

方法 | 第一版
数学 | 技巧
考研 典型问题

黄国铭

$$\lim_{r \rightarrow 0^+} \frac{\iint_{x^2+y^2 \leq r^2} \left(x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} \right) dx dy}{(\tan r - \sin r)^2}$$

$$A = \begin{vmatrix} \alpha & \beta & & \\ \gamma & \alpha & \beta & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & \gamma & \alpha & \beta \\ & & & \gamma & \alpha \end{vmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

$$p_k = \frac{\binom{M}{k} \binom{N-M}{n-k}}{\binom{N}{n}}, \quad k = 0, 1, \dots, r \\ r = \min\{M, n\}$$

前言

关于本书



致谢

目录

前言	i
第一部分 – 高等数学	
第一章 函数、数列与极限	2
1.1 函数的基本特征	2
1.1.1 函数的主要性质 (2) 1.1.2 复合函数 (4) 1.1.3 反函数 (5)	
1.1.4 函数的连续性及间断点的类型 (5) 1.1.5 滐近线方程 (7)	
1.2 极限的概念、性质及存在准则	9
1.2.1 数列、函数极限的定义 (9) 1.2.2 数列与其子列极限之间的关系 (11)	
1.2.3 数列、函数极限的性质 (11) 1.2.4 数列、函数极限的存在准则 (12)	
1.3 计算极限值的若干方法	13
1.3.1 利用等价代换和初等变形 (13) 1.3.2 利用已知极限 (17)	
1.3.3 利用函数与极限的关系 (19) 1.3.4 利用夹逼准则 (20)	
1.3.5 求极限其他常用方法 (27) 1.3.6 Stolz 定理及其应用 (51)	
1.4 极限典型问题	58
1.4.1 极限的存在性问题 (58) 1.4.2 极限的局部逆问题 (58)	
1.4.3 无穷小量及其阶的比较 (59)	
1.5 递推形式的极限	60
1.5.1 利用存在性求极限 (60) 1.5.2 写出通项求极限 (64)	
1.5.3 求解线性递推关系 (67)	
第二章 一元函数微分学	69
2.1 导数与微分	69
2.1.1 导数的定义与可微性质 (69)	
2.1.2 反函数、用参数方程确定的函数、隐函数的导数 (74)	
2.1.3 高阶导数与 Leibniz 公式 (76)	

2.2 函数的可导性	81
2.2.1 含绝对值函数的可导性 (81) 2.2.2 分段函数的可导性 (83)	
2.3 微分中值定理	83
2.3.1 四大基本定理 (84) 2.3.2 单中值问题 (85) 2.3.3 双中值问题 (90)	
2.3.4 高阶中值问题 (93)	
2.4 Taylor 展开与差商	96
2.4.1 证明中值定理 (96) 2.4.2 中值点的极限 (98) 2.4.3 无穷远处的极限 (99)	
2.4.4 关于界的估计 (100) 2.4.5 差商与导数 (102)	
2.5 Lagrange 插值与 Hermite 插值	104
2.5.1 Lagrange 插值 (105) 2.5.2 Hermite 插值 (105)	
2.6 导数的综合应用	109
2.6.1 极值问题 (109) 2.6.2 不等式与函数凹凸性及拐点 (111)	
2.6.3 导数的几何意义与曲线的曲率 (115) 2.6.4 导数不等式证明中的应用 (116)	
第三章 一元函数积分学	117
3.1 不定积分	117
3.1.1 基础类型 (117) 3.1.2 隐函数类型 (137) 3.1.3 复合类型 (137)	
3.2 定积分	143
3.2.1 求出不定积分后计算 (143) 3.2.2 运用定积分性质进行相关计算 (145)	
3.2.3 积分作为上下限的函数 (148) 3.2.4 积分中值定理 (150)	
3.2.5 定积分的几何应用 (153) 3.2.6 定积分的物理应用 (156)	
3.2.7 定积分综合性问题 (157)	
3.3 反常积分	180
3.3.1 反常积分的计算 (180) 3.3.2 反常积分敛散性 (185)	
3.3.3 反常积分的极限 (186) 3.3.4 反常积分综合性问题 (188)	
3.4 特殊构型积分补充	189
3.4.1 Euler 积分 (189) 3.4.2 Dirichlet 积分 (190)	
3.4.3 Lobachevsky 积分法 (191) 3.4.4 Fresnel 积分与 Fejér 积分 (191)	
3.4.5 Laplace 积分 (192)	
3.5 留数定理及其应用	192
3.5.1 留数 (192) 3.5.2 留数定理 (193) 3.5.3 留数计算 (193)	
3.5.4 留数定理的应用 (195)	

