall x > 0, f$ 在 $[0, +\infty)$ 上内闭连续. 由(15.2)知

$$\int_0^x g''(y)g'(y) dy + \int_0^x f(y)g'(y)g(y) dy = 0, \forall x > 0 \quad (15.4)$$

利用 f 递增和 **第二积分中值定理** 和 (15.4), 我们有

$$\int_0^x g''(y)g'(y) dy + f(x) \int_{\xi}^x g'(y)g(y) dy = 0, \xi \in [0, x].$$

即

$$\frac{1}{2}|g'(x)|^2 - \frac{1}{2}|g'(0)|^2 + \frac{[f(x)]^2}{2} [g^2(x) - g^2(\xi)] = 0.$$

现在一方面

$$|g'(x)|^2 = |g'(0)|^2 - f(x)g^2(x) + f(x)g^2(\xi) \leq |g'(0)|^2 + f(x)g^2(\xi). \quad (15.5)$$

另外一方面由(15.2)得

$$\frac{g''(x)g'(x)}{f(x)} + g'(x)g(x) = 0, \forall x > 0.$$

即

$$\int_0^x \frac{g''(y)g'(y)}{f(y)} dy + \frac{1}{2}g^2(x) - \frac{1}{2}g^2(0) = 0, \forall x > 0$$

由 f 递增和 **第二积分中值定理**, 我们有

$$\frac{1}{f(0)} \int_0^{\eta} g''(y)g'(y) dy + \frac{1}{2}g^2(x) - \frac{1}{2}g^2(0) = 0, \eta \in [0, x]$$

从而

$$\frac{1}{2f(0)} [|g'(\eta)|^2 - |g'(0)|^2] + \frac{1}{2} g^2(x) - \frac{1}{2} g^2(0) = 0$$

即

$$|g(x)|^2 = g^2(0) - \frac{1}{f(0)} [|g'(\eta)|^2 - |g'(0)|^2] \leq g^2(0) + \frac{|g'(0)|^2}{f(0)}, \forall x > 0. \quad (15.6)$$

由 $g \in C[0, +\infty)$ 知 g 有界, 即存在 $C_1 > 0$, 使得 $|g(x)| < C_1, \forall x > 0$. 于是由(15.5)式知

$$|g'(x)|^2 \leq |g'(0)|^2 + f(x)g^2(\xi) \leq |g'(0)|^2 + C_1 f(x), \forall x > 0. \quad (15.7)$$

又因为 f 是递增正函数, 所以 $f(x) \geq f(0) > 0, \forall x > 0$. 从而存在 $C_2 > 0$, 使得

$$|g'(0)|^2 \leq C_2 f(0) \leq f(x), \forall x > 0.$$

于是取 $M = \max \left\{ C_1 + C_2, g^2(0) + \frac{|g'(0)|^2}{f(0)} \right\}$, 则由(15.7)式和(15.6)式可得, 对 $\forall x > 0$, 有

$$|g(x)|^2 \leq M \leq M^2,$$

$$|g'(x)|^2 \leq C_2 f(x) + C_1 f(x) \leq M f(x) \leq M^2 f(x).$$

进而

$$|g(x)| \leq M, |g'(x)| \leq M \sqrt{f(x)}, \forall x > 0.$$

这就证明了(15.3).

□

例题 15.4 设函数 $f(x)$ 在 $(a, +\infty)$ 上严格单调下降, 证明: 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$.

证明 反证, 假设 $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = c \in (a, +\infty)$, 则存在子列 $\{x_{n_k}\}$, 满足 $x_{n_k} \rightarrow c$. 记

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = A,$$

则 $f(x_n)$ 的子列极限也收敛到 A , 即 $\lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) = A$. 由 $x_{n_k} \rightarrow c$ 知, 存在 $K \in \mathbb{N}$, 使得

$$x_{n_k} \in (c - \delta, c + \delta), \forall k > K.$$

其中 $\delta = \min \left\{ \frac{c - a}{2}, \frac{1}{2} \right\}$. 任取 $x_1, x_2 \in (c + \delta, +\infty)$ 且 $x_1 < x_2$, 则由 f 严格递减知

$$f(x_{n_k}) > f(x_1) > f(x_2) > f(x), \forall x > x_2, \forall k > K.$$

左边令 $k \rightarrow +\infty$, 右边令 $x \rightarrow +\infty$ 得

$$A = \lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) \geq f(x_1) > f(x_2) \geq \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = A,$$

显然矛盾!

□

例题 15.5 设 $\{x_n\} \subset (0, 1)$ 满足对 $i \neq j$, 有 $x_i \neq x_j$, 讨论函数 $f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\operatorname{sgn}(x - x_n)}{2^n}$ 连续性.

证明 由

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{\operatorname{sgn}(x - x_n)}{2^n} \right| \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} < \infty,$$

故级数一致收敛. 注意到对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有 $\operatorname{sgn}(x - x_n)$ 在 $x = x_n$ 处间断, 在 $x \neq x_n$ 处连续.

当 $x \neq x_k, \forall k \in \mathbb{N}$ 时, $f(x)$ 的每一项都连续. 又 $f(x)$ 一致收敛, 故 f 在 $x \neq x_k, \forall k \in \mathbb{N}$ 处都连续.

当 $x = x_k, \forall k \in \mathbb{N}$ 时, 有

$$f(x) = \frac{\operatorname{sgn}(x - x_k)}{2^k} + \sum_{n \neq k} \frac{\operatorname{sgn}(x - x_n)}{2^n}$$

在 $x = x_k$ 处间断. 故 $f(x)$ 在 $x = x_k, \forall k \in \mathbb{N}$ 处都间断.

□

例题 15.6 证明 $\sum_{t=1}^{\infty} (-1)^t \frac{t}{t^2+x}$ 在 $x \in [0, +\infty)$ 一致收敛性.

证明 由 Abel 变换得, 对 $\forall m \in \mathbb{N}, \forall x \geq 0$ 成立

$$\begin{aligned} \sum_{t=m}^{\infty} (-1)^t \frac{t}{t^2+x} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{t=m}^n (-1)^t \frac{t}{t^2+x} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\sum_{t=m}^{n-1} \left(\frac{t}{t^2+x} - \frac{t+1}{(t+1)^2+x} \right) s_t + \frac{n}{n^2+x} s_n \right] \\ &= \sum_{t=m}^{\infty} \left(\frac{t}{t^2+x} - \frac{t+1}{(t+1)^2+x} \right) s_t \\ &= \sum_{t=m}^{\infty} \frac{t^2+t}{(x+t^2)(x+t^2+2t+1)} s_t - \sum_{t=m}^{\infty} \frac{x}{(x+t^2)(x+t^2+2t+1)} s_t, \end{aligned}$$

这里 $s_t = \sum_{i=1}^t (-1)^i = (-1)^t \in \{1, -1\}$. 一方面

$$\left| \sum_{t=m}^{\infty} \frac{t^2+t}{(x+t^2)(x+t^2+2t+1)} s_t \right| \leq \sum_{t=m}^{\infty} \frac{t^2+t}{t^2(t^2+2t+1)},$$

另外一方面

$$\left| \sum_{t=m}^{\infty} \frac{x}{(x+t^2)(x+t^2+2t+1)} s_t \right| \leq \sum_{t=m}^{\infty} \frac{1}{t^2+t+1}.$$

而由 $\sum_{t=1}^{\infty} \frac{t^2+t}{t^2(t^2+2t+1)}$ 和 $\sum_{t=1}^{\infty} \frac{1}{t^2+t+1}$ 都收敛知

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{t=m}^{\infty} \frac{1}{t^2+t+1} = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{t=m}^{\infty} \frac{t^2+t}{t^2(t^2+2t+1)} = 0.$$

于是我们有

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{t=m}^{\infty} (-1)^t \frac{t}{t^2+x} = 0, \text{ 关于 } x \in [0, +\infty) \text{ 一致},$$

这就证明了 $\sum_{t=1}^{\infty} (-1)^t \frac{t}{t^2+x}$ 在 $x \in [0, +\infty)$ 一致收敛.

□

命题 15.1

设 $f(x)$ 是 $[a, b]$ 上连续实值右可导函数, 记 $D^+f(x)$ 为 $f(x)$ 的右导函数, 如果 $f(a) = 0$, 且 $D^+f(x) \leq 0$, 则 $f(x) \leq 0, x \in [a, b]$.

◆

证明 (1) 先假定 $D^+f(x) < 0$, 如果结论不成立, 则存在 $x_1 \in (a, b)$, 使 $f(x_1) > 0$. 记

$$x_0 = \inf\{x \mid f(x) > 0\}.$$

由 x_0 的定义, 我们有序列 $\{x_n\}$, 使 x_n 单调递减趋于 x_0 , 且 $f(x_n) > 0$. 从而由 $f(x)$ 的连续性知

$$f(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) \geq 0. \quad (15.8)$$

根据 x_0 的定义可知, 对 $\forall x < x_0$, 都有 $f(x) < f(x_0)$, 否则与下确界定义矛盾! 于是有序列 $\{x'_n\}$ 单调递增趋于 x_0 , 且 $f(x'_n)$. 于是由 $f(x)$ 的连续性知

$$f(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(x'_n) \leq 0. \quad (15.9)$$

故由(15.8)(15.9)知 $f(x_0) = 0$. 于是

$$D^+f(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(x_n) - f(x_0)}{x_n - x_0} \geq 0,$$

这与 $D^+f(x_0) < 0$ 矛盾, 于是 $f(x) \leq 0, x \in [a, b]$.

(2) 若 $D^+f(x) \leq 0$, 对任给的 $\varepsilon > 0$ 构造函数

$$f_\varepsilon(x) = f(x) - \varepsilon(x - a),$$

对 $f_\varepsilon(x)$ 有 $f_\varepsilon(a) = 0$ 且

$$D^+f_\varepsilon(x) \leq -\varepsilon < 0.$$

从而由 (1) 得 $f_\varepsilon(x) \leq 0, x \in [a, b]$. 因此 $f(x) \leq \varepsilon(x - a) \leq \varepsilon(b - a)$, 由 ε 的任意性, 得 $f(x) \leq 0, x \in [a, b]$. \square

例题 15.7 设 $\varphi(x)$ 是 $[a, b]$ 上连续且右可导的函数, 如果 $D^+\varphi(x)$ 在 $[a, b)$ 上连续, 证明: $\varphi(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续可导, $\varphi'(x) = D^+\varphi(x)$.

证明 设

$$f(x) = \varphi(a) + \int_a^x D^+\varphi(t)dt - \varphi(x), \quad x \in [a, b].$$

则 $f(x)$ 在 $[a, b)$ 上连续且右可导, 并且

$$D^+f(x) = D^+\varphi(x) - D^+\varphi(x) = 0.$$

又 $f(a) = 0$, 由**命题 15.1** 得 $f(x) \leq 0$. 又 $-f(x)$ 满足 $-f(a) = 0, D^+[-f(x)] = 0$, 同理由**命题 15.1** 得 $-f(x) \leq 0$, 故 $f(x) = 0$. 于是

$$\varphi(x) = \varphi(a) + \int_a^x D^+\varphi(t)dt.$$

由 $D^+\varphi(x)$ 的连续性, 得 $\varphi'(x) = D^+\varphi(x)$. \square

例题 15.8 证明:

$$\sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{\sin \frac{k\pi}{n}} = \frac{2n}{\pi} (\ln 2n + \gamma - \ln \pi) + o(1).$$

证明 见here. \square

例题 15.9 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n (-1)^k C_n^k \ln k}{\ln(\ln n)} = 1$.

证明 证法一: 对任意充分大的 n , 由Frullani(傅汝兰尼)积分知

$$\ln k = \int_0^{+\infty} \frac{e^{-x} - e^{kx}}{x} dx.$$

再结合二项式定理可得

$$\begin{aligned} A &\triangleq \sum_{k=1}^n (-1)^k C_n^k \ln k = \sum_{k=1}^n \left[(-1)^k C_n^k \left(\int_0^{+\infty} \frac{e^{-x} - e^{-kx}}{x} dx \right) \right] = \int_0^{+\infty} \frac{\sum_{k=1}^n (-1)^k C_n^k (e^{-x} - e^{-kx})}{x} dx \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{\sum_{k=1}^n (-1)^k C_n^k (e^{-x} - e^{-kx})}{x} dx = \int_0^{+\infty} \frac{1 - e^{-x} + \sum_{k=0}^n (-1)^k C_n^k (e^{-x} - e^{-kx})}{x} dx \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{1 - e^{-x} + e^{-x} \sum_{k=0}^n (-1)^k C_n^k - \sum_{k=0}^n (-1)^k C_n^k e^{-kx}}{x} dx = \int_0^{+\infty} \frac{1 - e^{-x} + e^{-x} (1 - 1)^n - (1 - e^{-x})^n}{x} dx \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{1 - e^{-x} - (1 - e^{-x})^n}{x} dx. \end{aligned}$$

由Bernoulli 不等式知

$$(1 - e^{-x})^n \geq 1 - ne^{-x}.$$

取 $M_n > 1$, 满足 $M_n e^{M_n} = n$. 于是

$$0 \leq \int_{M_n}^{+\infty} \frac{1 - e^{-x} - (1 - e^{-x})^n}{x} dx \leq \int_{M_n}^{+\infty} \frac{1 - e^{-x} - (1 - ne^{-x})}{M_n} dx = \frac{n}{M_n} \int_{M_n}^{+\infty} e^{-x} dx = \frac{n}{M_n e^{M_n}} = 1.$$

从而

$$A = \int_0^{M_n} \frac{1 - e^{-x} - (1 - e^{-x})^n}{x} dx + \int_{M_n}^{+\infty} \frac{1 - e^{-x} - (1 - e^{-x})^n}{x} dx = \int_0^{M_n} \frac{1 - e^{-x} - (1 - e^{-x})^n}{x} dx + O(1). \quad (15.10)$$

因为 $M_n e^{M_n} = n$, 所以由命题 2.4 知

$$M_n = \ln n + o(\ln n), n \rightarrow \infty. \quad (15.11)$$

于是

$$(1 - e^{-x})^{n-1} = e^{(n-1)\ln(1-e^{-x})} \leq e^{-(n-1)e^{-x}} \leq e^{-(n-1)e^{-M_n}} = e^{-\frac{M_n(n-1)}{n}} \rightarrow 0, \forall x \in [0, M_n].$$

从而

$$\frac{\int_0^{M_n} \frac{(1-e^{-x})^n}{x} dx}{\int_0^{M_n} \frac{1-e^{-x}}{x} dx} \leq \frac{e^{-\frac{M_n(n-1)}{n}} \int_0^{M_n} \frac{1-e^{-x}}{x} dx}{\int_0^{M_n} \frac{1-e^{-x}}{x} dx} = e^{-\frac{M_n(n-1)}{n}} \rightarrow 0, n \rightarrow \infty.$$

即 $\int_0^{M_n} \frac{(1-e^{-x})^n}{x} dx = o\left(\int_0^{M_n} \frac{1-e^{-x}}{x} dx\right), n \rightarrow \infty$. 故

$$\int_0^{M_n} \frac{1 - e^{-x} - (1 - e^{-x})^n}{x} dx = \int_0^{M_n} \frac{1 - e^{-x}}{x} dx - \int_0^{M_n} \frac{(1 - e^{-x})^n}{x} dx = (1 + o(1)) \int_0^{M_n} \frac{1 - e^{-x}}{x} dx, n \rightarrow \infty. \quad (15.12)$$

注意到

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - e^{-x}}{x} \xrightarrow{\text{L'Hospital}} \lim_{x \rightarrow 0} e^x = 1,$$

故 $\frac{1 - e^{-x}}{x}$ 在 $[0, 1]$ 上有界, 进而 $\int_0^1 \frac{1 - e^{-x}}{x} dx = O(1)$. 又注意到

$$\int_1^{M_n} \frac{-e^{-x}}{x} dx \leq -e^{-M_n} \int_1^{M_n} \frac{1}{x} dx \rightarrow 0, n \rightarrow \infty,$$

故 $\int_1^{M_n} \frac{-e^{-x}}{x} dx = O(1)$. 于是再结合(15.11)式可知

$$\begin{aligned} \int_0^{M_n} \frac{1 - e^{-x}}{x} dx &= \int_0^1 \frac{1 - e^{-x}}{x} dx + \int_1^{M_n} \frac{-e^{-x}}{x} dx + \int_1^{M_n} \frac{1}{x} dx \\ &= O(1) + \ln M_n = \ln(\ln n + o(\ln n)) + O(1) \\ &= \ln \ln n + o(1) + O(1) = \ln \ln n + O(1), n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

因此再由(15.12)式可知

$$\int_0^{M_n} \frac{1 - e^{-x} - (1 - e^{-x})^n}{x} dx = (1 + o(1)) \int_0^{M_n} \frac{1 - e^{-x}}{x} dx = (1 + o(1))(\ln \ln n + O(1)) = \ln \ln n + o(\ln \ln n), n \rightarrow \infty.$$

故由(15.10)可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n (-1)^k C_n^k \ln k}{\ln(\ln n)} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{A}{\ln(\ln n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^{M_n} \frac{1 - e^{-x} - (1 - e^{-x})^n}{x} dx + O(1)}{\ln(\ln n)} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \ln n + o(\ln \ln n) + O(1)}{\ln(\ln n)} = 1. \end{aligned}$$

证法二: 注意到

$$\begin{aligned} S &\triangleq \sum_{k=1}^n (-1)^k \binom{n}{k} \ln k = \sum_{k=1}^n (-1)^k \left[\binom{n-1}{k} + \binom{n-1}{k-1} \right] \ln k \\ &= \sum_{k=1}^n (-1)^k \binom{n-1}{k} \ln k + \sum_{k=1}^n (-1)^k \binom{n-1}{k-1} \ln k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} \ln k + \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^{k+1} \binom{n-1}{k} \ln(k+1) \\
&= \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} \ln k + \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^{k+1} \binom{n-1}{k} \ln(k+1) \\
&= - \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} (\ln(k+1) - \ln k) \\
&= - \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} \int_0^1 \frac{1}{k+x} dx.
\end{aligned}$$

又由二项式定理可知

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} \frac{1}{k+y} &= \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} \int_0^1 t^{k+y-1} dt = \int_0^1 \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} t^{k+y-1} dt \\
&= \int_0^1 t^{y-1} \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} t^k dt = \int_0^1 t^{y-1} [(1-t)^{n-1} - 1] dt.
\end{aligned}$$

故

$$\begin{aligned}
S &= - \int_0^1 \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} \frac{1}{k+y} dy = \int_0^1 \int_0^1 t^{y-1} [1 - (1-t)^{n-1}] dt dy \\
&= \int_0^1 \int_0^1 t^{y-1} [1 - (1-t)^{n-1}] dy dt = \int_0^1 \frac{t-1}{t \ln t} [1 - (1-t)^{n-1}] dt \\
&\stackrel{t=e^{-x}}{=} \int_0^{+\infty} \frac{(1-e^{-x}) [1 - (1-e^{-x})^{n-1}]}{x} dx.
\end{aligned}$$

后续估阶与证法一相同.