第四章 向量代数与空间解析几何	201
4.1 向量代数	201
4.1.1 模、方向角、投影 (201) 4.1.2 数量积、向量积、混合积 (202)	
4.2 空间解析几何	203
4.2.1 空间平面与直线 (203) 4.2.2 空间平面、直线的方程及位置关系 (204)	
4.2.3 曲面及其方程 (205) 4.2.4 空间曲线及其方程 (209)	
第五章 多元函数微分学	214
5.1 多元函数的极限与连续	214
5.1.1 多元函数的极限 (214) 5.1.2 多元函数的连续性与可微性 (215)	
5.1.3 二元函数的 Taylor 展开 (218)	
5.2 多元函数的偏导数	219
5.2.1 偏导数与隐函数 (219) 5.2.2 全微分形式不变性 (221)	
5.2.3 复合函数微分法 (链式法则) (224) 5.2.4 高阶全微分 (229)	
5.2.5 高阶偏导数 (230) 5.2.6 偏微分方程 (232)	
5.3 极值	233
5.3.1 二元函数的极值 (233) 5.3.2 条件极值 (236)	
5.3.3 多元函数的最值问题 (238)	
5.4 方向导数与梯度	239
5.4.1 方向导数的计算 (239) 5.4.2 梯度的计算 (240)	
第六章 多元函数积分学	241
6.1 重积分	241
6.1.1 重积分定义 (241) 6.1.2 重积分的计算及相关方法 (244)	
6.1.3 反常二重积分与含参变量积分 (255) 6.1.4 重积分的积分中值定理 (258)	
6.1.5 重积分的应用 (260)	
6.2 曲线积分	266
6.2.1 两类曲线积分 (266) 6.2.2 Green 公式 (272)	
6.3 曲面积分	280
6.3.1 两类曲面积分 (281) 6.3.2 Gauss 公式、Stokes 公式 (289)	
6.4 多元积分学的应用与场论概述	299
6.4.1 多元积分学的应用 (299) 6.4.2 梯度、散度和旋度 (301)	
6.4.3 梯度、散度、旋度的基本公式及其应用 (303)	

第七章 无穷级数	305
7.1 常数项级数	305
7.1.1 常数项级数的敛散性及其判别法 (305) 7.1.2 正项级数的审敛法 (307)	
7.1.3 交错级数 (308) 7.1.4 一般数项级数的判别法 (308)	
7.2 幂级数	309
7.2.1 下降阶乘幂 (310) 7.2.2 幂级数的性质 (311) 7.2.3 函数展开为幂级数 (313)	
7.2.4 幂级数的收敛域及和函数 (316) 7.2.5 幂级数的应用 (324)	
7.3 Fourier 级数	327
7.3.1 Fourier 系数 (327) 7.3.2 周期为 $2l$ 的 Fourier 展开 (327)	
7.3.3 Fourier 级数综合性问题 (329)	
第八章 微分方程	331
8.1 一阶微分方程	331
8.1.1 变量分离方程 (331) 8.1.2 齐次微分方程 (332) 8.1.3 线性微分方程 (333)	
8.1.4 Bernoulli 微分方程 (334) 8.1.5 恰当方程与积分因子 (335)	
8.2 高阶微分方程	338
8.2.1 常系数齐次线性微分方程 (338) 8.2.2 常系数非齐次线性微分方程 (340)	
8.2.3 可降阶的高阶微分方程 (343) 8.2.4 Euler 微分方程 (343)	
8.2.5 二阶变系数线性微分方程 (345)	
8.3 微分方程综合性问题	348
8.3.1 微分方程与函数性质 (348) 8.3.2 微分方程与积分 (349)	
8.3.3 微分方程与幂级数 (356)	
第二部分 – 线性代数	
第九章 行列式	360
9.1 行列式的计算	360
9.1.1 行列式的定义及性质 (360) 9.1.2 行列式按行 (列) 展开定理 (363)	
9.1.3 具象行列式的计算 (364) 9.1.4 抽象行列式的计算 (371)	
9.2 Vandermonde 行列式与代数余子式	371
9.2.1 Vandermonde 行列式计算 (371) 9.2.2 方幂指数跳跃 (373)	
9.2.3 代数余子式问题 (374)	
第十章 矩阵	376
10.1 矩阵的基本运算	376
10.1.1 矩阵的概念 (376) 10.1.2 矩阵的运算 (379)	
10.1.3 Carlson 不等式及其应用 (381)	