证法三:注意到

$$\begin{aligned}
S &\triangleq \sum_{k=1}^n (-1)^k \binom{n}{k} \ln k = \sum_{k=1}^n (-1)^k \left[\binom{n-1}{k} + \binom{n-1}{k-1} \right] \ln k \\
&= \sum_{k=1}^n (-1)^k \binom{n-1}{k} \ln k + \sum_{k=1}^n (-1)^k \binom{n-1}{k-1} \ln k \\
&= \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} \ln k + \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^{k+1} \binom{n-1}{k} \ln(k+1) \\
&= \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} \ln k + \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^{k+1} \binom{n-1}{k} \ln(k+1) \\
&= - \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} (\ln(k+1) - \ln k) \\
&= - \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} \int_0^1 \frac{1}{k+x} dx \\
&= - \int_0^1 \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} \frac{1}{k+x} dx \\
&= \int_0^1 \left(\frac{1}{x} - \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k \binom{n-1}{k} \frac{1}{k+x} \right) dx \\
&\stackrel{\text{命題 A.3}}{=} \int_0^1 \left(\frac{1}{x} - \frac{(n-1)!}{x(x+1)\cdots(x+(n-1))} \right) dx \\
&= \int_0^1 \frac{1}{x} \left(1 - \frac{(n-1)!}{(x+1)(x+2)\cdots(x+(n-1))} \right) dx
\end{aligned}$$

$$= \int_0^1 \frac{1}{x} \left(1 - \frac{1}{(1+x)(1+\frac{x}{2}) \cdots (1+\frac{x}{n-1})} \right) dx.$$

由命题(3)(4)知

$$e^{x^2-x} \geq \frac{1}{1+x} \geq e^{-x}, \forall x > 0.$$

于是

$$e^{x^2-x} \cdot e^{(\frac{x}{2})^2-\frac{x}{2}} \cdots e^{(\frac{x}{n-1})^2-\frac{x}{n-1}} \geq \frac{1}{(1+x)(1+\frac{x}{2}) \cdots (1+\frac{x}{n-1})} \geq e^{-x} \cdot e^{-\frac{x}{2}} \cdots e^{-\frac{x}{n-1}},$$

即

$$e^{x^2 \left(1 + \frac{1}{2^2} + \cdots + \frac{1}{(n-1)^2} \right) - x \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n-1} \right)} \geq \frac{1}{(1+x)(1+\frac{x}{2}) \cdots (1+\frac{x}{n-1})} \geq e^{-x \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n-1} \right)}.$$

注意到

$$x^2 \left(1 + \frac{1}{2^2} + \cdots + \frac{1}{(n-1)^2} \right) \leq x \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} = \frac{\pi^2}{6} x < 2x, \forall x \in [0, 1],$$

故

$$e^{-x \left(-2 + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{j} \right)} \geq \frac{1}{(1+x)(1+\frac{x}{2}) \cdots (1+\frac{x}{n-1})} \geq e^{-x \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{j}}.$$

从而由连续函数 e^{-x} 的介值性知, 存在 $C_n \in \left[-2 + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{j}, \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{j} \right]$, 使得

$$\frac{1}{(1+x)(1+\frac{x}{2}) \cdots (1+\frac{x}{n-1})} = e^{-C_n x}.$$

于是由 $-2 + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{j} \leq C_n \leq \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{j}$ 知

$$C_n = \ln n + O(1), n \rightarrow \infty.$$

因此

$$\begin{aligned} S &= \int_0^1 \frac{1}{x} \left(1 - \frac{1}{(1+x)(1+\frac{x}{2}) \cdots (1+\frac{x}{n-1})} \right) dx = \int_0^1 \frac{1}{x} (1 - e^{-C_n x}) dx \\ &= \int_0^{C_n} \frac{1 - e^{-t}}{t} dt = \int_0^1 \frac{1 - e^{-t}}{t} dt + \int_1^{C_n} \frac{1 - e^{-t}}{t} dt + \int_1^{C_n} \frac{1}{t} dt. \end{aligned}$$

注意到

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{1 - e^{-t}}{t} \xrightarrow{\text{L'Hospital}} \lim_{t \rightarrow 0} e^t = 1,$$

故 $\frac{1 - e^{-t}}{t}$ 在 $[0, 1]$ 上有界, 进而 $\int_0^1 \frac{1 - e^{-t}}{t} dt = O(1)$. 又注意到

$$\int_1^{C_n} \frac{1 - e^{-t}}{t} dt \leq 1 - e^{-C_n} = 1 - e^{-\ln n + O(1)} \rightarrow 1, n \rightarrow \infty,$$

故 $\int_1^{C_n} \frac{1 - e^{-t}}{t} dt = O(1)$. 从而

$$\begin{aligned} S &= \int_0^1 \frac{1 - e^{-t}}{t} dt + \int_1^{C_n} \frac{1 - e^{-t}}{t} dt + \int_1^{C_n} \frac{1}{t} dt = \ln C_n + O(1) \\ &= \ln(\ln n + O(1)) + O(1) = \ln \ln n + O(1), n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

因此

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n (-1)^k \binom{n}{k} \ln k}{\ln \ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S}{\ln \ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \ln n + O(1)}{\ln \ln n} = 1.$$

□

例题 15.10 已知 $f(x) \in C[a, b]$, 且

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^b x f(x) dx = 0.$$

证明: $f(x)$ 在 (a, b) 上至少 2 个零点.

证明 设 $F_1(x) = \int_a^x f(t) dt$, 则 $F_1(a) = F_1(b) = 0$. 再设 $F_2(x) = \int_a^x F_1(t) dt = \int_a^x \left[\int_a^t f(s) ds \right] dt$, 则 $F_2(a) = 0, F_2'(x) = F_1(x), F_2''(x) = F_1'(x) = f(x)$. 由条件可知

$$0 = \int_a^b x f(x) dx = \int_a^b x F_1'(x) dx = \int_a^b x dF_1(x) = x F_1(x) \Big|_a^b - \int_a^b F_1(x) dx = -F_2(b).$$

于是由 Rolle 中值定理可知, 存在 $\xi \in (a, b)$, 使得 $F_2'(\xi) = F_1(\xi) = 0$. 从而再由 Rolle 中值定理可知, 存在 $\eta_1 \in (a, \xi), \eta_2 \in (\xi, b)$, 使得 $F_1'(\eta_1) = F_1'(\eta_2) = 0$. 即 $f(\eta_1) = f(\eta_2) = 0$.

□

命题 15.2

已知 $f(x) \in C[a, b]$, 且

$$\int_a^b x^k f(x) dx = 0, k = 0, 1, 2, \dots, n.$$

证明: $f(x)$ 在 (a, b) 上至少 $n+1$ 个零点.

◆



笔记 利用分部积分转换导数的技巧或匹配零点, 得到不变号的被积函数.

证明 证法一: 令 $F(x) = \int_a^x \int_a^{x_n} \cdots \int_a^{x_2} \left[\int_a^{x_1} f(x_1) dx_1 \right] dx_2 \cdots dx_n$, 则 $F(a) = F'(a) = \cdots = F^{(n)}(a) = 0, F^{(n+1)}(x) = f(x)$. 由已知条件, 再反复分部积分, 可得当 $1 \leq k \leq n$ 且 $k \in \mathbb{N}$ 时, 有

$$\begin{aligned} 0 &= \int_a^b f(x) dx = \int_a^b F^{(n+1)}(x) dx = F^{(n)}(x) \Big|_a^b = F^{(n)}(b), \\ 0 &= \int_a^b x f(x) dx = \int_a^b x F^{(n+1)}(x) dx = \int_a^b x dF^{(n)}(x) = x F^{(n)}(x) \Big|_a^b - \int_a^b F^{(n)}(x) dx = -F^{(n-1)}(b), \\ &\dots \\ 0 &= \int_a^b x^n f(x) dx = \int_a^b x^n F^{(n+1)}(x) dx = \int_a^b x^n dF^{(n)}(x) = x^n F^{(n)}(x) \Big|_a^b - n \int_a^b x^{n-1} F^{(n)}(x) dx \\ &= -n \int_a^b x^{n-1} F^{(n)}(x) dx = \cdots = (-1)^n n! \int_a^b F'(x) dx = (-1)^n n! F(b). \end{aligned}$$

从而 $F(b) = F'(b) = \cdots = F^{(n)}(b) = 0$. 于是由 Rolle 中值定理可知, 存在 $\xi_1^1 \in (a, b)$, 使得 $F'(\xi_1^1) = 0$. 再利用 Rolle 中值定理可知存在 $\xi_1^2, \xi_2^2 \in (a, b)$, 使得 $F''(\xi_1^2) = F''(\xi_2^2) = 0$. 反复利用 Rolle 中值定理可得, 存在 $\xi_1^{n+1}, \xi_2^{n+1}, \dots, \xi_{n+1}^{n+1} \in (a, b)$, 使得 $F^{(n+1)}(\xi_1^{n+1}) = F^{(n+1)}(\xi_2^{n+1}) = \cdots = F^{(n+1)}(\xi_{n+1}^{n+1}) = 0$. 即 $f(\xi_1^{n+1}) = f(\xi_2^{n+1}) = \cdots = f(\xi_{n+1}^{n+1}) = 0$.

证法二: 假设 f 在 (a, b) 上只有 $s \leq n$ 个不同的零点 $a < x_1 < x_2 < \cdots < x_s < b$. 由 f 的介值性知, f 在 $(x_{i-1}, x_i), i = 1, 2, \dots, s$ 上不变号. 不妨设 f 在相邻两个区间变号, 否则把这两个区间合并. 现在

$$(x - x_1)(x - x_2) \cdots (x - x_s) f(x)$$

在 $[a, b]$ 上不变号. 又由条件得

$$\int_a^b (x - x_1)(x - x_2) \cdots (x - x_s) f(x) dx = 0,$$

故 $f(x) = 0, \forall x \in [a, b]$. 这与 f 在 (a, b) 上只有 s 个不同的零点矛盾! 故结论得证.

□

例题 15.11 设

$$f \in C[a, b], \int_a^b f(x) e^{kx} dx = 0, k = 1, 2, \dots, n+1,$$

证明: f 在 (a, b) 至少有 $n + 1$ 个不同零点.

证明 注意到

$$\int_a^b f(x) e^{kx} dx \stackrel{x=\ln t}{=} \int_{e^a}^{e^b} f(\ln t) t^{k-1} dt = 0, \forall k = 1, 2, \dots, n+1.$$

即

$$\int_{e^a}^{e^b} f(\ln t) t^k dt = 0, \forall k = 0, 1, \dots, n.$$

且 $f(\ln t) \in C[e^a, e^b]$, 故由 [命题 15.2](#) 知 $f(\ln t)$ 在 (e^a, e^b) 上至少有 $n + 1$ 个不同零点. 因此 f 在 (a, b) 上至少有 $n + 1$ 个不同零点.

□

例题 15.12 已知 $f(x) \in D^2[0, 1]$, 且

$$\int_0^1 f(x) dx = \frac{1}{6}, \int_0^1 x f(x) dx = 0, \int_0^1 x^2 f(x) dx = \frac{1}{60}.$$

证明: 存在 $\xi \in (0, 1)$, 使得 $f''(\xi) = 16$.

 **笔记** 构造 $g(x) = f(x) - (8x^2 - 9x + 2)$ 的原因: 受到 [上一题](#) 的启发, 我们希望找到一个 $g(x) = f(x) - p(x)$, 使得

$$\int_0^1 x^k g(x) dx = \int_0^1 x^k [f(x) - p(x)] dx = 0, \quad k = 0, 1, 2.$$

成立. 即

$$\int_0^1 x^k f(x) dx = \int_0^1 x^k p(x) dx, \quad k = 0, 1, 2.$$

待定 $p(x) = ax^2 + bx + c$, 则代入上述公式, 再结合已知条件可得

$$\begin{aligned} \frac{1}{6} &= \int_0^1 p(x) dx = \int_0^1 (ax^2 + bx + c) dx = \frac{a}{3} + \frac{b}{2} + c, \\ 0 &= \int_0^1 x p(x) dx = \int_0^1 (ax^3 + bx^2 + cx) dx = \frac{a}{4} + \frac{b}{3} + \frac{c}{2}, \\ \frac{1}{60} &= \int_0^1 x^2 p(x) dx = \int_0^1 (ax^4 + bx^3 + cx^2) dx = \frac{a}{5} + \frac{b}{4} + \frac{c}{3}. \end{aligned}$$

解得: $a = 8, b = -9, c = 2$. 于是就得到 $g(x) = f(x) - (8x^2 - 9x + 2)$.

证明 令 $g(x) = f(x) - (8x^2 - 9x + 2)$, 则由条件可得

$$\int_0^1 x^k g(x) dx = 0, \quad k = 0, 1, 2.$$

再令 $G(x) = \int_0^x \left[\int_0^t \left(\int_0^s g(y) dy \right) ds \right] dt$, 则 $G(0) = G'(0) = G''(0) = 0, G'''(x) = g(x)$. 利用分部积分可得

$$\begin{aligned} 0 &= \int_0^1 g(x) dx = \int_0^1 G'''(x) dx = G''(1), \\ 0 &= \int_0^1 x g(x) dx = \int_0^1 x G'''(x) dx = \int_0^1 x dG''(x) = x G''(x) \Big|_0^1 - \int_0^1 G''(x) dx = -G'(1), \\ 0 &= \int_0^1 x^2 g(x) dx = \int_0^1 x^2 G'''(x) dx = \int_0^1 x^2 dG''(x) = x^2 G''(x) \Big|_0^1 - 2 \int_0^1 x G''(x) dx \\ &= -2 \int_0^1 x dG'(x) = 2 \int_0^1 G'(x) dx - 2x G'(x) \Big|_0^1 = 2G(1). \end{aligned}$$

从而 $G(1) = G'(1) = G''(1) = 0$. 于是由 [Rolle](#) 中值定理可知, 存在 $\xi_1^1 \in (0, 1)$, 使得 $G'(\xi_1^1) = 0$. 再利用 [Rolle](#) 中值定理可知, 存在 $\xi_1^2, \xi_2^2 \in (0, 1)$, 使得 $G''(\xi_1^2) = G''(\xi_2^2) = 0$. 反复利用 [Rolle](#) 中值定理可得, 存在 $\xi_1^3, \xi_2^3, \xi_3^3 \in (0, 1)$, 使得 $G'''(\xi_1^3) = G'''(\xi_2^3) = G'''(\xi_3^3) = 0$. 即 $g(\xi_1^3) = g(\xi_2^3) = g(\xi_3^3) = 0$. 再反复利用 [Rolle](#) 中值定理可得, 存在 $\xi \in (0, 1)$, 使得 $g''(\xi) = 0$. 即 $f''(\xi) = 16$.

□

例题 15.13 设

$$x_n = \int_0^1 \ln(1+x+\cdots+x^n) \cdot \ln \frac{1}{1-x} dx, n=1,2,\dots$$

(1) 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 2$.

(2) 计算: $\lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{n}{\ln n} (2 - x_n) \right]$.

证明

(1) 注意到

$$x_n = \int_0^1 \ln \frac{1-x^{n+1}}{1-x} \cdot \ln \frac{1}{1-x} dx,$$

于是

$$\begin{aligned} \int_0^1 \left| \ln \frac{1-x^{n+1}}{1-x} \cdot \ln \frac{1}{1-x} \right| dx &\leq \int_0^1 \ln^2 \frac{1}{1-x} dx = \int_0^1 \ln^2 x dx \\ &\stackrel{\text{分部积分}}{=} -2 \int_0^1 \ln x dx \stackrel{\text{分部积分}}{=} 2. \end{aligned}$$

从而由控制收敛定理

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \int_0^1 \lim_{n \rightarrow \infty} \ln \frac{1-x^{n+1}}{1-x} \cdot \ln \frac{1}{1-x} dx = \int_0^1 \ln^2 \frac{1}{1-x} dx = \int_0^1 \ln^2 x dx = 2.$$

(2) 注意到

$$\begin{aligned} x_n &= \int_0^1 \ln(1-x^{n+1}) \cdot \ln \frac{1}{1-x} dx + \int_0^1 \ln^2 \frac{1}{1-x} dx \\ &= \int_0^1 \ln(1-x^{n+1}) \cdot \ln \frac{1}{1-x} dx + 2, \end{aligned}$$

从而

$$\begin{aligned} 2 - x_n &= - \int_0^1 \ln(1-x^{n+1}) \cdot \ln \frac{1}{1-x} dx \\ &\stackrel{x=e^{-\frac{y}{n+1}}}{=} \frac{1}{n+1} \int_0^{+\infty} \ln(1-e^{-y}) \cdot \ln \left(1-e^{-\frac{y}{n+1}}\right) \cdot e^{-\frac{y}{n+1}} dy \\ &= \frac{1}{n+1} \int_0^{+\infty} \ln(1-e^{-y}) \cdot \ln \left(\frac{1-e^{-\frac{y}{n+1}}}{\frac{y}{n+1}}\right) \cdot e^{-\frac{y}{n+1}} dy \\ &\quad + \frac{1}{n+1} \int_0^{+\infty} \ln(1-e^{-y}) \cdot \ln y \cdot e^{-\frac{y}{n+1}} dy \\ &\quad - \frac{\ln(n+1)}{n+1} \int_0^{+\infty} \ln(1-e^{-y}) e^{-\frac{y}{n+1}} dy. \end{aligned} \tag{15.13}$$

注意到

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \left(e^{-x} \ln \frac{1-e^x}{x} \right) &= \lim_{x \rightarrow 0} \left(\ln \frac{1-e^x}{x} \right) = \ln \left(\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1-e^x}{x} \right) \stackrel{\text{L'Hospital's rule}}{=} \ln 1 = 0, \\ \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(e^{-x} \ln \frac{1-e^x}{x} \right) &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln(1-e^x) - \ln x}{e^x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln(1-e^x)}{e^x} \stackrel{\text{L'Hospital's rule}}{=} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{1-e^x} = 0. \end{aligned}$$

故存在 $M > 0$, 使得

$$\left| e^{-x} \ln \frac{1-e^x}{x} \right| \leq M, \forall y \in (0, +\infty).$$

因此

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{+\infty} \ln(1-e^{-y}) \cdot \ln \left(\frac{1-e^{-\frac{y}{n+1}}}{\frac{y}{n+1}} \right) \cdot e^{-\frac{y}{n+1}} dy &= \int_0^{+\infty} \lim_{n \rightarrow \infty} \ln(1-e^{-y}) \cdot \ln \left(\frac{1-e^{-\frac{y}{n+1}}}{\frac{y}{n+1}} \right) \cdot e^{-\frac{y}{n+1}} dy \\ &= \int_0^{+\infty} \ln(1-e^{-y}) \cdot 0 \cdot 1 dy = 0. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{+\infty} \ln(1 - e^{-y}) \cdot \ln y \cdot e^{-\frac{y}{n+1}} dy &= \int_0^{+\infty} \lim_{n \rightarrow \infty} \ln(1 - e^{-y}) \cdot \ln y \cdot e^{-\frac{y}{n+1}} dy \\
&= \int_0^{+\infty} \ln(1 - e^{-y}) \cdot \ln y dy \xrightarrow{x=e^{-y}} - \int_0^1 \ln(1 - x) dx \\
&= \int_0^1 \ln x dx = 1.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{+\infty} \ln(1 - e^{-y}) e^{-\frac{y}{n+1}} dy &= \int_0^{+\infty} \lim_{n \rightarrow \infty} \ln(1 - e^{-y}) e^{-\frac{y}{n+1}} dy \\
&= \int_0^{+\infty} \ln(1 - e^{-y}) dy = - \int_0^{+\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-ny}}{n} dy \\
&= - \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{+\infty} \frac{e^{-ny}}{n} dy = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = -\frac{\pi^2}{6}.
\end{aligned}$$

故再由(15.13)式可得

$$\begin{aligned}
\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\ln n} (2 - x_n) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{(n+1) \ln n} \int_0^{+\infty} \ln(1 - e^{-y}) \cdot \ln \left(\frac{1 - e^{-\frac{y}{n+1}}}{\frac{y}{n+1}} \right) \cdot e^{-\frac{y}{n+1}} dy \\
&\quad + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{(n+1) \ln n} \int_0^{+\infty} \ln(1 - e^{-y}) \cdot \ln y \cdot e^{-\frac{y}{n+1}} dy \\
&\quad - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \ln(n+1)}{(n+1) \ln n} \int_0^{+\infty} \ln(1 - e^{-y}) e^{-\frac{y}{n+1}} dy \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{+\infty} \ln(1 - e^{-y}) e^{-\frac{y}{n+1}} dy \\
&= \frac{\pi^2}{6}.
\end{aligned}$$

□

例题 15.14 设 f 在 $[0, +\infty)$ 的任意闭区间上 Riemann 可积. 对于 $x \geq 0$, 定义 $F(x) = \int_0^x t^\alpha f(t+x) dt$.