10.2 伴随矩阵与逆矩阵	383
10.2.1 伴随矩阵 (383) 10.2.2 可逆矩阵 (384)	
10.3 初等变换与初等矩阵	388
10.3.1 初等变换 (388) 10.3.2 初等矩阵 (390)	
10.4 矩阵的秩	392
10.4.1 秩的相关不等式证明 (392) 10.4.2 秩的相关等式证明 (394)	
10.4.3 秩的应用 (395)	
10.5 矩阵的等价标准形	396
10.5.1 矩阵分解 (396) 10.5.2 矩阵方程 (397)	
第十一章 线性方程组	401
11.1 向量组的线性相关性	401
11.1.1 向量的概念 (401) 11.1.2 向量的线性组合 (401)	
11.1.3 向量组的极大无关组 (403) 11.1.4 Cramer 法则的应用 (404)	
11.2 向量组的秩	405
11.2.1 向量组的线性表示 (405) 11.2.2 向量组相互表示 (407)	
11.3 齐次线性方程组	408
11.3.1 齐次方程组的一般解 (408) 11.3.2 齐次方程组的基础解系 (409)	
11.4 非齐次线性方程组	410
11.4.1 方程组与行列式 (410) 11.4.2 线性相关与线性无关 (411)	
11.4.3 非齐次线性方程组解的讨论 (412)	
11.5 方程组的同解与公共解	412
11.5.1 方程组的同解 (412) 11.5.2 方程组的公共解 (413)	
第十二章 线性空间	415
12.1 线性空间与子空间	415
12.2 子空间的和与交	415
12.3 维数公式与直和分解	415
12.4 同构映射与对偶空间	415
第十三章 线性变换	416
13.1 线性变换及其矩阵	416
13.1.1 线性变换 (416) 13.1.2 过渡矩阵及其性质 (417)	
13.2 矩阵的特征值与特征向量	419
13.2.1 矩阵的特征值 (419) 13.2.2 矩阵的特征向量 (421)	
13.2.3 公共特征向量 (424) 13.2.4 Schmidt 正交化 (424)	

13.3 矩阵相似与可对角化	425
13.3.1 矩阵的相似 (425) 13.3.2 矩阵的合同 (427) 13.3.3 可对角化 (427)	
13.4 方阵的幂	429
13.4.1 利用方阵的迹求解 (429) 13.4.2 利用幂零矩阵求解 (430)	
13.4.3 利用二项式展开求解 (430) 13.4.4 Cayley-Hamilton 定理 (431)	
13.4.5 矩阵幂转化 (431)	
第十四章 二次型	432
14.1 正定性与半正定性	432
14.1.1 正定性 (432) 14.1.2 半正定性 (435)	
14.2 二次型	437
14.2.1 二次型的矩阵表示 (437) 14.2.2 惯性指数与惯性定理 (438)	
14.2.3 二次型化为标准形 (440) 14.2.4 正交矩阵与正交变换 (443)	
14.2.5 直角坐标变换 (448) 14.2.6 谱分解 (451) 14.2.7 正交变换的应用 (455)	
第三部分 – 概率论与数理统计	
第十五章 概率论的基本概念	460
15.1 随机事件及其概率	460
15.1.1 事件的运算 (460) 15.1.2 概率的性质 (461)	
15.1.3 古典概率与几何概率 (462) 15.1.4 概率基本公式及条件概率 (462)	
15.1.5 全概率公式和 Bayes 公式 (462)	
15.2 事件的独立性	463
第十六章 随机变量及其分布	464
16.1 离散型随机变量的概率分布	464
16.1.1 离散型随机变量的分布函数 (464) 16.1.2 二项分布 (465)	
16.2 连续型随机变量的概率分布	465
16.2.1 连续型随机变量概率密度 (465) 16.2.2 均匀分布 (466)	
16.2.3 指数分布 (466) 16.2.4 正态分布 (467)	
第十七章 多维随机变量及其分布	469
17.1 多维离散型随机变量	469
17.2 多维连续型随机变量	469
17.2.1 边缘概率密度与边缘分布函数 (469)	
17.2.2 二维连续型随机变量函数的分布 (470)	