(1) 若 $\alpha \in (-1, 0)$ 且 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = A$, 证明: F 在 $[0, +\infty)$ 上一致连续.

(2) 若 $\alpha \in (0, 1)$, f 以 $T > 0$ 为周期, $\int_0^T f(t) dt = 2022$. 证明: F 在 $[0, +\infty)$ 上非一致连续.

笔记 本题(1)中的 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = A$ 可以削弱为 $\exists M, X > 0$, 使得 $|f(x)| \leq M, x \in [X, +\infty)$.

证明

(1) 由于 f 在 $[0, +\infty)$ 的任意闭区间上 Riemann 可积且 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = A$, 所以 $\exists M > 0$, 使得

$$|f(x)| \leq M, \forall x \in [0, +\infty).$$

对 $\forall \varepsilon > 0$, 取 $\delta = \left[\frac{(\alpha+1)\varepsilon}{3M} \right]^{\frac{1}{\alpha+1}}$, 则当 $0 \leq x < \delta$ 时, 有

$$x^{\alpha+1} - y^{\alpha+1} < \delta^{1+\alpha}.$$

当 $x \geq \delta$ 时, 有

$$\begin{aligned}
x^{\alpha+1} - y^{\alpha+1} &= \frac{x - y}{\left[(x^{\alpha+1})^{\frac{1}{\alpha+1}-1} + (x^{\alpha+1})^{\frac{1}{\alpha+1}-2} y^{\alpha+1} + \dots + (y^{\alpha+1})^{\frac{1}{\alpha+1}-1} \right]} \\
&< \frac{\delta}{(x^{\alpha+1})^{\frac{1}{\alpha+1}-1}} < \frac{\delta}{(\delta^{\alpha+1})^{\frac{1}{\alpha+1}-1}} = \delta^{1+\alpha}.
\end{aligned}$$

因此对 $\forall x, y \in [0, +\infty)$ 且 $0 < x - y < \delta$, 都有

$$x^{\alpha+1} - y^{\alpha+1} < \delta^{1+\alpha}.$$

从而对 $\forall x, y \in [0, +\infty)$ 且 $0 < x - y < \delta$, 都有

$$\begin{aligned}
 |F(x) - F(y)| &= \left| \int_0^x t^\alpha f(t+y) dt - \int_0^y t^\alpha f(t+x) dt \right| = \left| \int_x^{2x} (t-x)^\alpha f(t) dt - \int_y^{2y} (t-y)^\alpha f(t) dt \right| \\
 &= \left| \int_{2y}^{2x} (t-x)^\alpha f(t) dt - \int_y^x (t-y)^\alpha f(t) dt + \int_x^{2y} [(t-x)^\alpha - (t-y)^\alpha] f(t) dt \right| \\
 &\leq \int_{2y}^{2x} (t-x)^\alpha |f(t)| dt + \int_y^x (t-y)^\alpha |f(t)| dt + \int_x^{2y} [(t-x)^\alpha - (t-y)^\alpha] |f(t)| dt \\
 &\leq M \left[\int_{2y}^{2x} (t-x)^\alpha dt + \int_y^x (t-y)^\alpha dt + \int_x^{2y} [(t-x)^\alpha - (t-y)^\alpha] dt \right] \\
 &= \frac{M}{\alpha+1} [x^{\alpha+1} - (2y-x)^{\alpha+1} + (x-y)^{\alpha+1} + (2y-x)^{\alpha+1} - y^{\alpha+1} + (x-y)^{\alpha+1}] \\
 &= \frac{M}{\alpha+1} (x^{\alpha+1} - y^{\alpha+1} + 2(x-y)^{\alpha+1}) \\
 &< \frac{3M}{\alpha+1} \delta^{1+\alpha} < \varepsilon.
 \end{aligned}$$

故 F 在 $[0, +\infty)$ 上一致连续.

(2) 假设 $F(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上一致连续. 那么存在 $a, b > 0$, 使得 $F(x) < a|x| + b$.

从而 $\left| \frac{F(x)}{x^{\alpha+1}} \right| < \frac{a|x| + b}{|x|^{\alpha+1}}$, 进而 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{F(x)}{x^{\alpha+1}} = 0$.

于是

$$\begin{aligned}
 \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{F(x)}{x^{\alpha+1}} &= \frac{\int_0^x t^\alpha f(t+x) dt}{x^{\alpha+1}} \xrightarrow{\text{换元}} \frac{\int_x^{2x} (t-x)^\alpha f(t) dt}{x^{\alpha+1}} \xrightarrow{\text{换元}} \frac{\int_1^2 x^{\alpha+1} (t-1)^\alpha f(tx) dt}{x^{\alpha+1}} \\
 &\xrightarrow{\text{Riemann 引理}} \int_1^2 (t-1)^\alpha f(tx) dt = \frac{1}{T} \int_0^T f(x) dt \int_1^2 (t-1)^\alpha dt = 0
 \end{aligned}$$

再结合 $\int_1^2 (t-1)^\alpha dt > 0$, 知 $\int_0^T f(x) dt = 0$.

现在有

$$\begin{aligned}
 F(x) &= \int_0^x t^\alpha f(t+x) dt = \int_0^x t^\alpha d \left[\int_0^{x+t} f(y) dy \right] \\
 &\xrightarrow{\text{分部积分}} x^\alpha \int_0^{2x} f(y) dy - \alpha \int_0^x t^{\alpha-1} \left[\int_0^{x+t} f(y) dy \right] dt \\
 &= x^\alpha \int_0^{2x} f(y) dy - \alpha \int_0^x t^{\alpha-1} F(x+t) dt
 \end{aligned}$$

设 $G(x) = \int_0^x f(x) dt$, 则由 f 在 $[0, +\infty)$ 的任意闭区间上 Riemann 可积知, $G \in C[0, +\infty)$. 又由 $\int_0^T f(x) dt = 0$, 得

$$G(x+T) - G(x) = \int_0^x f(x+T) dt - \int_0^x f(x) dt = \int_x^{x+T} f(x) dt = \int_0^T f(x) dt = 0$$

因为连续的周期函数必有界, 所以 $G(x)$ 有界.

又 $\alpha - 1 \in (-1, 0)$, 故由 (1) 可得, $-\alpha \int_0^x t^{\alpha-1} F(x+t) dt$ 在 $[0, +\infty)$ 上一致连续.

下面证明 $x^\alpha \int_0^{2x} f(y) dy$ 不一致连续.

由于 $G(2x)$ 在 $\left[0, \frac{T}{2}\right]$ 上连续, 所以由连续函数最大、最小值定理知

记 $M = \max_{x \in [0, \frac{T}{2}]} G(2x)$, 则存在 $x_2 \in \left[0, \frac{T}{2}\right]$, 使得 $M = G(2x_2) \geq G(2x), x \in \left[0, \frac{T}{2}\right]$.

又因为 $G(3) = \int_0^3 f(t) dt = 2022$, 且 $G(2x)$ 以 $\frac{T}{2}$ 为周期, 所以存在 $x_1 \in \left[0, \frac{T}{2}\right]$, 使得 $G(2x_1) = G(3) > 0$.

因此, $M = G(2x_2) \geq G(2x_1) = G(3) = \int_0^3 f(t) dt > 0$.

构造数集 $E = \left\{ x' \in \left[0, \frac{T}{2}\right] \mid G(2x') = M \right\}$, 由 $x_2 \in E$ 知, $E \neq \emptyset$. 又因为 E 有界, 所以由确界存在定理知, E 必有上确界, 取 $x_0 = \sup E$.

假设 $x_0 \notin E$, 取 $\varepsilon_0 = \frac{1}{2} |G(2x_0) - M|$, 则 $\varepsilon_0 > 0$, 否则 $x_0 \in E$ 矛盾.

从而 $\forall \delta' > 0, \exists x_{\delta'} \in E$, 使得 $x_0 - \delta' < x_{\delta'} < x_0$, 都有 $|G(2x_0) - G(2x_{\delta'})| \geq \varepsilon_0$.

这与 $G(2x)$ 在闭区间 $\left[0, \frac{T}{2}\right]$ 上连续, 进而一致连续矛盾. 故 $x_0 \in E$.

任取 $\delta \in \left(0, \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} - x_0\right)\right)$, 则 $G(2x_0 + \delta) < M = G(2x_0)$, 否则与 $x_0 = \sup E$ 矛盾.

进而 $\left| \int_{2x_0}^{2x_0 + \delta} f(y) dy \right| = |G(2x_0 + \delta) - G(2x_0)| > 0$.

从而当 $n > \left(\frac{2}{\delta}\right)^{\frac{2}{\alpha}}$ 时, 由积分中值定理, 得

存在 $\xi_n \in \left(2x_0, 2x_0 + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)$, 使得

$$\left| \int_{2x_0}^{2x_0 + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}} f(y) dy \right| = \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}} |f(\xi_n)| > 0 \quad (15.14)$$

又因为 f 在 $[0, +\infty)$ 的任意闭区间上 Riemann 可积, 所以 f 在 $\left(2x_0, 2x_0 + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)$ 上有界.

于是存在 $K, L > 0$, 使得

$$K \leq |f(\xi_n)| \leq L \quad (15.15)$$

取数列 $\{x_n\}$ 、 $\{y_n\}$, 其中 $x_n = x_0 + n \frac{T}{2}$, $y_n = x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}$, $n \in \mathbb{N}_+$. 并且 $\lim_{n \rightarrow +\infty} (x_n - y_n) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right) = 0$.

由拉格朗日中值定理, 得对 $\forall n \in \mathbb{N}_+$,

存在 $\xi_n \in \left(x_0 + n \frac{T}{2}, x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)$, 使得 $\left(x_0 + n \frac{T}{2}\right)^\alpha - \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)^\alpha = \frac{2\alpha}{n^{\frac{\alpha}{2}}} \xi_n^{\alpha-1}$

从而

$$\frac{2\alpha}{n^{\frac{\alpha}{2}}} \left(x_0 + n \frac{T}{2}\right)^{\alpha-1} \leq \frac{2\alpha}{n^{\frac{\alpha}{2}}} \xi_n^{\alpha-1} \leq \frac{2\alpha}{n^{\frac{\alpha}{2}}} \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)^{\alpha-1}$$

令 $n \rightarrow +\infty$, 有 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left[\left(x_0 + n \frac{T}{2}\right)^\alpha - \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)^\alpha \right] = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{2\alpha}{n^{\frac{\alpha}{2}}} \xi_n^{\alpha-1} = 0$.

于是存在 $N > 0$, 使得 $\forall n > N$, 有

$$\left(x_0 + n \frac{T}{2}\right)^\alpha - \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)^\alpha < \frac{\varepsilon}{\int_0^{2x_0} f(y) dy} \quad (15.16)$$

现在, 当 $n > \max \left\{ N, \left(\frac{2}{\delta}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \right\}$ 时, 结合(15.14)(15.15)(15.16), 我们有

$$\begin{aligned} & \left| x_n^\alpha \int_0^{2x_n} f(y) dy - y_n^\alpha \int_0^{2y_n} f(y) dy \right| \\ &= \left| \left(x_0 + n \frac{T}{2}\right)^\alpha \int_0^{2(x_0 + n \frac{T}{2})} f(y) dy - \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)^\alpha \int_0^{2(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}})} f(y) dy \right| \\ &= \left| \left(x_0 + n \frac{T}{2}\right)^\alpha \int_0^{2(x_0 + n \frac{T}{2})} f(y) dy - \left[\left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)^\alpha \int_0^{2(x_0 + n \frac{T}{2})} f(y) dy + \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)^\alpha \int_{2(x_0 + n \frac{T}{2})}^{2(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}})} f(y) dy \right] \right| \\ &= \left| \left[\left(x_0 + n \frac{T}{2}\right)^\alpha - \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)^\alpha \right] \int_0^{2(x_0 + n \frac{T}{2})} f(y) dy - \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)^\alpha \int_{2(x_0 + n \frac{T}{2})}^{2(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}})} f(y) dy \right| \\ &\geq \left| \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)^\alpha \int_{2(x_0 + n \frac{T}{2})}^{2(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}})} f(y) dy \right| - \left| \left[\left(x_0 + n \frac{T}{2}\right)^\alpha - \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}\right)^\alpha \right] \int_0^{2(x_0 + n \frac{T}{2})} f(y) dy \right| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left| \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}} \right)^\alpha \int_{2x_0}^{2x_0 + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}}} f(y) dy \right| - \left| \left[\left(x_0 + n \frac{T}{2} \right)^\alpha - \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}} \right)^\alpha \right] \int_0^{2x_0} f(y) dy \right| \\
&= \left| \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}} \right)^\alpha \right| \cdot \left| \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}} f(\xi_n) \right| - \left| \left[\left(x_0 + n \frac{T}{2} \right)^\alpha - \left(x_0 + n \frac{T}{2} + \frac{2}{n^{\frac{\alpha}{2}}} \right)^\alpha \right] \int_0^{2x_0} f(y) dy \right| \\
&\geq 2 \left(\frac{T}{2} \right)^\alpha |f(\xi_n)| \cdot n^{\frac{\alpha}{2}} - \varepsilon \\
&\geq 2 \left(\frac{T}{2} \right)^\alpha K \cdot n^{\frac{\alpha}{2}} - \varepsilon
\end{aligned}$$

令 $n \rightarrow +\infty$, 有 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(x_n^\alpha \int_0^{2x_n} f(y) dy - y_n^\alpha \int_0^{2y_n} f(y) dy \right) = +\infty$. 故 $x^\alpha \int_0^{2x} f(y) dy$ 在 $[0, +\infty)$ 上非一致连续.

这与 $F(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上一致连续矛盾. 因此, F 在 $[0, +\infty)$ 上非一致连续.

□

例题 15.15 计算

$$\lim_{t \rightarrow 1^-} (1-t) \left(\frac{t}{1+t} + \frac{t^2}{1+t^2} + \cdots + \frac{t^n}{1+t^n} + \cdots \right)$$

解 对 $\forall t \in (0, 1)$, 一方面, 我们有

$$(1-t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{t^k}{1+t^k} = \sum_{k=1}^{\infty} \int_{t^{k+1}}^{t^k} \frac{1}{1+t^k} dx \leq \sum_{k=1}^{\infty} \int_{t^{k+1}}^{t^k} \frac{1}{1+x} dx = \int_0^t \frac{1}{1+x} dx = \ln(1+t)$$

另一方面, 我们有

$$(1-t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{t^k}{1+t^k} = \sum_{k=1}^{\infty} \int_{t^k}^{t^{k-1}} \frac{t}{1+t^k} dx \geq \sum_{k=1}^{\infty} \int_{t^k}^{t^{k-1}} \frac{t}{1+x} dx = \int_0^1 \frac{t}{1+x} dx = t \ln 2.$$

故

$$\ln 2 = \lim_{t \rightarrow 1^-} [\ln(1+t)] \leq \lim_{t \rightarrow 1^-} (1-t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{t^k}{1+t^k} \leq \lim_{t \rightarrow 1^-} (t \ln 2) = \ln 2.$$

□

例题 15.16 计算极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^n \frac{dx}{1+n^2 \cos^2 x}$.

解 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 存在 $t_n \in \mathbb{N}$, 使得 $(t_n + 1)\pi < n < (t_n + 2)\pi$. 从而 $n - 7 < t_n \pi < n$, $\forall n \in \mathbb{N}$. 于是 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{t_n}{n} = \frac{1}{\pi}$. 现在我们有

$$\begin{aligned}
\int_0^n \frac{dx}{1+n^2 \cos^2 x} &= \sum_{k=0}^{t_n} \int_{k\pi}^{(k+1)\pi} \frac{dx}{1+n^2 \cos^2 x} + \int_{(t_n+1)\pi}^n \frac{dx}{1+n^2 \cos^2 x} \\
&= \sum_{k=0}^{t_n} \int_0^\pi \frac{dx}{1+n^2 \cos^2(x+k\pi)} + \int_0^{n-(t_n+1)\pi} \frac{dx}{1+n^2 \cos^2(x+(t_n+1)\pi)} \\
&= t_n \int_0^\pi \frac{dx}{1+n^2 \cos^2 x} + \int_0^{n-(t_n+1)\pi} \frac{dx}{1+n^2 \cos^2 x}.
\end{aligned} \tag{15.17}$$

注意到对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$\begin{aligned}
\left| \frac{1}{1+n^2 \cos^2 x} \right| &\leq \frac{1}{1+\cos^2 x}, \\
n \left| \frac{1}{1+n^2 \cos^2 x} - \frac{1}{1+n^2 x^2} \right| &= \left| \frac{n^3 (x^2 - \cos^2 x)}{(1+n^2 \cos^2 x)(1+n^2 x^2)} \right| \\
&\leq \left| \frac{n^3 (x^2 - \cos^2 x)}{n^4 x^2 \cos^2 x} \right| \leq \frac{|x^2 - \cos^2 x|}{x^2 \cos^2 x},
\end{aligned}$$

故由控制收敛定理知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{n-(t_n+1)\pi} \frac{dx}{1+n^2 \cos^2 x} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{dx}{1+n^2 \cos^2 x} = \int_0^\pi \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{dx}{1+n^2 \cos^2 x} = 0, \tag{15.18}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^\pi \left(\frac{1}{1+n^2 \cos^2 x} - \frac{1}{1+n^2 x^2} \right) dx = \int_0^\pi \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{1+n^2 \cos^2 x} - \frac{n}{1+n^2 x^2} \right) dx = 0.$$

因此

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} t_n \int_0^\pi \frac{dx}{1+n^2 \cos^2 x} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{t_n}{n} \cdot n \int_0^\pi \frac{dx}{1+n^2 \cos^2 x} \\ &= \frac{1}{\pi} \lim_{n \rightarrow \infty} \left[n \int_0^\pi \frac{1}{1+n^2 x^2} + n \int_0^\pi \left(\frac{1}{1+n^2 \cos^2 x} - \frac{1}{1+n^2 x^2} \right) dx \right] \\ &= \frac{1}{\pi} \lim_{n \rightarrow \infty} n \int_0^\pi \frac{dx}{1+n^2 x^2} = \frac{1}{\pi} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{n\pi} \frac{dx}{1+x^2} = 1. \end{aligned} \quad (15.19)$$

综上, 由(15.17)(15.18)(15.19)式知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^n \frac{dx}{1+n^2 \cos^2 x} = 1.$$

□

例题 15.17 计算积分 $\int_0^{+\infty} \frac{x - x^2 + x^3 - x^4 + \cdots - x^{2018}}{(1+x)^{2021}} dx$.

证明 注意到对 $\forall k \in [1, 2018] \cap \mathbb{N}$, 都有

$$\int_0^{+\infty} \frac{x^k}{(1+x)^{2021}} dx \stackrel{t=\frac{1}{x}}{=} \int_0^{+\infty} \frac{t^{2018-k}}{(1+t)^{2021}} dt = \int_0^{+\infty} \frac{x^{2018-k}}{(1+x)^{2021}} dx.$$

故

$$\int_0^{+\infty} \frac{x^k - x^{2018-k}}{(1+x)^{2021}} dx = 0, \quad \forall k \in [1, 2018] \cap \mathbb{N}.$$

因此

$$\int_0^{+\infty} \frac{x - x^2 + x^3 - x^4 + \cdots - x^{2018}}{(1+x)^{2021}} dx = 0.$$

□

例题 15.18 设 $I(f) = \int_0^\pi (\sin x - f(x))f(x) dx$, 求当遍历 $[0, \pi]$ 上所有连续函数 f 时 $I(f)$ 的最大值.

解 对函数配方, 有

$$(\sin x - f(x))f(x) = - \left(f(x) - \frac{\sin x}{2} \right)^2 + \frac{\sin^2 x}{4}.$$

代入积分式, 得

$$\begin{aligned} I(f) &= \int_0^\pi \frac{\sin^2 x}{4} dx - \int_0^\pi \left(f(x) - \frac{\sin x}{2} \right)^2 dx \\ &= \frac{\pi}{8} - \int_0^\pi \left(f(x) - \frac{\sin x}{2} \right)^2 dx. \end{aligned}$$

故当 $f(x) = \frac{\sin x}{2}$ 时, $I(f)$ 取得最大值 $\frac{\pi}{8}$.

□

例题 15.19 设 $\alpha > 1$, $\Gamma_k = \left[k^\alpha, \left(k + \frac{1}{2} \right)^\alpha \right) \cap \mathbb{N}$ ($k \geq 1$). 试判断级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 和 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 的敛散性, 其中

$$a_n = \begin{cases} \frac{1}{n}, & \text{存在 } k \text{ 使得 } n = \min \Gamma_k, \\ \frac{1}{n^\alpha}, & \text{其他,} \end{cases} \quad b_n = \begin{cases} \frac{1}{n}, & \text{存在 } k \text{ 使得 } n \in \Gamma_k, \\ \frac{1}{n^\alpha}, & \text{其他.} \end{cases}$$

证明 由 $\alpha > 1$ 和条件直接可得

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n = \sum_{\substack{n \neq \min \Gamma_k, \\ \forall k \in \mathbb{N}}}^{\infty} \frac{1}{n^\alpha} + \sum_{\substack{\exists k \in \mathbb{N}, \\ n = \min \Gamma_k}}^{\infty} \frac{1}{n} \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^\alpha} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\min \Gamma_k} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^\alpha} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^\alpha} < \infty.$$

注意到

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n = \sum_{n \notin \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \Gamma_k}^{\infty} \frac{1}{n^\alpha} + \sum_{n \in \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \Gamma_k}^{\infty} \frac{1}{n} = \sum_{n \notin \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \Gamma_k}^{\infty} \frac{1}{n^\alpha} + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n \in \Gamma_k} \frac{1}{n}$$

$$\geq \sum_{n \notin \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \Gamma_k}^{\infty} \frac{1}{n^\alpha} + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n \in \Gamma_k} \frac{1}{(k + \frac{1}{2})^\alpha}. \quad (15.20)$$

记 N_k 为 Γ_k 所含元素的个数, 则

$$\lfloor \left(k + \frac{1}{2} \right)^\alpha - k^\alpha \rfloor \leq N_k < \lfloor \left(k + \frac{1}{2} \right)^\alpha - k^\alpha \rfloor + 1, \quad \forall k \in \mathbb{N}.$$

再结合 Lagrange 中值定理知

$$N_k \sim \left(k + \frac{1}{2} \right)^\alpha - k^\alpha \sim \frac{\alpha}{2} k^{\alpha-1}, \quad k \rightarrow \infty.$$

而

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\frac{\alpha}{2} k^{\alpha-1}}{\left(k + \frac{1}{2} \right)^\alpha} \geq \frac{\alpha}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^{\alpha-1}}{2^\alpha k^\alpha} = \frac{\alpha}{2^{\alpha+1}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} = +\infty.$$

因此

$$\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n \in \Gamma_k} \frac{1}{\left(k + \frac{1}{2} \right)^\alpha} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{N_k}{\left(k + \frac{1}{2} \right)^\alpha} = +\infty.$$

故由 (15.20) 式知 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 发散.

□

例题 15.20 证明:

$$(1) \lim_{\alpha \rightarrow 0^+} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{n^{1+\alpha}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{n};$$

$$(2) \text{计算 } \lim_{\alpha \rightarrow 0^+} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n}{n^\alpha}, \text{ 并说明理由.}$$

证明

(1) 注意到对 $\forall \alpha \geq 0$, 都有

$$\left| \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{n^{1+\alpha}} \right| \leq \frac{|\cos(n + \frac{1}{2})|}{n},$$

并且对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 有

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \cos\left(k + \frac{1}{2}\right) &= \frac{\sum_{k=1}^n 2 \sin \frac{1}{2} \cos\left(k + \frac{1}{2}\right)}{2 \sin \frac{1}{2}} = \frac{\sum_{k=1}^n [\sin(k+1) - \sin k]}{2 \sin \frac{1}{2}} \\ &= \frac{\sin(n+1) - \sin 1}{2 \sin \frac{1}{2}} \leq \frac{1}{\sin \frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

故由 Dirichlet 判别法知 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{n}$ 收敛, 因此 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{n^{1+\alpha}}$ 关于 $\alpha \geq 0$ 一致收敛. 从而

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0^+} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{n^{1+\alpha}} = \sum_{n=1}^{\infty} \lim_{\alpha \rightarrow 0^+} \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{n^{1+\alpha}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{n}.$$

(2) 注意到对 $\forall \alpha \in (0, 1)$, 都有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n}{n^\alpha} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \frac{1}{2} \sin n}{2n^\alpha \sin \frac{1}{2}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n - \frac{1}{2}) - \cos(n + \frac{1}{2})}{2n^\alpha \sin \frac{1}{2}} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n - \frac{1}{2})}{2n^\alpha \sin \frac{1}{2}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{2n^\alpha \sin \frac{1}{2}} \\ &= \frac{\cos \frac{1}{2}}{2 \sin \frac{1}{2}} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\cos(n - \frac{1}{2})}{2n^\alpha \sin \frac{1}{2}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{2n^\alpha \sin \frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\cos \frac{1}{2}}{2 \sin \frac{1}{2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{2(n+1)^{\alpha} \sin \frac{1}{2}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{2n^{\alpha} \sin \frac{1}{2}} \\
&= \frac{\cos \frac{1}{2}}{2 \sin \frac{1}{2}} + \frac{1}{2 \sin \frac{1}{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{(n+1)^{\alpha}} - \frac{1}{n^{\alpha}} \right] \cos \left(n + \frac{1}{2} \right).
\end{aligned}$$

由 Lagrange 中值定理知, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 存在 $\xi \in (n, n+1)$, 使得

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{(n+1)^{\alpha}} - \frac{1}{n^{\alpha}} \right] \cos \left(n + \frac{1}{2} \right) = -\alpha \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{\xi^{1+\alpha}} \leq \alpha \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\cos(n + \frac{1}{2})|}{n^{1+\alpha}}.$$

于是再结合 (1) 的结论可得

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0^+} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{(n+1)^{\alpha}} - \frac{1}{n^{\alpha}} \right] \cos \left(n + \frac{1}{2} \right) = -\lim_{\alpha \rightarrow 0^+} \alpha \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n + \frac{1}{2})}{\xi^{1+\alpha}} = 0.$$

故

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0^+} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n}{n^{\alpha}} = \frac{\cos \frac{1}{2}}{2 \sin \frac{1}{2}}.$$

□

例题 15.21 计算广义积分 $\int_1^{+\infty} \frac{(x)}{x^3} dx$, 这里 (x) 表示 x 的小数部分 (例如: 当 n 为正整数且 $x \in [n, n+1)$ 时, 则 $(x) = x - n$).

证明 注意到 (x) 是周期为 1 的函数, 并且在 $[0, 1)$ 上恒有 $(x) = x$. 因此

$$\begin{aligned}
\int_1^{+\infty} \frac{(x)}{x^3} dx &= \sum_{k=1}^{\infty} \int_k^{k+1} \frac{(x)}{x^3} dx = \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^1 \frac{(x+k)}{(x+k)^3} dx \\
&= \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^1 \frac{(x)}{(x+k)^3} dx = \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^1 \frac{x}{(x+k)^3} dx \\
&= \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^1 \left[\frac{1}{(x+k)^2} - \frac{k}{(x+k)^3} \right] dx \\
&= \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1}{k} - \frac{1}{k+1} + \frac{1}{2} \left(\frac{k}{(1+k)^2} - \frac{1}{k} \right) \right] \\
&= \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1}{2k} - \frac{1}{2(k+1)} + \frac{1}{2} \left(\frac{k}{(1+k)^2} - \frac{1}{1+k} \right) \right] \\
&= \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1}{2k} - \frac{1}{2(k+1)} - \frac{1}{2(1+k)^2} \right] \\
&= \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1}{2k} - \frac{1}{2(k+1)} \right] - \frac{1}{2} \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{k^2} \\
&= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} - 1 \right) \\
&= 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi^2}{6} = 1 - \frac{\pi^2}{12}.
\end{aligned}$$

□

例题 15.22 设 $f(x)$ 在 \mathbb{R} 上连续, 且 $g(x) = f(x) \int_0^x f(t) dt$ 单调递减, 证明 $f(x) \equiv 0$.

证明 证法一: 令 $F(x) = \int_0^x f(t) dt, G(x) = \frac{F^2(x)}{2}$, 则

$$g(x) = F(x) F'(x) = \left[\frac{F^2(x)}{2} \right]' = G'(x),$$

由条件知 $g(x) = G'(x)$ 单调递减, 故 $G(x)$ 是上凸函数. 注意到 $G'(0) = g(0) = 0$, 由 g 递减知, $G'(x) = g(x) \leq 0$.

$0, \forall x > 0$. 从而 $G(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上递减. 故

$$0 \leq G(x) = \frac{F^2(x)}{2} \leq G(0) = 0.$$

因此 $G(x) = 0, \forall x \geq 0$. 于是 $F(x) \equiv 0$, 故 $f(x) = F'(x) = 0, \forall x \geq 0$.

证法二: 证明: 若 $\exists X_0 > 0$, s.t. $f(X_0) \neq 0$. 不妨设 $f(X_0) > 0$, 则由 g 递减知

$$g(X_0) = f(X_0) \int_0^{X_0} f(t) dt \leq g(0) = 0 \Rightarrow \int_0^{X_0} f(t) dt \leq 0.$$

从而由积分中值定理知, $\exists \xi \in (0, X_0)$, s.t. $f(\xi) \leq 0$ 于是由介值定理知, $\exists x_1 \in (0, X_0)$, s.t. $f(x_1) = 0$. 记

$$x_2 \triangleq \sup\{x \in [x_1, X_0] \mid f(x) = 0\}.$$

则 $f(x) > 0, \forall x \in (x_2, X_0)$, 否则,

$$\exists \eta \in (x_2, X_0), \text{s.t. } f(\eta) \leq 0.$$

由介值定理知, $\exists \eta' \in (x_2, X_0)$, s.t. $f(\eta') = 0$. 这与上确界定义矛盾! 再记 $f(x') = \max_{x \in [x_2, X_0]} f(x)$, 任取 $x_3 \in (x_2, x')$. 则 $f(x_3) > 0$, 进而 $\int_{x_3}^{x'} f(t) dt > 0$. 于是

$$\begin{aligned} g(x_3) &= f(x_3) \int_0^{x_3} f(t) dt < f(x') \left(\int_0^{x_3} f(t) dt + \int_{x_3}^{x'} f(t) dt \right) \\ &= f(x') \int_0^{x'} f(t) dt = g(x'). \end{aligned}$$

这与 g 递减矛盾! 故 $f(x) = 0, \forall x > 0$. 同理可得 $f(x) = 0, \forall x < 0$. 再由 f 的连续性可知 $f(0) = 0$, 故 $f(x) \equiv 0$.

□

例题 15.23 设 $f \in C^1[0, +\infty)$ 满足

$$|f(x)| \leq e^{-\sqrt{x}}, f'(x) = -3f(x) + 6f(2x), \forall x \geq 0.$$

证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3^n}{n!} \int_0^\infty x^n f(x) dx < \infty.$$

并且证明

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3^n}{n!} \int_0^\infty x^n f(x) dx = 0$$

的充要条件是 $\int_0^\infty f(x) dx = 0$.

证明 由 $f'(x) = -3f(x) + 6f(2x)$ 可得

$$\begin{aligned} I_n &\triangleq \frac{3^n}{n!} \int_0^\infty x^n f(x) dx \xrightarrow{\text{分部积分}} -\frac{3^n}{(n+1)!} \int_0^\infty x^{n+1} f'(x) dx \\ &= \frac{3^{n+1}}{(n+1)!} \int_0^\infty x^{n+1} [f(x) - 2f(2x)] dx \\ &= \frac{3^{n+1}}{(n+1)!} \left[\int_0^\infty x^{n+1} f(x) dx - 2 \int_0^\infty x^{n+1} f(2x) dx \right] \\ &= \frac{3^{n+1}}{(n+1)!} \left[\int_0^\infty x^{n+1} f(x) dx - \frac{1}{2^{n+1}} \int_0^\infty x^{n+1} f(x) dx \right] \\ &= \frac{2^{n+1} - 1}{2^{n+1}} \cdot \frac{3^{n+1}}{(n+1)!} \int_0^\infty x^{n+1} f(x) dx = \frac{2^{n+1} - 1}{2^{n+1}} \cdot I_{n+1}. \end{aligned}$$

故

$$I_{n+1} = \frac{2^{n+1}}{2^{n+1} - 1} I_n, \forall n \in \mathbb{N}.$$

从而对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$I_n = \frac{2^n}{2^n - 1} I_{n-1} = \cdots = \frac{2^n}{2^n - 1} \cdot \frac{2^{n-1}}{2^{n-1} - 1} \cdots \frac{2}{2 - 1} I_0 = I_0 \prod_{k=1}^n \frac{2^k}{(2^k - 1)}.$$

注意到

$$\sum_{k=1}^n \ln \left(1 - \frac{1}{2^k} \right) \geq \sum_{k=1}^n \left(-\frac{2}{2^k} \right) = -2 \cdot \frac{1 - \frac{1}{2^n}}{1 - \frac{1}{2}} = -4 \left(1 - \frac{1}{2^n} \right), \forall n \in \mathbb{N}.$$

因此对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$\prod_{k=1}^n \frac{2^k}{(2^k - 1)} = \frac{1}{\prod_{k=1}^n \left(1 - \frac{1}{2^k} \right)} = e^{-\sum_{k=1}^n \ln \left(1 - \frac{1}{2^k} \right)} \leq e^{4(1 - \frac{1}{2^n})} \leq e^4.$$

故 $\prod_{k=1}^{\infty} \frac{2^k}{(2^k - 1)}$ 收敛. 于是

$$0 = \lim_{n \rightarrow \infty} I_n = I_0 \prod_{k=1}^{\infty} \frac{2^k}{(2^k - 1)} \iff I_0 = 0.$$

□

例题 15.24 设连续函数 $g : [0, +\infty) \rightarrow (0, +\infty)$ 满足 g 单调递减. 设

$$x_0 > 0, x_{n+1} = x_n + g(x_n), n = 0, 1, 2, \dots,$$

以及 $x \in D^1[0, +\infty)$ 满足

$$x(0) = x_0, x'(t) = g(x(t)), \forall t \geq 0.$$

证明

$$x_n = x(n) + O(1), n \rightarrow \infty.$$

证明 由条件可知

$$x_{n+1} - x_n = g(x_n) > 0, \quad x'(t) = g(x(t)) > 0.$$

故 $\{x_n\}$ 严格递增, $x(t)$ 在 $[0, +\infty)$ 上也严格递增. 由条件知 $x_0 \geq x(0)$, 假设 $x_n \geq x(n)$, 则由条件知

$$n = \int_0^n \frac{x'(t)}{g(x(t))} dt = \int_{x(0)}^{x(n)} \frac{1}{g(t)} dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots.$$

从而

$$\int_{x(0)}^{x_{n+1}} \frac{1}{g(t)} dt = \int_{x(0)}^{x_n} \frac{1}{g(t)} dt + \int_{x_n}^{x_{n+1}} \frac{1}{g(t)} dt \geq n + \frac{x_{n+1} - x_n}{g(x_n)} = n + 1 = \int_{x(0)}^{x(n+1)} \frac{1}{g(t)} dt.$$

又因为 g 非负, 所以 $x_{n+1} \geq x(n+1)$. 故由数学归纳法知, $x_n \geq x(n), \forall n \in \mathbb{N}$. 于是

$$\begin{aligned} x_n &= x_0 + \sum_{k=0}^{n-1} (x_{k+1} - x_k) = x_0 + \sum_{k=0}^{n-1} g(x_k) = x_0 + g(x_0) + \sum_{k=1}^{n-1} \int_{k-1}^k g(x_k) dt \\ &\leq x_0 + g(x_0) + \sum_{k=1}^{n-1} \int_{k-1}^k g(x(t)) dt = x_0 + g(x_0) + \int_0^{n-1} g(x(t)) dt \\ &= x_0 + g(x_0) + \int_0^{n-1} x'(t) dt = x_0 + g(x_0) + x(n-1) \\ &< x_0 + g(x_0) + x(n). \end{aligned}$$

故

$$x(n) \leq x_n \leq x(n) + x_0 + g(x_0) \iff x_n = x(n) + O(1), \quad n \rightarrow \infty.$$

□

例题 15.25 设 $\gamma : [0, 1] \rightarrow [0, 1]^2$ 是连续满射且满足对某个 $\alpha \in (0, 1)$ 有

$$|\gamma(s) - \gamma(t)| \leq M|s - t|^\alpha, \forall s, t \in [0, 1].$$

证明: $\alpha \leq \frac{1}{2}$.