17.2.3 二维随机变量条件概率密度与条件分布函数 (471)	
17.2.4 二维正态分布 (472) 17.2.5 卷积公式 (473)	
17.3 多维混合型随机变量	474
17.3.1 二维混合型随机变量的分布 (474) 17.3.2 随机变量与函数性质 (476)	
第十八章 随机变量的数字特征	477
18.1 数学期望与方差	477
18.1.1 数学期望 (477) 18.1.2 方差 (479)	
18.2 协方差与相关系数	481
18.2.1 随机变量的独立性与相关性 (481) 18.2.2 协方差 (482)	
18.2.3 相关系数 (483)	
第十九章 大数定律与中心极限定理	486
19.1 Chebyshev 不等式	486
19.2 大数定律	486
19.2.1 Bernoulli 大数定律 (487) 19.2.2 Chebyshev 大数定律 (487)	
19.2.3 Khinchin 大数定律 (487)	
19.3 中心极限定理	487
19.3.1 Levy Lindeberg 定理 (488) 19.3.2 De Moivre-Laplace 定理 (489)	
第二十章 数理统计的基本概念	490
20.1 随机样本	490
20.1.1 常用统计量 (491) 20.1.2 样本数字特征的性质 (492)	
20.2 三大抽样分布	492
20.2.1 χ^2 分布 (492) 20.2.2 t 分布 (494) 20.2.3 F 分布 (495)	
20.3 正态总体的抽样分布	497
20.3.1 单正态总体的抽样分布 (498) 20.3.2 双正态总体的抽样分布 (498)	
第二十一章 正态总体参数的区间估计与假设检验	499
21.1 区间估计	499
21.1.1 区间估计的定义 (499) 21.1.2 区间估计的一般步骤 (501)	
21.2 正态总体均值和方差的区间估计	501
21.2.1 单个正态总体参数的置信区间 (501)	
21.2.2 双正态总体均值差与方差比的置信区间 (502)	
21.3 单侧置信区间	503

21.4 假设检验	503	
21.4.1 假设检验的基本思想 (505)	21.4.2 假设检验的解题步骤 (506)	
21.4.3 单个正态总体的假设检验 (506)	21.4.4 双正态总体的假设检验 (509)	
第二十二章 参数的点估计及其优良性	510	
22.1 矩估计法	510	
22.2 极大似然估计	512	
22.3 估计量优良性的判定标准	514	
22.3.1 无偏性 (514)	22.3.2 有效性 (514)	22.3.3 一致性 (515)
附录 A 积分表推导	516	
A.1 含有 $ax + b$ 的积分	516	
A.2 含有 $\sqrt{ax + b}$ 的积分	517	
A.3 含有 $x^2 \pm a^2$ 的积分	517	
A.4 含有 $ax^2 + b$ ($a > 0$) 的积分	517	
A.5 含有 $ax^2 + b + c$ ($a > 0$) 的积分	518	
索引	521	
参考文献	521	

第一部分

高等数学

第1章

函数、数列与极限

“迟序之数，非出神怪，有形可检，有数可推。”

——祖冲之

函数是微积分讨论的主要对象，它以极限理论为基础，在研究函数时我们总是通过函数值 $f(x)$ 的变化来看函数关系的性质，所以应该用运动变化的观点来掌握函数。极限与函数的连续性理论是微积分的基础，如何用已知的、可求的来逼近未知的、要求的，用有限来逼近无限，在无限变化的过程中考察变量的变化趋势，从有限过渡到无限，这是本章需掌握的基本思想。

1.1 函数的基本特征

函数的基本特征包括：定义域和值域、解析式与图像、奇偶性、单调性、零点以及渐近线等，这些基本特征可以帮助我们更好地理解和分析函数的性质和行为。

1.1.1 函数的主要性质

定义域

定义 1.1.1 (函数的概念). 设有两个变量 x 与 y ，如果变量 x 在其变化范围 D 内任取一个确定的数值时，变量 y 按照一定的规则 f ，总有唯一确定的数值和它对应，则称变量 y 是变量 x 的函数，记作 $y = f(x)$ ， x 称为自变量， y 称为因变量， D 称为函数的定义域， f 表示由 x 确定 y 的对应规则。