证明 记

$$B_k \triangleq \left\{ x \in \mathbb{R}^2 : \left| x - \gamma \left(\frac{k}{n} \right) \right| \leq \frac{M}{n^\alpha} \right\}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, n-1.$$

对 $\forall x \in [0, 1]$, 存在 $k \in [0, n-1] \cap \mathbb{N}$, 使得 $x \in \left[\frac{k-1}{n}, \frac{k}{n} \right]$. 由条件可知

$$\left| \gamma(x) - \gamma \left(\frac{k}{n} \right) \right| \leq M \left| x - \frac{k}{n} \right|^\alpha \leq \frac{M}{n^\alpha} \Rightarrow \gamma(x) \in B_k.$$

故 γ 的值域 $[0, 1]^2 \subseteq \bigcup_{k=0}^{n-1} B_k$. 于是

$$1 \leq S \left(\bigcup_{k=0}^{n-1} B_k \right) \leq \sum_{k=0}^{n-1} S(B_k) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\pi M^2}{n^{2\alpha}} = \frac{\pi M^2}{n^{2\alpha-1}}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

因此 $\alpha \leq \frac{1}{2}$.

□

例题 15.26 设 $f \in D^2(\mathbb{R})$ 满足对某个 $M > 0$ 成立

$$0 < f(x) < M, \forall x \in \mathbb{R}.$$

证明存在 $\xi \in \mathbb{R}$ 使得

$$f(\xi)f''(\xi) + 2[f'(\xi)]^2 = 0.$$

证明 注意到

$$(f^3(x))'' = 3f(x) [f''(x)f(x) + 2[f'(x)]^2].$$

若 ξ 不存在, 则 $(f^3(x))''$ 不变号, 从而 $f^3(x)$ 是上凸或者下凸函数. 但是无穷区间上的有界凸函数必为常函数, 因此 f 为常值函数, 这就和 ξ 不存在矛盾! 现在我们知道存在 $\xi \in \mathbb{R}$ 使得

$$f(\xi)f''(\xi) + 2[f'(\xi)]^2 = 0.$$

□

例题 15.27 已知: 存在连续正函数 $f : [1, +\infty) \rightarrow (0, +\infty)$, 满足

$$(1) \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} = 0,$$

$$(2) \frac{1}{x} \int_1^x f(t) dt \text{ 有界.}$$

证明: 当 $\alpha > 1$ 时,

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_1^x f^\alpha(t) \ln(1 + f(t)) dt}{x^\alpha \ln(1 + x)} = 0.$$

证明 由 $x^\alpha \ln(1 + x)$ 递增可得, 对 $\forall A > 1$, 都有

$$\begin{aligned} \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_1^x f^\alpha(t) \ln(1 + f(t)) dt}{x^\alpha \ln(1 + x)} &= \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_A^x f^\alpha(t) \ln(1 + f(t)) dt}{x^\alpha \ln(1 + x)} \\ &\leq \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \int_A^x f(t) \cdot \left(\frac{f(t)}{t} \right)^{\alpha-1} \frac{\ln(1 + f(t))}{\ln(1 + t)} dt \\ &\leq \sup_{t \geq A} \left(\frac{f(t)}{t} \right)^{\alpha-1} \cdot \sup_{t \geq A} \frac{\ln(1 + f(t))}{\ln(1 + t)} \cdot \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_A^x f(t) dt}{x}. \end{aligned} \tag{15.21}$$

由条件可知

$$\lim_{A \rightarrow +\infty} \sup_{t \geq A} \left(\frac{f(t)}{t} \right)^{\alpha-1} = \overline{\lim}_{t \rightarrow +\infty} \left(\frac{f(t)}{t} \right)^{\alpha-1} = 0,$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(t)}{t} = 0 \implies f(t) \leq t, \quad t \rightarrow +\infty.$$

从而

$$\lim_{A \rightarrow +\infty} \sup_{t \geq A} \frac{\ln(1+f(t))}{\ln(1+t)} = \overline{\lim}_{t \rightarrow +\infty} \frac{\ln(1+f(t))}{\ln(1+t)} \leq \overline{\lim}_{t \rightarrow +\infty} \frac{\ln(1+t)}{\ln(1+t)} = 1.$$

于是令(15.21)式 $A \rightarrow +\infty$ 得

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_1^x f^\alpha(t) \ln(1+f(t)) dt}{x^\alpha \ln(1+x)} \leq 0.$$

□

例题 15.28 设 $f(x)$ 是闭区间 $[a, b]$ 上的连续下凸函数, 实数 m 满足

$$\int_a^b |f(x) - m| dx = \min_{t \in [a, b]} \int_a^b |f(x) - f(t)| dx,$$

证明: $m \geq f\left(\frac{a+b}{2}\right)$.

证明 不妨设 $a = 0, b = 1$, 否则用 $f(a + (b-a)x)$ 代替 $f(x)$ 即可. 再不妨设 $f\left(\frac{1}{2}\right) = 0$, 否则用 $f(x) - f\left(\frac{1}{2}\right)$ 代替即可. 现在只需证明 $m \geq 0$. 因为 f 在 $[0, 1]$ 上连续下凸, 所以 f 在 $[0, 1]$ 上存在最小值, 不妨设

$$\min_{x \in [0, 1]} f(x) = f(x_0), \quad x_0 \in \left[0, \frac{1}{2}\right].$$

根据下凸性知, f 在 $\left[\frac{1}{2}, 1\right]$ 上非负递增. 反证, 假设 $m < 0$, 则由条件可知 (取 $t = \frac{1}{2}$)

$$\int_0^1 |f(x)| dx \geq \int_0^1 |f(x) - m| dx.$$

但是另一方面, 根据绝对值不等式, 我们有

$$\begin{aligned} \int_0^1 (|f(x) - m| - |f(x)|) dx &= \int_0^{\frac{1}{2}} (|f(x) - m| - |f(x)|) dx + \int_{\frac{1}{2}}^1 [(f(x) - m) - f(x)] dx \\ &= \int_0^{\frac{1}{2}} (|f(x) - m| - |f(x)|) dx - \frac{m}{2} \\ &= \int_0^{\frac{1}{2}} (|m| + |f(x) - m| - |f(x)|) dx \\ &\geq \int_0^{\frac{1}{2}} (|m + f(x) - m| - |f(x)|) dx = 0. \end{aligned}$$

因此上述绝对值不等式取等, 即对 $\forall x \in \left[0, \frac{1}{2}\right]$, 都有

$$\begin{aligned} |m| + |f(x) - m| &= |m + f(x) - m| = |f(x)| \\ \implies m^2 + f^2(x) - 2mf(x) + m^2 &= f^2(x) \\ \implies f(x) &= m. \end{aligned}$$

这与 $f\left(\frac{1}{2}\right) = 0$ 矛盾!

□

例题 15.29 设 $a_n = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \tan^n x dx, n = 0, 1, 2, \dots$

(1) 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{2}(a_{n-2} + a_n)$.

(2) 求 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 的收敛域.

证明

(1) 由条件可知

$$a_{n-2} + a_n = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \tan^{n-2} x (\tan^2 x + 1) dx = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \tan^{n-2} x d(\tan x) = \frac{1}{n-1}.$$

故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{2} (a_{n-2} + a_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{2(n-1)} = \frac{1}{2}.$$

(2) 注意到对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$a_n = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \tan^n x dx \xrightarrow{t=\tan x} \int_0^1 \frac{t^n}{1+t^2} dt,$$

又因为

$$\left(\frac{t}{1+t^2} \right)' = \frac{1-t^2}{(1+t^2)^2} \geq 0, \quad \forall t \in [0, 1],$$

所以

$$\frac{t^n}{2} \leq \frac{t^n}{1+t^2} = t^{n-1} \cdot \frac{t}{1+t^2} \leq \frac{t^{n-1}}{2}, \quad \forall t \in [0, 1],$$

故对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$\frac{1}{2(n+1)} = \int_0^1 \frac{t^n}{2} dt \leq a_n = \int_0^1 \frac{t^n}{1+t^2} dt \leq \int_0^1 \frac{t^{n-1}}{2} dt = \frac{1}{2n}.$$

因此 $a_n \sim \frac{1}{2n}$, $n \rightarrow \infty$. 而 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{2n}$ 的收敛域为 $[-1, 1)$, 故 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 的收敛域为 $[-1, 1)$.

□

例题 15.30 给定 $f, g : [0, +\infty) \rightarrow [0, +\infty)$ 且 f 连续, $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = 0$. 若有不等式

$$|f(x) - f(y)| \leq g(x) \sup_{t \in [x, y]} f(t), \quad \forall 0 \leq x < y.$$

证明 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在.证明 (i) 若 $f(x)$ 有界, 设 $|f(x)| \leq M, \forall x \in [0, +\infty)$. 由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = 0$ 知, 对 $\forall \varepsilon > 0$, 存在 $X > 0$, 使得

$$g(x) < \varepsilon, \quad \forall x > X.$$

于是对 $\forall y > x > X$, 都有

$$|f(x) - f(y)| \leq g(x) \sup_{t \in [x, y]} f(t) < M\varepsilon.$$

故由 Cauchy 收敛准则知 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在.(ii) 若 $f(x)$ 无界, 记 $K \triangleq \lfloor f(0) \rfloor + 1$,

$$y_n \triangleq \inf \{y \in [0, +\infty) : f(y) = n\}, \quad \forall n > K.$$

由 f 的连续性知 $f(y_n) = n, \forall n > K$. 断言 $y_{n+1} > y_n$. 若 $y_{n+1} \leq y_n$, 则由介值定理知, 存在 $y'_n \in (y_{n+1}, y_n)$, 使得 $f(y'_n) = f(y_n) = n$, 这与 y_n 的下确界定义矛盾! 于是 $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = a \in (K, +\infty]$. 又 $f \in C[0, +\infty)$, 故

$$f\left(\lim_{n \rightarrow \infty} y_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(y_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} n = +\infty.$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = +\infty$, 否则 $f\left(\lim_{n \rightarrow \infty} y_n\right) = f(a) < +\infty$ 矛盾! 我们还可以断言

$$f(y_n) = \sup_{t \in [0, y_n]} f(t), \quad \forall n > K. \quad (15.22)$$

否则, 对 $\forall n > K$, 存在 $t_n \in [0, y_n)$, 使得 $f(t_n) > f(y_n)$. 由介值定理知, 存在 $\xi_n \in (t_n, y_n)$, 使得 $f(\xi_n) = f(y_n) = n$, 这与 y_n 的下确界定义矛盾! 由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = 0$ 知, 存在 $x_0 \in [0, +\infty)$, 使得 $g(x_0) < 1$. 又由 $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = +\infty$ 知, 存在

$N \in \mathbb{N}$, 使得 $y_n > x_0$. 于是由条件和(15.22)式可得, 对 $\forall n > N$, 有

$$f(y_n) - f(x_0) = |f(y_n) - f(x_0)| \leq g(x_0) \sup_{t \in [x_0, y_n]} f(t) \leq g(x_0)f(y_n).$$

进而

$$f(x_0) \geq f(y_n) [1 - g(x_0)] = n [1 - g(x_0)], \quad \forall n > N.$$

令 $n \rightarrow +\infty$ 得 $f(x_0) = +\infty$, 显然矛盾! 故 f 必有界. 再由 (i) 可知 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 存在. \square

例题 15.31 设

$$\varphi(x) \triangleq \begin{cases} \sin x, & x \geq 0 \\ \cos x, & x < 0 \end{cases},$$

证明不存在 $(-\infty, +\infty)$ 上的可微函数 f 使得对任何 $x \in \mathbb{R}$ 都有

$$f(f(x)) - |x|f'(x) = \varphi(x).$$

 **笔记** 实际上, 可以直接看出

$$f(0) - f(-1) = \int_{-1}^0 \frac{\varphi(x) - f(f(x))}{x} dx \sim \int_{-1}^0 \frac{1}{x} dx$$

显然矛盾!

证明 假设存在这样的 $f(x)$, 则由条件得 $f(f(0)) = 0$. 注意到

$$f'(x) = \frac{\varphi(x) - f(f(x))}{x}, \quad \forall x < 0.$$

于是我们有

$$f(-\varepsilon) - f(-1) = \int_{-1}^{-\varepsilon} \frac{\varphi(x) - f(f(x))}{x} dx, \quad \forall \varepsilon \in (0, 1).$$

现在让 $\varepsilon \rightarrow 0^+$ 得

$$f(0) - f(-1) = \int_{-1}^0 \frac{\varphi(x) - f(f(x))}{x} dx.$$

由 $f \in D(\mathbb{R})$ 知, 存在 $M > 0$, 使得 $|f(x)| \leq M, \forall x \in [-1, 0]$. 再结合 f, φ 在 $x = 0$ 处的连续性知, 存在 $\delta \in (0, 1)$, 使得

$$\begin{aligned} f(0) - f(-1) &= \int_{-1}^0 \frac{\varphi(x) - f(f(x))}{x} dx = \int_{-\delta}^0 \frac{\varphi(x) - f(f(x))}{x} dx + \int_{-1}^{-\delta} \frac{\varphi(x) - f(f(x))}{x} dx \\ &\geq \int_{-\delta}^0 \frac{\varphi(0) - f(f(0))}{x} dx + \int_{-1}^{-\delta} \frac{1+M}{-\delta} dx = \int_{-\delta}^0 \frac{1}{x} dx - \frac{1+M}{\delta}(1-\delta) = +\infty \end{aligned}$$

这就是一个矛盾! 因此满足条件的可微函数 f 不存在. \square

例题 15.32 设 $x_1, x_2 \in \mathbb{R}$, 定义

$$x_{n+1} = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{n}}\right)x_{n-1} + \frac{1}{\sqrt{n}}x_n, \quad n \geq 2.$$

请问 $\{x_n\}$ 是否收敛? 若收敛, 请证明; 若不收敛, 请举反例.

证明 由条件可知, 对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$x_{n+1} - x_n = -\left(1 - \frac{1}{\sqrt{n}}\right)(x_n - x_{n-1}) = \dots = (-1)^{n-1}(x_2 - x_1) \prod_{k=2}^n \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right).$$

于是对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 有

$$x_n = x_1 + \sum_{m=1}^{n-1} (x_{m+1} - x_m) = x_1 + (x_2 - x_1) \sum_{m=1}^{n-1} (-1)^{m-1} \prod_{k=2}^m \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right).$$

注意到对 $\forall m \in \mathbb{N}$, 都有

$$\prod_{k=2}^m \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right) < \prod_{k=2}^{m-1} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right) \Rightarrow \left\{ \prod_{k=2}^m \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right) \right\} \text{递减.}$$

并且

$$\prod_{k=2}^m \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right) = e^{\sum_{k=2}^m \ln\left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right)} \leq e^{-\sum_{k=2}^m \frac{1}{\sqrt{k}}}, \quad \forall m \in \mathbb{N}.$$

令 $m \rightarrow \infty$ 得

$$\overline{\lim}_{m \rightarrow \infty} \prod_{k=2}^m \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right) \leq \overline{\lim}_{m \rightarrow \infty} e^{-\sum_{k=2}^m \frac{1}{\sqrt{k}}} = 0,$$

故 $\left\{ \prod_{k=2}^m \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right) \right\}$ 单调递减趋于 0. 由 Leibniz 判别法知

$$\sum_{m=2}^{\infty} (-1)^{m-1} \prod_{k=2}^m \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right) < +\infty.$$

故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_1 + (x_2 - x_1) \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m-1} \prod_{k=1}^m \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right) < +\infty.$$

□

例题 15.33 设 φ 是 \mathbb{R} 上严格单调增加的连续函数, ψ 是 φ 的反函数, 实数列 $\{x_n\}$ 满足

$$x_{n+2} = \psi \left(\left(1 - \frac{1}{\sqrt{n}}\right) \varphi(x_n) + \frac{1}{\sqrt{n}} \varphi(x_{n+1}) \right), \quad n \geq 2.$$

证明: $\{x_n\}$ 收敛或举例说明 $\{x_n\}$ 有可能发散.

证明 由条件可得

$$\varphi(x_{n+2}) = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{n}}\right) \varphi(x_n) + \frac{1}{\sqrt{n}} \varphi(x_{n+1}), \quad n \geq 2.$$

于是

$$\begin{aligned} \varphi(x_{n+2}) - \varphi(x_{n+1}) &= \left(\frac{1}{\sqrt{n}} - 1\right) [\varphi(x_{n+1}) - \varphi(x_n)] \\ &= \left(\frac{1}{\sqrt{n}} - 1\right) \left(\frac{1}{\sqrt{n-1}} - 1\right) [\varphi(x_n) - \varphi(x_{n-1})] \\ &= \cdots = \prod_{k=2}^n \left(\frac{1}{\sqrt{k}} - 1\right) [\varphi(x_3) - \varphi(x_2)] > 0, \quad \forall n \geq 2. \end{aligned}$$

从而 $\{\varphi(x_n)\}$ 递增, 并且

$$\begin{aligned} \varphi(x_n) &= \varphi(x_3) + \sum_{k=3}^{n-1} [\varphi(x_{k+1}) - \varphi(x_k)] \\ &= \varphi(x_3) + [\varphi(x_3) - \varphi(x_2)] \sum_{k=3}^{n-1} \prod_{m=2}^{k-1} \left(\frac{1}{\sqrt{m}} - 1\right) \\ &= \varphi(x_3) + [\varphi(x_3) - \varphi(x_2)] \sum_{k=3}^{n-1} e^{\sum_{m=2}^{k-1} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{m}} - 1\right)}, \quad \forall n \geq 4. \end{aligned} \tag{15.23}$$

注意到 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln(x-1)}{-x} = 1$, 故

$$\ln\left(\frac{1}{\sqrt{m}} - 1\right) \sim -\frac{1}{\sqrt{m}}, \quad m \rightarrow +\infty.$$

因此

$$e^{\sum_{m=2}^{k-1} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{m}} - 1\right)} \sim e^{-\sum_{m=2}^{k-1} \frac{1}{\sqrt{m}}}, \quad m \rightarrow +\infty.$$

由 Stolz 公式可得

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{2 \ln k}{\sum_{m=2}^{k-1} \frac{1}{\sqrt{m}}} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{2 \ln(1 + \frac{1}{k})}{\frac{1}{\sqrt{k}}} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{2\sqrt{k}}{k} = 0.$$

从而当 k 充分大时, 有

$$\sum_{m=2}^{k-1} \frac{1}{\sqrt{m}} > 2 \ln k \iff e^{-\sum_{m=2}^{k-1} \frac{1}{\sqrt{m}}} < e^{-2 \ln k} = \frac{1}{k^2}.$$

于是

$$\sum_{k=3}^{\infty} e^{\sum_{m=2}^{k-1} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{m}} - 1\right)} < \sum_{k=3}^{\infty} \frac{1}{k^2} < +\infty.$$

再由(15.23)式知 $\varphi(x_n)$ 收敛. 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} \varphi(x_n) = a$, 由 φ 存在连续的反函数知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \psi(\varphi(x_n)) = \psi\left(\lim_{n \rightarrow \infty} \varphi(x_n)\right) = \psi(a) < +\infty.$$

□

例题 15.34 证明:

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{x \ln x} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\sin(nx)|}{n^2} = -1.$$

证明 对 $\forall x \in (0, 1)$, 我们有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\sin(nx)|}{n^2} &= \sin x + \sum_{n=2}^{\lfloor \frac{1}{x} \rfloor} \frac{|\sin(nx)|}{n^2} + \sum_{n=\lfloor \frac{1}{x} \rfloor + 1}^{\infty} \frac{|\sin(nx)|}{n^2} \leq \sin x + \sum_{n=2}^{\lfloor \frac{1}{x} \rfloor} \frac{nx}{n^2} + \sum_{n=\lfloor \frac{1}{x} \rfloor + 1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \\ &= \sin x + x \sum_{n=2}^{\lfloor \frac{1}{x} \rfloor} \frac{1}{n} + \sum_{n=\lfloor \frac{1}{x} \rfloor + 1}^{\infty} \frac{1}{n(n-1)} \leq \sin x + x \sum_{n=2}^{\lfloor \frac{1}{x} \rfloor} \int_{n-1}^n \frac{1}{t} dt + \sum_{n=\lfloor \frac{1}{x} \rfloor + 1}^{\infty} \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n} \right) \\ &= \sin x + x \int_1^{\lfloor \frac{1}{x} \rfloor} \frac{1}{t} dt + \frac{1}{\lfloor \frac{1}{x} \rfloor} \leq \sin x + x \ln \lfloor \frac{1}{x} \rfloor + \frac{x}{1-x}. \end{aligned}$$

注意到

$$\sin x \geq x - x^3, \quad \forall x \in (0, 1].$$

故另一方面, 对 $\forall x \in (0, \frac{1}{N})$, 我们有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\sin(nx)|}{n^2} &= \sum_{n=1}^{\lfloor \frac{1}{x} \rfloor} \frac{|\sin(nx)|}{n^2} + \sum_{n=\lfloor \frac{1}{x} \rfloor + 1}^{\infty} \frac{|\sin(nx)|}{n^2} \\ &\geq \sum_{n=1}^{\lfloor \frac{1}{x} \rfloor} \frac{nx - (nx)^3}{n^2} = x \sum_{n=1}^{\lfloor \frac{1}{x} \rfloor} \frac{1}{n} - x^3 \sum_{n=1}^{\lfloor \frac{1}{x} \rfloor} n \\ &\geq x \sum_{n=1}^{\lfloor \frac{1}{x} \rfloor} \int_n^{n+1} \frac{1}{t} dt - x^3 \cdot \frac{1}{x^2} = x \int_1^{\lfloor \frac{1}{x} \rfloor} \frac{1}{t} dt - x \\ &= x \ln \lfloor \frac{1}{x} \rfloor - x \geq x \ln \left(\frac{1}{x} - 1 \right) - x^2 \\ &= -x \ln x + x \ln(1-x) - x. \end{aligned}$$

综上, 对 $\forall x \in (0, 1)$, 我们有

$$-x \ln x + x \ln(1-x) - x \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\sin(nx)|}{n^2} \leq \sin x - x \ln x + \frac{x}{1-x}.$$

从而对 $\forall x \in (0, 1)$, 我们有

$$-1 + \frac{\ln(1-x)}{\ln x} - \frac{1}{\ln x} \leq \frac{1}{x \ln x} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\sin(nx)|}{n^2} \leq \frac{\sin x}{x \ln x} - 1 \leq \frac{1}{\ln x} - 1 + \frac{1}{(1-x) \ln x}.$$

令 $x \rightarrow 0^+$ 得

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{x \ln x} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\sin(nx)|}{n^2} = -1.$$

□

例题 15.35 设 $f \in C(0, 1]$ 且对某个 $\mu > 1$ 有

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} x[f(\mu x) - f(x)] = A.$$

证明: $\lim_{x \rightarrow 0^+} x f(x)$ 存在.

 **笔记** 取 $n = \lfloor \frac{\ln \frac{\delta}{x}}{\ln \mu} + \frac{1}{2} \rfloor$ 的原因:

$$\mu^n x \geq \delta, \quad \mu^k x < \delta, \quad k = 0, 1, \dots, n-1$$

由 $\mu > 1$ 知上式等价于

$$\mu^n x \geq \delta \text{ 且 } \mu^{n-1} x < \delta \iff \frac{\ln \frac{\delta}{x}}{\ln \mu} \leq n < \frac{\ln \frac{\delta}{x}}{\ln \mu} + 1.$$

故取 $n = \lfloor \frac{\ln \frac{\delta}{x}}{\ln \mu} + \frac{1}{2} \rfloor$ 即可满足要求.

注 也可以不妨设 $A = 0$, 否则用 $f(x) + \frac{\mu A}{(\mu-1)x}$ 代替即可.

证明 由条件知, 对 $\forall \varepsilon \in (0, 1)$, 存在 $\delta > 0$, 使得

$$A - \varepsilon < x[f(\mu x) - f(x)] < A + \varepsilon, \quad \forall x \in (0, \delta).$$

因此

$$\begin{aligned} A - \varepsilon &< -\mu^k x [f(\mu^{k-1} x) - f(\mu^k x)] < A + \varepsilon, \quad \forall \mu^k x \in (0, \delta). \\ \iff \frac{-\varepsilon - A}{\mu^k} &< x [f(\mu^{k-1} x) - f(\mu^k x)] < \frac{\varepsilon - A}{\mu^k}, \quad \forall \mu^k x \in (0, \delta). \end{aligned} \quad (15.24)$$

由 $f \in C[\delta, 1]$ 知, 存在 $M > 0$, 使得

$$|f(x)| < M, \quad x \in [\delta, 1]. \quad (15.25)$$

注意到 $\lim_{n \rightarrow \infty} -A \sum_{k=1}^n \frac{1}{\mu^{k-1}} = -\frac{\mu A}{\mu - 1}$, 故存在 $N > 0$, 使得

$$-\frac{\mu A}{\mu - 1} - \varepsilon < -A \sum_{k=1}^n \frac{1}{\mu^{k-1}} < -\frac{\mu A}{\mu - 1} + \varepsilon. \quad (15.26)$$

对 $\forall x \in (0, \delta)$, 取 $n_x = \lfloor \frac{\ln \frac{\delta}{x}}{\ln \mu} + \frac{1}{2} \rfloor$, 则

$$\mu^{n_x} x \geq \delta, \quad \mu^k x < \delta, \quad k = 0, 1, \dots, n_x - 1.$$

$$x < \frac{\delta}{\mu^N} \implies \lfloor \frac{\ln \frac{\delta}{x}}{\ln \mu} + \frac{1}{2} \rfloor \geq \frac{\ln \frac{\delta}{x}}{\ln \mu} > N \implies n_x > N.$$

于是由(15.24)(15.25)(15.26)式知, 对 $\forall x \in \left(0, \min \left\{\delta, \frac{\varepsilon}{M}, \frac{\delta}{\mu^N}\right\}\right)$, 一方面, 我们有

$$\begin{aligned} xf(x) &= x \sum_{k=1}^{n_x} [f(\mu^{k-1}x) - f(\mu^k x)] + xf(\mu^{n_x}x) \\ &< \sum_{k=1}^{n_x} \frac{\varepsilon - A}{\mu^{k-1}} + xM < -A \sum_{k=1}^{n_x} \frac{1}{\mu^{k-1}} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\varepsilon}{\mu^{k-1}} + \varepsilon \\ &< -\frac{\mu A}{\mu - 1} + \varepsilon + \frac{\mu \varepsilon}{\mu - 1} + \varepsilon. \end{aligned}$$

另一方面, 我们有

$$\begin{aligned} xf(x) &= x \sum_{k=1}^{n_x} [f(\mu^{k-1}x) - f(\mu^k x)] + xf(\mu^{n_x}x) \\ &> \sum_{k=1}^{n_x} \frac{-\varepsilon - A}{\mu^{k-1}} - xM > -A \sum_{k=1}^{n_x} \frac{1}{\mu^{k-1}} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\varepsilon}{\mu^{k-1}} - \varepsilon \\ &> -\frac{\mu A}{\mu - 1} - \varepsilon - \frac{\mu \varepsilon}{\mu - 1} - \varepsilon. \end{aligned}$$

综上, 对 $\forall x \in \left(0, \min \left\{\delta, \frac{\varepsilon}{M}, \frac{\delta}{\mu^N}\right\}\right)$, 我们有

$$\left|xf(x) + \frac{\mu A}{\mu - 1}\right| < \varepsilon \left(2 + \frac{\mu}{\mu - 1}\right).$$

故 $\lim_{x \rightarrow 0^+} xf(x) = -\frac{\mu A}{\mu - 1}$.

□

例题 15.36 设 $f \in C^1(1, +\infty)$ 满足

$$f(x) \leq x^2 \ln x, f'(x) > 0, \forall x \in (1, +\infty)$$

证明:

$$\int_1^\infty \frac{1}{f'(x)} dx = +\infty$$

证明 由 Cauchy 不等式和条件可得, 任取 $X > 1$, 则对 $\forall x \in (X, +\infty)$, 都有

$$\int_X^x \frac{f'(t)}{t^2 \ln^2 t} dt \int_X^x \frac{1}{f'(t)} dt \geq \left[\int_X^x \frac{1}{t \ln t} dt \right]^2.$$

于是对 $\forall x \in (X, +\infty)$, 由分部积分可得

$$\begin{aligned} \int_X^x \frac{1}{f'(t)} dt &\geq \frac{\left[\int_X^x \frac{1}{t \ln t} dt \right]^2}{\int_X^x \frac{f'(t)}{t^2 \ln^2 t} dt} = \frac{(\ln \ln x - \ln \ln X)^2}{\frac{f(x)}{x^2 \ln^2 x} - \frac{f(X)}{X^2 \ln^2 X} - \int_X^x f(t) \left(\frac{1}{t^2 \ln^2 t} \right)' dt} \\ &\geq \frac{(\ln \ln x - \ln \ln X)^2}{\frac{1}{\ln x} - \frac{f(X)}{X^2 \ln^2 X} + \int_X^x \frac{2t \ln^2 t + 2t \ln t}{t^2 \ln^3 t} dt} = \frac{(\ln \ln x - \ln \ln X)^2}{\frac{1}{\ln x} - \frac{f(X)}{X^2 \ln^2 X} + \int_X^x \left(\frac{2}{t \ln t} + \frac{2}{t \ln^2 t} \right) dt} \\ &\geq \frac{(\ln \ln x - \ln \ln X)^2}{\frac{1}{\ln x} - \frac{f(X)}{X^2 \ln^2 X} + 2 \ln \ln x - 2 \ln \ln X + \frac{2}{\ln X} - \frac{2}{\ln x}}. \end{aligned}$$

再令 $x \rightarrow +\infty$ 可得

$$\int_1^{+\infty} \frac{1}{f'(t)} dt = +\infty.$$

□

例题 15.37

证明

□

例题 15.38

证明

□

例题 15.39

证明

□

15.2 未解决的习题

例题 15.40 设 φ 是 $(0, +\infty)$ 上正严格递减的连续函数, 且

$$\lim_{x \rightarrow 0} \varphi(x) = +\infty, \quad \int_0^{+\infty} \varphi(t) dt = a < +\infty.$$

设 ψ 是 φ 的反函数, 求证: $\int_0^{+\infty} \psi(t) dt = a$, 且

$$\int_0^{+\infty} (\varphi(t))^2 dt + \int_0^{+\infty} (\psi(t))^2 dt \geq \frac{1}{2} a^{\frac{3}{2}}.$$

㊂ 笔记 思路: 利用不动点估计 $\int_0^P (\varphi(t))^2 dt + \int_0^P (\psi(t))^2 dt$.

证明

□

例题 15.41

证明

□

例题 15.42

证明

□

附录 A 常用公式

A.1 常用 Taylor 级数

1. $e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \cdots + \frac{x^k}{k!} + \cdots.$
2. $\ln(1+x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n+1} x^{n+1} = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \cdots + \frac{(-1)^k}{k+1} x^{k+1} + \cdots, x \in (-1, 1].$
3. $\sin x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{2n+1} = x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120} - \cdots + \frac{(-1)^k}{(2k+1)!} x^{2k+1} + \cdots.$
4. $\cos x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} x^{2n} = 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} - \cdots + \frac{(-1)^k}{(2k)!} x^{2k} + \cdots.$
5. $\tan x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} 2^{2n} (2^{2n-1} - 1) B_{2n}}{(2n)!} x^{2n-1} = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(4^n - 1)(2n)!}{(2n+1)!} x^{2n+1} = x + \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 + \frac{17}{315}x^7 + \frac{62}{2835}x^9 + \frac{1382}{155925}x^{11} + o(x^{11}), x \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right).$
6. $\cot x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n 2^{2n} B_{2n}}{(2n)!} x^{2n-1} = \frac{1}{x} - \frac{1}{3}x + \frac{1}{45}x^3 - \frac{2}{945}x^5 - \cdots, x \in (0, \pi).$
7. $\sec x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n E_{2n}}{(2n)!} x^{2n} = 1 + \frac{1}{2}x^2 + \frac{5}{24}x^4 + \frac{61}{720}x^6 + \frac{277}{8064}x^8 + \frac{50521}{3628800}x^{10} + o(x^{11}), x \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right), x \in (0, \pi).$
8. $\csc x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} 2 (2^{2n-1} - 1) B_{2n}}{(2n)!} x^{2n-1} = \frac{1}{x} + \frac{1}{6}x + \frac{7}{360}x^3 + \frac{31}{15120}x^5 + \cdots, x \in (0, \pi).$
9. $\arcsin x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n)!}{4^n (2n+1)!} x^{2n+1} = x + \frac{1}{6}x^3 + \frac{3}{40}x^5 + \frac{5}{112}x^7 + \frac{35}{1152}x^9 + \frac{63}{2816}x^{11} + o(x^{11}), x \in (-1, 1).$
10. $\arctan x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{2k+1} x^{2k+1} = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{5}x^5 - \cdots + \frac{(-1)^k}{2k+1} x^{2k+1} + \cdots, x \in (-1, 1).$
11. $\sinh x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} = x + \frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{120}x^5 + \cdots + \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \cdots.$
12. $\cosh x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{(2n)!} = 1 + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{24}x^4 + \cdots + \frac{x^{2k}}{(2k)!} + \cdots.$
13. $\tanh x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4^n (4^n - 1) B_{2n}}{(2n)!} x^{2n-1} = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 - \frac{17}{315}x^7 + \frac{62}{2835}x^9 - \frac{1382}{155925}x^{11} + o(x^{11}), x \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right).$
14. $\operatorname{sech} x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{E_{2n} x^{2n}}{(2n)!} = 1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{5}{24}x^4 - \frac{61}{720}x^6 + \frac{277}{8064}x^8 - \frac{50521}{3628800}x^{10} + o(x^{11}), x \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right).$
15. $\operatorname{arsinh} x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (2n)!}{4^n (2n+1)!} x^{2n+1} = x - \frac{1}{6}x^3 + \frac{3}{40}x^5 - \frac{5}{112}x^7 + \frac{35}{1152}x^9 - \frac{63}{2816}x^{11} + o(x^{11}), x \in (-1, 1).$
16. $\operatorname{artanh} x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{2n+1} = x + \frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{7}x^7 + \frac{1}{9}x^9 + \frac{1}{11}x^{11} + o(x^{11}), x \in (-1, 1).$
17. $e^{\sin x} = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{8}x^4 - \frac{1}{15}x^5 - \frac{1}{240}x^6 + \frac{1}{90}x^7 + \frac{31}{5760}x^8 - \frac{1}{5670}x^9 - \frac{2951}{3628800}x^{10} + o(x^{10}).$
18. $e^{\tan x} = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}x^3 + \frac{3}{8}x^4 + \frac{37}{120}x^5 + \frac{59}{240}x^6 + \frac{137}{720}x^7 + \frac{871}{5760}x^8 + \frac{41641}{3628800}x^9 + o(x^9).$

$$19. e^{\arcsin x} = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 + \frac{5}{24}x^4 + \frac{1}{6}x^5 + \frac{17}{144}x^6 + \frac{13}{126}x^7 + \frac{629}{8064}x^8 + \frac{325}{4536}x^9 + o(x^9).$$

$$20. e^{\arctan x} = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{3}x^3 - \frac{7}{24}x^4 + \frac{1}{12}x^5 + \frac{29}{144}x^6 - \frac{1}{1008}x^7 - \frac{1249}{8064}x^8 - \frac{1163}{72576}x^9 + o(x^9).$$

$$21. \tan(\tan x) = x + \frac{2}{3}x^3 + \frac{3}{5}x^5 + \frac{181}{315}x^7 + \frac{59}{105}x^9 + \frac{3455}{6237}x^{11} + o(x^{11}).$$

$$22. \sin(\sin x) = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{10}x^5 - \frac{8}{315}x^7 + \frac{13}{2830}x^9 - \frac{47}{49896}x^{11} + o(x^{11}).$$

$$23. \tan(\sin x) = x + \frac{1}{6}x^3 - \frac{1}{40}x^5 - \frac{107}{5040}x^7 - \frac{73}{24192}x^9 + \frac{41897}{39916800}x^{11} + o(x^{11}).$$

$$24. \sin(\tan x) = x + \frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{40}x^5 - \frac{55}{846}x^7 - \frac{143}{3456}x^9 - \frac{968167}{39916800}x^{11} + o(x^{11}).$$

$$25. (1+x)^\alpha = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha(\alpha-1)\cdots(\alpha-n+1)}{n!} x^n = 1 + \alpha x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} x^2 + \cdots + \frac{\alpha(\alpha-1)\cdots(\alpha-k+1)}{k!} x^k + \cdots, x \in (-1, 1).$$

$$26. (1+x)^{\frac{1}{x}} = e - \frac{e}{2}x + \frac{11e}{24}x^2 - \frac{7e}{16}x^3 + \frac{2447e}{5760}x^4 - \frac{959e}{2304}x^5 + \frac{281343e}{580608}x^6 - \frac{67223e}{168885}x^7 + o(x^7).$$

$$27. (1+x^2)^{\frac{1}{x}} = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{3}x^3 - \frac{11}{24}x^4 + \frac{11}{120}x^5 + \frac{271}{720}x^6 + \frac{53}{2320}x^7 - \frac{4069}{13410}x^8 + o(x^8).$$

$$28. (1+\sin x)^{\frac{1}{x}} = e - \frac{e}{2}x + \frac{7e}{24}x^2 - \frac{3e}{16}x^3 + \frac{139e}{560}x^4 - \frac{899e}{11520}x^5 + \frac{29811e}{580608}x^6 - \frac{180617e}{580608}x^7 + o(x^7).$$

A.2 常用积分公式

A.2.1 不定积分

$$1. \int \frac{dx}{x^2 + a^2} = \frac{1}{a} \arctan \frac{x}{a} + C (a > 0).$$

$$2. \int \frac{dx}{x^2 - a^2} = \frac{1}{2a} \ln \left| \frac{x-a}{x+a} \right| + C (a > 0).$$

$$3. \int \frac{dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \arcsin \frac{x}{a} + C (a > 0).$$

$$4. \int \frac{dx}{\sqrt{x^2 \pm a^2}} = \ln \left| x + \sqrt{x^2 \pm a^2} \right| + C (a > 0).$$

$$5. \int \ln x dx = x \ln x - x + C.$$

$$6. (1) \int \sec x dx = \ln |\sec x + \tan x| + C;$$

$$(2) \int \csc x dx = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\cos x - 1}{\cos x + 1} \right| + C = \ln |\csc x - \cot x| + C = \ln \left| \tan \frac{x}{2} \right| + C.$$

$$7. \int \sqrt{x^2 \pm a^2} dx = \frac{1}{2} \left[x \sqrt{x^2 \pm a^2} \pm a^2 \ln \left| x + \sqrt{x^2 \pm a^2} \right| \right] + C (a > 0);$$

$$\int \sqrt{a^2 - x^2} dx = \frac{1}{2} \left[x \sqrt{a^2 - x^2} + a^2 \arcsin \frac{x}{a} \right] + C (a > 0).$$

$$8. \int e^{ax} \cos bx dx = \frac{e^{ax}}{a^2 + b^2} (a \cos bx + b \sin bx) + C (ab \neq 0);$$

$$\int e^{ax} \sin bx dx = \frac{e^{ax}}{a^2 + b^2} (a \sin bx - b \cos bx) + C (ab \neq 0).$$

$$9. \int x \cos nx dx = \frac{1}{n^2} \cos nx + \frac{x}{n} \sin nx + C (n \neq 0);$$

$$\int x \sin nx dx = \frac{1}{n^2} \sin nx - \frac{x}{n} \cos nx + C (n \neq 0).$$

10. 记 $I(m, n) = \int \cos^m x \sin^n x dx, \forall n, m \in \mathbb{N}$, 则

$$I(m, n) = \frac{\cos^{m-1} x \sin^{n+1} x}{m+n} + \frac{m-1}{m+n} I(m-2, n) \quad (m \geq 2, n \geq 0);$$

$$= -\frac{\cos^{m+1} x \sin^{n-1} x}{m+n} + \frac{n-1}{m+n} I(m, n-2) \quad (m \geq 0, n \geq 2).$$

证明

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

5. (1)

(2) 第一种:

$$\int \csc x dx = \int \frac{\sin x}{1 - \cos^2 x} dx = \int \frac{1}{\cos^2 x - 1} d(\cos x) = \frac{1}{2} \int \frac{1}{\cos x - 1} - \frac{1}{\cos x + 1} d(\cos x)$$

$$= \frac{1}{2} \ln |\cos x - 1| - \frac{1}{2} \ln |\cos x + 1| + C = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\cos x - 1}{\cos x + 1} \right| + C.$$

第二种:

$$\int \csc x dx = \frac{1}{2} \ln |\cos x - 1| - \frac{1}{2} \ln |\cos x + 1| + C = \ln \left| \tan \frac{x}{2} \right| + C.$$

第三种:

$$\int \csc x dx = \int \frac{\csc x (\csc x - \cot x)}{\csc x - \cot x} dx = \ln |\csc x - \cot x| + C$$

$$= \frac{\csc^2 x - \cot^2 x = 1}{\csc x + \cot x} \ln \left| \frac{1}{\csc x + \cot x} \right| + C = -\ln |\csc x + \cot x| + C.$$

- 6.
- 7.
- 8.
- 9.