例 1.1.1. 求函数 $y = \frac{1}{\sqrt{25 - x^2}} + \arctan \frac{x - 1}{5}$ 的定义域。

要使函数有意义，变量 x 必须同时满足 $\begin{cases} 25 - x^2 > 0 \\ \left| \frac{x - 1}{5} \right| \leq 1 \end{cases} \Rightarrow -4 \leq x < 5$ ，因此定义域为 $[-4, 5)$ 。

单调性

定义 1.1.2 (函数的单调性). 设函数 $f(x)$ 的定义域为 D , 区间 $I \subset D$, 对于 $\forall x_1, x_2 \in I$, 当 $x_1 < x_2$ 时, 恒有 $f(x_1) < f(x_2)$ (或 $f(x_1) > f(x_2)$) 则称函数 $f(x)$ 在区间 I 上单调递增 (递减), 若 $f(x_1) \leq f(x_2)$ (或 $f(x_1) \geq f(x_2)$), 则称函数 $f(x)$ 单调不减 (不增).

定理 1.1.1 (函数的单调性判定). 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 如果在区间上有 $f'(x) \geq 0$ (或 $f'(x) \leq 0$) (且不在任一子区间取恒等号), 则 $f(x)$ 在 (a, b) 内严格单调递增 (或严格单调递减).

例 1.1.2. 由 $f'(x_0) > 0$ 能否得到函数 $f(x)$ 在 x_0 的某个邻域内单调递增?

不能, 理由如下: 利用一阶导数判断函数的单调性, 需要已知导数在某区间的正负, 而不是某一点导数值的正负

奇偶性

定义 1.1.3 (函数的奇偶性). 设函数 $f(x)$ 在关于原点对称的区间 D 上有定义, 如果对 D 上任意点 x , 均有 $f(-x) = f(x)$ (或 $f(-x) = -f(x)$), 则称函数 $f(x)$ 为偶函数 (或奇函数). 奇函数的图像关于原点对称, 偶函数的图像关于 y 轴对称.

例 1.1.3 (1987 数二). $f(x) = |x \sin x| e^{\cos x}$ ($-\infty < x < +\infty$) 是

- A. 有界函数
- B. 单调函数
- C. 周期函数
- D. 偶函数

由于 $|x \sin x|$ 和 $e^{\cos x}$ 都是偶函数, 则其乘积 $f(x) = |x \sin x| e^{\cos x}$ 为偶函数, 选 D.

周期性

定理 1.1.2 (函数的周期性定理). 若函数 $f(x)$ 以 T 为周期, 则

$$f(x) = f(x + T) = f(x + 2T) = \cdots = f(x + nT).$$

例 1.1.4 (2014 数一). 设 $f(x)$ 是周期为 4 的可导奇函数, 且 $f'(x) = 2(x - 1)$ ($0 \leq x \leq 2$), 求 $f(7)$.

$f(x) = \int 2(x - 1) dx = x^2 - 2x + C$, 因为 $f(x)$ 是奇函数, 所以 $f(0) = 0$, 可知 $C = 0$, 于是 $f(x) = x^2 - 2x$, 又 $f(x)$ 的周期为 4, 于是 $f(7) = f(-1 + 8) = f(-1) = -f(1) = 1$.

有界性

定理 1.1.3 (函数的有界性定理). 若函数 $f(x)$ 在闭区间 $[a, b]$ 上连续, 则 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上有界; 若函数 $f(x)$ 在开区间 (a, b) 内连续, 且 $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x)$ 与 $\lim_{x \rightarrow b^-} f(x)$ 存在, 则函数 $f(x)$ 在 (a, b) 内有界.

例 1.1.5 (2004 数三). 函数 $f(x) = \frac{|x|\sin(x-2)}{x(x-1)(x-2)^2}$ 在下列哪个区间内有界

- A. $(-1, 0)$ B. $(0, 1)$ C. $(1, 2)$ D. $(2, 3)$

当 $x \neq 0, 1, 2$ 时, $f(x)$ 连续, 而

$$\lim_{x \rightarrow -1^+} f(x) = -\frac{\sin 3}{18}, \quad \lim_{x \rightarrow 0^-} f(x) = -\frac{\sin 2}{4}, \quad \lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \frac{\sin 2}{4}, \quad \lim_{x \rightarrow 1} f(x) = \infty, \quad \lim_{x \rightarrow 2} f(x) = \infty$$

所以函数 $f(x)$ 在 $(-1, 0)$ 上有界.