□

A.3 常用初等不等式

命题 A.1 (常用不等式)

- (1) $\ln(1+x) < \frac{x}{\sqrt{1+x}}, x > 0 \iff \ln x < \sqrt{x} - \frac{1}{\sqrt{x}}, x > 1.$
- (2) $e^x + e^y - 2 < e^{x+y} - 1, \forall x, y > 0.$
- (3) $e^{-x} \leq \frac{1}{1+x} \leq e^{x^2-x}, \forall x > 0.$

◆

证明

(1) 令 $f(x) = \ln(1+x) - \frac{x}{\sqrt{1+x}}, x \geq 0$, 则

$$f'(x) = \frac{2\sqrt{1+x} - x - 2}{2(1+x)^{\frac{3}{2}}} = -\frac{1+x-2\sqrt{1+x}+1}{2(1+x)^{\frac{3}{2}}} = -\frac{(\sqrt{1+x}-1)^2}{2(1+x)^{\frac{3}{2}}} < 0, \forall x > 0.$$

故 f 在 $(0, +\infty)$ 上严格单调递减, 又 $f \in C[0, +\infty)$, 因此 f 在 $[0, +\infty)$ 上也严格单调递减. 从而

$$f(x) \leq f(0) = 0, \forall x > 0.$$

即 $\ln(1+x) < \frac{x}{\sqrt{1+x}}, x > 0$.

(2) 注意到

$$(e^x - 1)(x^y - 1) > 0, \forall x, y > 0,$$

故

$$e^x + e^y < e^{x+y} + 1 \implies e^x + e^y - 2 < e^{x+y} - 1, \forall x, y > 0.$$

(3) 由 $e^x \geq 1+x, \forall x > 0$ 可得

$$e^{-x} = \frac{1}{e^x} \leq \frac{1}{1+x}, \forall x > 0.$$

$$e^{x^2-x} \geq 1+x^2-x = \frac{1+x^3}{1+x} \geq \frac{1}{1+x}, \forall x > 0.$$

□

A.4 重要不等式

定理 A.1 (Cauchy 不等式)

对任何 $n \in \mathbb{N}, (a_1, a_2, \dots, a_n), (b_1, b_2, \dots, b_n) \in \mathbb{R}^n$, 有

$$\sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n b_i^2 \geq \left(\sum_{i=1}^n a_i b_i \right)^2. \quad (\text{A.1})$$

且等号成立条件为 $(a_1, a_2, \dots, a_n), (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 线性相关.

♡

证明 (i) 当 b_i 全为零时, (A.1) 式左右两边均为零, 结论显然成立.

(ii) 当 b_i 不全为零时, 注意到 $\left(\sum_{i=1}^n (a_i + tb_i) \right)^2 \geq 0, \forall t \in \mathbb{R}$. 等价于

$$t^2 \sum_{i=1}^n b_i^2 + 2t \sum_{i=1}^n a_i b_i + \sum_{i=1}^n a_i^2 \geq 0, \forall t \in \mathbb{R}.$$

根据一元二次方程根的存在性定理, 可知 $\Delta = \left(\sum_{i=1}^n a_i b_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n b_i^2 \leq 0$.

从而 $\sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n b_i^2 \geq \left(\sum_{i=1}^n a_i b_i \right)^2$. 下证(A.1)式等号成立的充要条件.

若(A.1)式等号成立, 则

(i) 当 b_i 全为零时, 因为零向量与任意向量均线性相关, 所以此时 $(a_1, a_2, \dots, a_n), (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 线性相关.

(ii) 当 b_i 不全为零时, 此时我们有 $\Delta = \left(\sum_{i=1}^n a_i b_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n b_i^2 = 0$. 根据一元二次方程根的存在性定理,

可知存在 $t_0 \in \mathbb{R}$, 使得

$$\left(\sum_{i=1}^n (a_i + tb_i) \right)^2 = t_0^2 \sum_{i=1}^n b_i^2 + 2t_0 \sum_{i=1}^n a_i b_i + \sum_{i=1}^n a_i^2 = 0.$$

于是 $a_i + t_0 b_i = 0, i = 1, 2, \dots, n$. 即 $(a_1, a_2, \dots, a_n), (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 线性相关.

反之, 若 $(a_1, a_2, \dots, a_n), (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 线性相关, 则存在不全为零的 $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$, 使得

$$\lambda a_i + \mu b_i = 0, i = 1, 2, \dots, n.$$

不妨设 $\lambda \neq 0$, 则 $a_i = -\frac{\mu}{\lambda} b_i, i = 1, 2, \dots, n$. 从而当 $t = \frac{\mu}{\lambda}$ 时, $\left(\sum_{i=1}^n (a_i + tb_i) \right)^2 = 0$.

即一元二次方程 $\left(\sum_{i=1}^n (a_i + tb_i) \right)^2 = t_0^2 \sum_{i=1}^n b_i^2 + 2t_0 \sum_{i=1}^n a_i b_i + \sum_{i=1}^n a_i^2 = 0$ 有实根 $\frac{\mu}{\lambda}$.

因此 $\Delta = \left(\sum_{i=1}^n a_i b_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n b_i^2 = 0$. 即(A.1)式等号成立.

□

例题 A.1 证明:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \geq \frac{n^2}{\sum_{i=1}^n x_i}, \forall n \in \mathbb{N}, x_1, x_2, \dots, x_n > 0.$$

证明 对 $\forall n \in \mathbb{N}, x_1, x_2, \dots, x_n > 0$, 由 Cauchy 不等式可得

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\sqrt{x_i}} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (\sqrt{x_i})^2 \geq \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{x_i} \cdot \frac{1}{\sqrt{x_i}} \right)^2 = n^2.$$

$$\text{故 } \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \geq \frac{n^2}{\sum_{i=1}^n x_i}, \forall n \in \mathbb{N}, x_1, x_2, \dots, x_n > 0.$$

□

例题 A.2 求函数 $y = \sqrt{x+27} + \sqrt{13-x} + \sqrt{x}$ 在定义域内的最大值和最小值.

笔记 首先我们猜测定义域的端点处可能存在最值, 然后我们通过简单的放缩就能得到 $y(0)$ 就是最小值. 再利用 Cauchy 不等式我们可以得到函数的最大值. 构造 Cauchy 不等式的思路是: 利用待定系数法构造相应的 Cauchy 不等式. 具体步骤如下:

设 $A, B, C > 0$, 则由 Cauchy 不等式可得

$$\left(\frac{1}{\sqrt{A}} \sqrt{Ax+27A} + \frac{1}{\sqrt{B}} \sqrt{13B-Bx} + \frac{1}{\sqrt{C}} \sqrt{Cx} \right)^2 \leq \left(\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{C} \right) [(A+C-B)x + 27A + 13B]$$

并且当且仅当 $\sqrt{A} \cdot \sqrt{Ax+27A} = \sqrt{B} \cdot \sqrt{13B-Bx} = \sqrt{C} \cdot \sqrt{Cx}$ 时, 等号成立.

令 $A+C-B=0$ (因为要求解 y 的最大值, 我们需要将 y 放大成一个不含 x 的常数), 从而与上式联立得到方程组

$$\begin{cases} \sqrt{A} \cdot \sqrt{Ax+27A} = \sqrt{B} \cdot \sqrt{13B-Bx} = \sqrt{C} \cdot \sqrt{Cx} \\ A+C-B=0 \end{cases}$$

解得: $A=1, B=3, C=2, x=9$.

从而得到我们需要构造的 Cauchy 不等式为

$$\left(\sqrt{x+27} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{39-3x} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2x} \right)^2 \leq \left(1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{2} \right) (x+27+39-3x+2x)$$

并且当且仅当 $\sqrt{x+27} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{39-3x} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{2x}$, 即 $x=9$ 时, 等号成立.

解 由题可知, 函数 y 的定义域就是 $0 \leq x \leq 13$. 而

$$\begin{aligned} y(x) &= \sqrt{x+27} + \sqrt{[13-x+\sqrt{x}]^2} \\ &= \sqrt{x+27} + \sqrt{13+2\sqrt{x(13-x)}} \\ &\geq \sqrt{27} + \sqrt{13} = 3\sqrt{3} + \sqrt{13} = y(0) \end{aligned}$$

于是 y 的最小值为 $3\sqrt{3} + \sqrt{13}$. 由 Cauchy 不等式可得

$$\begin{aligned} y^2(x) &= (\sqrt{x+27} + \sqrt{13-x} + \sqrt{x})^2 \\ &= (\sqrt{x+27} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{39-3x} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2x})^2 \\ &\leq (1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{2})(x+27+39-3x+2x) \\ &= 121 = y^2(9) \end{aligned}$$

即 $y(x) \leq y(9) = 11$. 并且当且仅当 $\sqrt{x+27} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{39-3x} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{2x}$, 即 $x=9$ 时, 等号成立. 故 y 的最大值为 11.

□

定理 A.2 (均值不等式)

设 $a_1, a_2, \dots, a_n > 0$, 则下述函数是连续递增函数

$$f(r) = \begin{cases} \left(\frac{a_1^r + a_2^r + \dots + a_n^r}{n} \right)^{\frac{1}{r}}, & r \neq 0 \\ \sqrt[n]{a_1 a_2 \dots a_n}, & r = 0 \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

其中若 $r_1 \neq r_2$, 则 $f(r_1) = f(r_2)$ 的充要条件是 $a_1 = a_2 = \dots = a_n$.

♡



笔记 均值不等式最重要的特例是下面的均值不等式常用形式.

定理 A.3 (均值不等式常用形式)

设 $a_1, a_2, \dots, a_n > 0$, 则

$$\frac{n}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \dots + \frac{1}{a_n}} \leq \sqrt[n]{a_1 a_2 \dots a_n} \leq \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \leq \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2}{n}}.$$

♡

例题 A.3 设 $f(x) = 4x(x-1)^2$, $x \in (0, 1)$, 求 f 的最大值.

解 由均值不等式常用形式可得

$$\begin{aligned} f(x) &= 4x(x-1)^2 = 2 \cdot 2x(1-x)(1-x) \\ &= 2 \cdot \left[\sqrt[3]{2x(1-x)(1-x)} \right]^3 \\ &\leq 2 \cdot \left[\frac{2x+1-x+1-x}{3} \right]^3 \\ &= 2 \cdot \left(\frac{2}{3} \right)^3 = \frac{16}{27} \end{aligned}$$

并且当且仅当 $2x = 1-x$, 即 $x = \frac{1}{3}$ 时等号成立.

□

定理 A.4 (Bernoulli 不等式)

设 $x_1, x_2, \dots, x_n \geq -1$ 且两两同号, 则

$$(1+x_1)(1+x_2)\cdots(1+x_n) \geq 1+x_1+x_2+\cdots+x_n.$$



证明 当 $n=1$ 时, 我们有 $1+x_1 \geq 1+x_1$, 结论显然成立.

假设当 $n=k$ 时, 结论成立. 则当 $n=k+1$ 时, 由归纳假设可得

$$\begin{aligned} (1+x_1)(1+x_2)\cdots(1+x_{k+1}) &\geq (1+x_1+x_2+\cdots+x_k)(1+x_{k+1}) \\ &= 1+x_1+x_2+\cdots+x_k+x_{k+1}+x_1x_{k+1}+x_2x_{k+1}+\cdots+x_kx_{k+1} \\ &\geq 1+x_1+x_2+\cdots+x_k+x_{k+1} \end{aligned}$$

故由数学归纳法可知, 结论成立.

**定理 A.5 (Bernoulli 不等式特殊形式)**

设 $x \geq -1, n \geq 0$, 则

$$(1+x)^n \geq 1+nx.$$

**定理 A.6 (Jesen 不等式)**

设 $\lambda_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n, \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, 则对下凸函数 f , 有

$$f\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i\right) \leq \sum_{i=1}^n \lambda_i f(x_i).$$

对上凸函数 f , 有

$$f\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i\right) \geq \sum_{i=1}^n \lambda_i f(x_i).$$

**推论 A.1**

对 $\forall a, b \geq 0, \alpha + \beta = 1$, 则

$$a^\alpha b^\beta \leq \alpha a + \beta b.$$



证明 利用 $\ln x$ 的上凸性和 Jesen 不等式易得.

**定理 A.7 (Young 不等式)**

对任何 $a, b \geq 0, \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1, p > 1$ 有

$$ab \leq \frac{a^p}{p} + \frac{b^q}{q}.$$

当且仅当 $a^p = b^q$ 时等号成立.



笔记 若 $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, 则我们称 p 与 q 共轭.

注 这个 Young 不等式不等式和加权均值不等式等价.

证明 (i) 当 a, b 至少有一个为零时, 结论显然成立.

(ii) 当 a, b 均不为零时, 我们有

$$\begin{aligned} ab &\leq \frac{a^p}{p} + \frac{b^q}{q} \\ \Leftrightarrow \ln a + \ln b &\leq \ln \left(\frac{a^p}{p} + \frac{b^q}{q} \right) \\ \Leftrightarrow \frac{1}{p} \ln a^p + \frac{1}{q} \ln b^q &\leq \ln \left(\frac{a^p}{p} + \frac{b^q}{q} \right) \end{aligned}$$

由Jesen 不等式和 $f(x) = \ln x$ 函数的上凸性可知, 上述不等式成立. 等号成立的条件可由Jesen 不等式的等号成立条件直接得到. 故原结论也成立. \square

定理 A.8 (Hold 不等式)

设 $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1, p > 1, a_1, a_2, \dots, a_n \geq 0, b_1, b_2, \dots, b_n \geq 0$, 则有

$$\sum_{k=1}^n a_k b_k \leq \sqrt[p]{\sum_{k=1}^n a_k^p} \cdot \sqrt[q]{\sum_{k=1}^n b_k^q}.$$



证明 (i) 当 a_1, a_2, \dots, a_n 全为零时, 结论显然成立.

(ii) 当 a_1, a_2, \dots, a_n 不全为零时, 令

$$a'_k = \frac{a_k}{\sqrt[p]{\sum_{k=1}^n a_k^p}}, b'_k = \frac{b_k}{\sqrt[q]{\sum_{k=1}^n b_k^q}}, k = 1, 2, \dots, n.$$

从而只需证明 $\sum_{k=1}^n a'_k b'_k \leq 1$. 由Young 不等式可得

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n a'_k b'_k &\leq \sum_{k=1}^n \left[\frac{(a'_k)^p}{p} + \frac{(b'_k)^q}{q} \right] = \sum_{k=1}^n \left(\frac{a_k^p}{p \sum_{k=1}^n a_k^p} + \frac{b_k^q}{q \sum_{k=1}^n b_k^q} \right) \\ &= \frac{\sum_{k=1}^n a_k^p}{p \sum_{k=1}^n a_k^p} + \frac{\sum_{k=1}^n b_k^q}{q \sum_{k=1}^n b_k^q} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1. \end{aligned}$$

故原结论成立. \square

定理 A.9 (排序和不等式)

设 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\} \subset \mathbb{R}, \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \subset \mathbb{R}$ 满足

$$a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_n, b_1 \leq b_2 \leq \dots \leq b_n.$$

$\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 是 $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ 的一个排列, 则有

$$\sum_{i=1}^n a_i b_{n+1-i} \leq \sum_{i=1}^n a_i c_i \leq \sum_{i=1}^n a_i b_i,$$

且等号成立的充要条件是 $a_i = a_j, 1 \leq i < j \leq n$ 或者 $b_i = b_j, 1 \leq i < j \leq n$. \heartsuit



笔记 简单记为倒序和 \leq 乱序和 \leq 同序和.

定理 A.10 (Chebyshev 不等式)

设 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\} \subset \mathbb{R}, \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \subset \mathbb{R}$ 满足

$$a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_n, b_1 \leq b_2 \leq \dots \leq b_n.$$

$\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 是 $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ 的一个排列, 则有

$$\sum_{i=1}^n a_i b_{n+1-i} \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \sum_{i=1}^n b_i \leq \sum_{i=1}^n a_i b_i.$$

且等号成立的充要条件是 $a_i = a_j, 1 \leq i < j \leq n$ 或者 $b_i = b_j, 1 \leq i < j \leq n$.



A.5 基本组合学公式

定义 A.1 (组合数定义的扩充)

对 $\forall n \in \mathbb{R}, k \in \mathbb{N}$, 定义

$$C_n^k = \binom{n}{k} \triangleq \begin{cases} 0 & , k < 0, \\ \frac{n(n-1)\cdots(n-k+1)}{k!} & , 0 < k \leq n, \\ 0 & , k > n. \end{cases}$$

特别地, $C_n^0 \triangleq 1$. 若 $n, k \in \mathbb{N}$ 且 $0 \leq k \leq n$, 则还有

$$C_n^k = \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}.$$

**命题 A.2 (组合数基本公式)**

1. 对 $\forall n, m \in \mathbb{N}$, 有 $C_n^m = C_{n-1}^m + C_{n-1}^{m-1}$.
- 2.



证明

**定理 A.11 (二项式定理的推广)**

$$(a_1 + b_1) \cdots (a_n + b_n) = \sum_{I \subset \{1, 2, \dots, n\}} \left(\prod_{i \in I} a_i \prod_{j \in \{1, 2, \dots, n\} - I} b_j \right).$$



证明 用数学归纳法证明即可.

**命题 A.3**

对 $\forall m \in \mathbb{N}, \forall x \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$, 都有

$$\sum_{k=0}^m (-1)^k \binom{m}{k} \frac{1}{x+k} = \frac{m!}{x(x+1)\cdots(x+m)}.$$



证明 设

$$f(x) = \frac{m!}{x(x+1)\cdots(x+m)},$$

则由有理分式分解定理知, 存在 $c_1, c_2, \dots, c_m \in \mathbb{R}$, 使得

$$f(x) = \sum_{j=0}^m \frac{c_j}{x+j},$$

两边同乘 $x+j$ ($j = 0, 1, \dots, m$), 再取 $x = -j$ 得

$$\begin{aligned} c_j &= [(x+j)f(x)]_{x=-j} = \frac{m!}{-j(-j+1)\cdots(-j+j-1)(-j+j+1)\cdots(-j+m)} \\ &= (-1)^j \frac{m!}{j(j-1)\cdots 1 \cdot 1 \cdots (m-j)} = (-1)^j \frac{m!}{j!(m-j)!} \\ &= (-1)^j \binom{m}{j}, \quad j = 0, 1, \dots, m. \end{aligned}$$

故结论得证. □

A.6 三角函数相关

A.6.1 三角函数

定理 A.12 (三角平方差公式)

$$\sin^2 x - \sin^2 y = \sin(x-y)\sin(x+y) = \cos(y-x)\cos(y+x) = \cos^2 y - \cos^2 x.$$



证明 首先, 我们有

$$\cos^2 x - \cos^2 y = 1 - \sin^2 x - (1 - \sin^2 y) = \sin^2 y - \sin^2 x.$$

接着, 我们有

$$\begin{aligned} \sin(x-y)\sin(x+y) &= (\sin x \cos y - \cos x \sin y)(\sin x \cos y + \cos x \sin y) \\ &= \sin^2 x \cos^2 y - \cos^2 x \sin^2 y \\ &= \sin^2 x (1 - \sin^2 y) - (1 - \sin^2 x) \sin^2 y \\ &= \sin^2 x - \sin^2 y; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos(y-x)\cos(y+x) &= (\cos x \cos y + \sin x \sin y)(\cos x \cos y - \sin x \sin y) \\ &= \cos^2 x \cos^2 y - \sin^2 x \sin^2 y \\ &= \cos^2 x \cos^2 y - (1 - \cos^2 x)(1 - \cos^2 y) \\ &= \cos^2 x - \cos^2 y. \end{aligned}$$

故结论得证. □

定理 A.13

1.

$$\sin(n\theta) = \sum_{\substack{r=0 \\ 2r+1 \leq n}}^n (-1)^r \binom{n}{2r+1} \cos^{n-2r-1}(\theta) \sin^{2r+1}(\theta).$$

2.

$$\cos(n\theta) = \sum_{\substack{r=0 \\ 2r \leq n}}^n (-1)^r \binom{n}{2r} \cos^{n-2r}(\theta) \sin^{2r}(\theta).$$

3.

$$\tan(n\theta) = \frac{\sum_{r=0}^{2r+1 \leq n} (-1)^r \binom{n}{2r+1} \tan^{2r+1}(\theta)}{\sum_{r=0}^{2r \leq n} (-1)^r \binom{n}{2r} \tan^{2r}(\theta)}.$$

4.

$$\cos^n \theta = \begin{cases} \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{\substack{r=0 \\ 2r < n}}^n \binom{n}{2r} \cos((n-2r)\theta) + \frac{1}{2^n} \binom{n}{\frac{n}{2}}, & n \text{ 为偶数} \\ \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{\substack{r=0 \\ 2r < n}}^n \binom{n}{2r} \cos((n-2r)\theta), & n \text{ 为奇数} \end{cases}.$$

5.

$$\sin^n \theta = \begin{cases} \frac{(-1)^{\frac{n}{2}}}{2^{n-1}} \sum_{\substack{r=0 \\ 2r < n}}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} (-1)^r \binom{n}{2r} \sin((n-2r)\theta), & n \text{ 为偶数} \\ \frac{(-1)^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}}{2^{n-1}} \sum_{\substack{r=0 \\ 2r < n}}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} (-1)^r \binom{n}{2r} \cos((n-2r)\theta) + \frac{1}{2^n} \binom{n}{\frac{n}{2}}, & n \text{ 为奇数} \end{cases}.$$



笔记 上述结论 4 表明: $\cos^n x$ 可以表示为 $1, \cos x, \dots, \cos nx$ 的线性组合.

证明 具体证明见 [Expansions of \$\sin\(nx\)\$ and \$\cos\(nx\)\$](#) .



A.6.2 反三角函数

定理 A.14 (常用反三角函数性质)

1.

$$\arcsin x + \arcsin y = \begin{cases} \arcsin(x\sqrt{1-y^2} + y\sqrt{1-x^2}) & , xy < 0 \text{ 或 } x^2 + y^2 \leq 1 \\ \pi - \arcsin(x\sqrt{1-y^2} + y\sqrt{1-x^2}) & , x > 0, y > 0, x^2 + y^2 > 1 \\ -\pi - \arcsin(x\sqrt{1-y^2} + y\sqrt{1-x^2}) & , x < 0, y < 0, x^2 + y^2 > 1 \end{cases}.$$

2.

$$\arcsin x - \arcsin y = \begin{cases} \arcsin(x\sqrt{1-y^2} - y\sqrt{1-x^2}) & , xy \geq 0 \text{ 或 } x^2 + y^2 \leq 1 \\ \pi - \arcsin(x\sqrt{1-y^2} - y\sqrt{1-x^2}) & , x > 0, y < 0, x^2 + y^2 > 1 \\ -\pi - \arcsin(x\sqrt{1-y^2} - y\sqrt{1-x^2}) & , x < 0, y > 0, x^2 + y^2 > 1 \end{cases}.$$

3.

$$\arccos x + \arccos y = \begin{cases} \arccos(xy - \sqrt{1-x^2}\sqrt{1-y^2}) & , x + y \geq 0 \\ 2\pi - \arccos(xy - \sqrt{1-x^2}\sqrt{1-y^2}) & , x + y < 0 \end{cases}.$$

4.

$$\arccos x - \arccos y = \begin{cases} -\arccos(xy + \sqrt{1-x^2}\sqrt{1-y^2}) & , x \geq y \\ \arccos(xy + \sqrt{1-x^2}\sqrt{1-y^2}) & , x < y \end{cases}.$$

5.

$$\arctan x + \arctan y = \begin{cases} \arctan \frac{x+y}{1-xy}, & xy < 1 \\ \pi + \arctan \frac{x+y}{1-xy}, & x > 0, xy > 1 \\ -\pi + \arctan \frac{x+y}{1-xy}, & x < 0, xy > 1 \end{cases}$$

6.

$$\arctan x - \arctan y = \begin{cases} \arctan \frac{x-y}{1+xy}, & xy > -1 \\ \pi + \arctan \frac{x-y}{1+xy}, & x > 0, xy < -1 \\ -\pi + \arctan \frac{x-y}{1+xy}, & x < 0, xy < -1 \end{cases}$$

7.

$$2 \arcsin x = \begin{cases} \arcsin (2x\sqrt{1-x^2}), & |x| \leq \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \pi - \arcsin (2x\sqrt{1-x^2}), & \frac{\sqrt{2}}{2} < x \leq 1 \\ -\pi - \arcsin (2x\sqrt{1-x^2}), & -1 \leq x < -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{cases}$$

8.

$$2 \arccos x = \begin{cases} \arccos (2x^2 - 1), & 0 \leq x \leq 1 \\ 2\pi - \arccos (2x^2 - 1), & -1 \leq x < 0 \end{cases}$$

9.

$$2 \arctan x = \begin{cases} \arctan \frac{2x}{1-x^2}, & |x| \leq 1 \\ \pi + \arctan \frac{2x}{1-x^2}, & |x| > 1 \\ -\pi + \arctan \frac{2x}{1-x^2}, & x < -1 \end{cases}$$

10.

$$\cos(n \arccos x) = \frac{(x + \sqrt{x^2 - 1})^n + (x - \sqrt{x^2 - 1})^n}{2} (n \geq 1).$$



证明



命题 A.4

$$\arctan x + \arctan \frac{1}{x} = \begin{cases} \frac{\pi}{2}, & x > 0 \\ -\frac{\pi}{2}, & x < 0 \end{cases}$$



证明 令 $f(x) = \arctan x + \arctan \frac{1}{x}$, 则

$$f'(x) = \frac{1}{x^2 + 1} + \frac{1}{(\frac{1}{x})^2 + 1} \left(-\frac{1}{x^2}\right) = \frac{1}{x^2 + 1} - \frac{1}{x^2 + 1} = 0$$

故 $f(x)$ 为常函数, 于是就有 $f(x) = f(1) = \frac{\pi}{2}, \forall x > 0$; $f(x) = f(-1) = -\frac{\pi}{2}, \forall x < 0$.



A.6.3 双曲三角函数

命题 A.5

- (1) $\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \geq 1,$
- (2) $\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \geq x.$



证明 可以分别利用均值不等式和求导进行证明.



命题 A.6

1. $\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1.$
2. $\cosh(2x) = 2 \cosh^2 x - 1 = 1 - 2 \sinh^2 x.$
3. $\sinh(2x) = 2 \sinh x \cosh x.$



证明



附录 B 小技巧

B.1 长除法

例题 B.1 利用多项式除法计算 Taylor 级数和 Laurent 级数

已知 $\sin x = x - \frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{120}x^5 + \dots$, $\cos x = 1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{24}x^4 - \dots$

1. 求 $\tan x$. 2. 求 $\frac{1}{\sin^2 x}$.



笔记 实际问题中需要多展开几项, 展开得越多, 得到的结果也越多.

解 1. 根据多项式除法可得

$$\begin{array}{r} x + \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 + \dots \\ \hline 1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{24}x^4 + \dots \left| \begin{array}{r} x - \frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{120}x^5 - \dots \\ x - \frac{1}{2}x^3 + \frac{1}{24}x^5 + \dots \\ \hline - \frac{1}{3}x^2 - \frac{1}{30}x^5 + \dots \\ - \frac{1}{3}x^2 - \frac{1}{12}x^5 + \dots \\ \hline \frac{2}{15}x^5 + \dots \\ \frac{2}{15}x^5 + \dots \\ \hline 0 + \dots \end{array} \right. \end{array}$$

因此 $\tan x = \frac{\sin x}{\cos x} = x + \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 + \dots$.

2. 根据多项式乘法可得

$$\sin^2 x = \left(x - \frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{120}x^5 + \dots \right) \left(x - \frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{120}x^5 + \dots \right) = x^2 - \frac{1}{3}x^4 + \dots$$

再根据多项式除法可得

$$\begin{array}{r} \frac{1}{x^2} - \frac{1}{3} + \dots \\ \hline x^2 - \frac{1}{3}x^4 + \dots \left| \begin{array}{r} 1 \\ 1 - \frac{1}{3}x^2 + \dots \\ \hline \frac{1}{3}x^2 + \dots \\ \frac{1}{3}x^2 + \dots \\ \hline 0 + \dots \end{array} \right. \end{array}$$

因此 $\frac{1}{\sin^2 x} = \frac{1}{x^2} - \frac{1}{3} + \dots$.

□

B.2 将多项式分式分解为其部分因式的和

例题 B.2

1. 分解 $a > 0, \frac{1}{(1+x^2)(1+ax)}$.
2. 分解 $\frac{1}{(1+x^2)(1+x)^2}$.
3. 分解 $\frac{1}{(1+x^2)^2(1+x)}$.
4. 分解 $\frac{1}{(1+x^2)^2(1+x)^2}$.

解

1. 根据代数学知识我们可以设

$$\frac{1}{(1+x^2)(1+ax)} = \frac{Ax+B}{1+x^2} + \frac{C}{1+ax}. \quad (\text{B.1})$$

其中 A, B, C 均为常数.

解法一 (待定系数法):

将(B.1)式右边通分得到

$$\frac{Ax+B}{1+x^2} + \frac{C}{1+ax} = \frac{(Ax+B)(1+ax) + C(1+x^2)}{(1+x^2)(1+ax)} = \frac{(Aa+C)x^2 + (A+Ba)x + B+C}{(1+x^2)(1+ax)}.$$

比较上式左右两边分子各项系数可得

$$\begin{cases} Aa + C = 0 \\ A + Ba = 0 \\ B + C = 1 \end{cases}$$

解得: $A = -\frac{a}{1+a^2}$, $B = \frac{1}{1+a^2}$, $C = \frac{a^2}{1+a^2}$.

于是原式可分解为

$$\frac{1}{(1+x^2)(1+ax)} = \frac{-\frac{a}{1+a^2}x + \frac{1}{1+a^2}}{1+x^2} + \frac{\frac{a^2}{1+a^2}}{1+ax}.$$

解法二 (留数法):

(B.1)式两边同时乘 $1+ax$, 得到 $\frac{1}{1+x^2} = \frac{Ax+B}{1+x^2} \cdot (1+ax) + C$. 再令 $x \rightarrow -\frac{1}{a}$, 得 $C = \frac{1}{1+\frac{1}{a^2}} = \frac{a^2}{1+a^2}$.

(B.1)式两边同时乘 $1+x^2$, 得到 $\frac{1}{1+ax} = Ax+B + \frac{C}{1+ax} \cdot (1+x^2)$. 再分别令 $x \rightarrow \pm i$, 可得

$$\begin{cases} Ai + B = \frac{1}{1+ai} \\ -Ai + B = \frac{1}{1-ai} \end{cases}$$

解得: $A = -\frac{a}{1+a^2}$, $B = \frac{1}{1+a^2}$.

于是原式可分解为

$$\frac{1}{(1+x^2)(1+ax)} = \frac{-\frac{a}{1+a^2}x + \frac{1}{1+a^2}}{1+x^2} + \frac{\frac{a^2}{1+a^2}}{1+ax}.$$

解法三 (留数法 + 待定系数法):

(B.1)式两边同时乘 $1+ax$, 得到 $\frac{1}{1+x^2} = \frac{Ax+B}{1+x^2} \cdot (1+ax) + C$. 再令 $x \rightarrow -\frac{1}{a}$, 得 $C = \frac{1}{1+\frac{1}{a^2}} = \frac{a^2}{1+a^2}$.

容易直接观察出(B.1)式右边通分后分子的最高次项系数为 $Aa+C$, 常数项为 $B+C$. 并将其与(B.1)式左边的

分子对比, 可以得到

$$\begin{cases} Aa + C = 0 \\ B + C = 1 \end{cases}$$

解得: $A = -\frac{a}{1+a^2}$, $B = \frac{1}{1+a^2}$.
于是原式可分解为

$$\frac{1}{(1+x^2)(1+ax)} = \frac{-\frac{a}{1+a^2}x + \frac{1}{1+a^2}}{1+x^2} + \frac{\frac{a^2}{1+a^2}}{1+ax}.$$

2. 根据代数学知识我们可以设

$$\frac{1}{(1+x^2)(1+x)^2} = \frac{Ax+B}{1+x^2} + \frac{C}{1+x} + \frac{D}{(1+x)^2}. \quad (\text{B.2})$$

其中 A, B, C, D 均为常数.

(B.2)式两边同时乘 $(1+x)^2$, 得到

$$\frac{1}{1+x^2} = \frac{Ax+B}{1+x^2} \cdot (1+x)^2 + C(1+x) + D. \quad (\text{B.3})$$

再令 $x \rightarrow -1$, 可得 $D = \frac{1}{2}$. 对(B.3)式两边同时求导得到

$$\left. \frac{-2x}{(1+x^2)^2} \right|_{x \rightarrow -1} = \left. \left[\frac{Ax+B}{1+x^2} \cdot (1+x)^2 \right]' \right|_{x \rightarrow -1} + C = C.$$

从而 $C = \frac{1}{2}$. 令(B.2)中的 $x = 0$, 得到 $1 = B + C + D$, 将 $C = D = \frac{1}{2}$ 代入解得: $B = 0$. 再令(B.2)中的 $x = 1$, 得到 $\frac{1}{8} = \frac{A+B}{2} + \frac{C}{2} + \frac{D}{4}$, 将 $C = D = \frac{1}{2}$, $B = 0$ 代入解得: $A = -\frac{1}{2}$.
于是原式可分解为

$$\frac{1}{(1+x^2)(1+x)^2} = \frac{-x}{2(1+x^2)} + \frac{1}{2+2x} + \frac{1}{2(1+x)^2}.$$

3.

4.

□

例题 B.3 分解 $\frac{1}{1+x^4}$.

解 首先我们注意到

$$\frac{1}{1+x^4} = \frac{1}{(1+x^2)-2x^2} = \frac{1}{(x^2-\sqrt{2}x+1)(x^2+\sqrt{2}x+1)}.$$

然后根据代数学知识我们可以设

$$\frac{1}{1+x^4} = \frac{1}{(x^2-\sqrt{2}x+1)(x^2+\sqrt{2}x+1)} = \frac{Ax+B}{x^2-\sqrt{2}x+1} + \frac{Cx+D}{x^2+\sqrt{2}x+1}. \quad (\text{B.4})$$

其中 A, B, C, D 均为常数. 将上式右边通分可得

$$\frac{1}{(x^2-\sqrt{2}x+1)(x^2+\sqrt{2}x+1)} = \frac{(Ax+B)(x^2+\sqrt{2}x+1) + (Cx+D)(x^2-\sqrt{2}x+1)}{(x^2-\sqrt{2}x+1)(x^2+\sqrt{2}x+1)}.$$

比较上式左右两边分子各项系数可得

$$\begin{cases} B+D=1 \\ A+\sqrt{2}B+C-\sqrt{2}D=0 \\ A\sqrt{2}+B-C\sqrt{2}+D=0 \\ A+C=0 \end{cases}$$

解得: $A = -\frac{\sqrt{2}}{4}$, $B = \frac{1}{2}$, $C = \frac{\sqrt{2}}{4}$, $D = \frac{1}{2}$.

于是原式可分解为

$$\frac{1}{1+x^4} = \frac{-\frac{\sqrt{2}}{4}x + \frac{1}{2}}{x^2 - \sqrt{2}x + 1} + \frac{\frac{\sqrt{2}}{4}x + \frac{1}{2}}{x^2 + \sqrt{2}x + 1}.$$

□

例题 B.4 分解 $\frac{x^4}{(1+x)(1+x^2)}$.

解 先利用多项式除法用 x^4 除以 $(1+x)(1+x^2)$ 得到 $x^4 = (x-1)(1+x)(1+x^2) + 1$. 从而

$$\frac{x^4}{(1+x)(1+x^2)} = \frac{(x-1)(1+x)(1+x^2) + 1}{(1+x)(1+x^2)} = x-1 + \frac{1}{(1+x)(1+x^2)}.$$

然后再利用多项式分式的分解方法 (待定系数法和留数法) 将 $\frac{1}{(1+x)(1+x^2)}$ 分解为部分因式的和. 最后我们可将原式分解为

$$\frac{x^4}{(1+x)(1+x^2)} = x-1 + \frac{1}{2+2x} + \frac{-x+1}{2+2x^2}.$$

□