1.1.2 复合函数

定义 1.1.4 (复合函数). 如果我们有两个函数 f 和 g , 而两者的定义域分别是 D_f 和 D_g , 值域分别是 I_f 和 I_g . 如果 $I_f \cap D_g \neq \emptyset$, 那我们定义复合函数为

$$g \circ f := \{(x, z) \mid (\exists y \in I_f \cap D_g) [y = f(x) \wedge z = g(y)]\}.$$

例 1.1.6 (2001 数二). 设 $f(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 1 \\ 0, & |x| > 1 \end{cases}$, 则 $f\{f[f(x)]\}$ 等于

- A. 0 B. 1 C. $\begin{cases} 1, & |x| \leq 1 \\ 0, & |x| > 1 \end{cases}$ D. $\begin{cases} 0, & |x| \leq 1 \\ 1, & |x| > 1 \end{cases}$

因为 $f \in \{0, 1\}$, 所以 $f[f(x)] = 1$, 那么 $f\{1\} = 1$, 因此选 B.

定理 1.1.4. $\lim_{n \rightarrow \infty} x^n = \begin{cases} 0, & |x| < 1 \\ \infty, & |x| > 1 \\ 1, & x = 1 \\ 1, & x = -1, n = 2k \\ -1, & x = -1, n = 2k + 1. \end{cases}$

例 1.1.7. 已知 $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{2 + (2x)^n + x^{2n}}$ ($x \geq 0$), $g(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - x^{2n+1}}{1 + x^{2n}}$, 求 $f(g(x))$ 的表达式.

由推论 1.3.3 知, $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{1^n + 1^n + (2x)^n + (x^2)^n} = \max\{1, 2x, x^2\} =$

$$\begin{cases} 1, & 0 \leq x < \frac{1}{2} \\ 2x, & \frac{1}{2} \leq x < 2 \\ x^2, & 2 \leq x \end{cases}$$

又由定理 1.1.4 可得 $g(x) = \begin{cases} 1, & -1 \leq x < 1 \\ -x, & |x| > 1 \\ 0, & x = 1 \end{cases}$, 于是 $g(x)$ 的图像

如图 1.1.1 所示, 那么

$$I : x = 1 \Rightarrow g(1) = 0 \Rightarrow f(g(0)) = 1$$

$$II : \begin{cases} -2 < x < -1 \\ 1 \leq x < 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} g(x) = -x \\ g(x) = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} -x > 2 \\ -x > 1 \\ -1 \leq x < 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f(g(x)) = x^2 \\ f(g(x)) = -2x \\ f(g(x)) = 2 \end{cases}$$

$$III : x \leq -2 \Rightarrow g(x) = -x \Rightarrow f(g(x)) = x^2$$

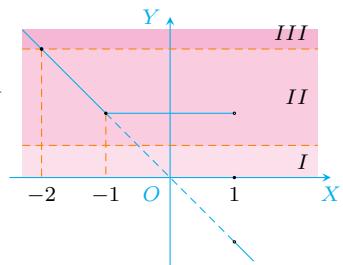


图 1.1.1

$$\text{综上, } f(g(x)) = \begin{cases} x^2, & x \leq -2 \\ -2x, & -2 < x < -1 \\ 2, & -1 \leq x < 1 \\ 1, & x = 1. \end{cases}$$

1.1.3 反函数

定义 1.1.5 (反函数). 设 f 为一函数, 其定义域为 D_f , 值域为 I_f , 如果存在一函数 g , 其定义域和值域分别为 I_g , D_g , 并对每一 $x \in D_f$ 有: $g(f(x)) = x$, 则称 g 为 f 的反函数, 记为 f^{-1} .

例 1.1.8. 已知 g 是 f 的反函数, 则 $f(2x)$ 的反函数为

$$\text{A. } y = \frac{1}{2}g(x) \quad \text{B. } y = 2g(x) \quad \text{C. } y = \frac{1}{2}g(2x) \quad \text{D. } y = 2g(2x)$$

令 $y = f(2x)$, 反解出 $x : x = \frac{1}{2}g(y)$, 交换 x 与 y 的位置, 于是 $y = \frac{1}{2}g(x)$, 选 A.

例 1.1.9. 求 $y = \sqrt[3]{x + \sqrt{1+x^2}} + \sqrt[3]{x - \sqrt{1+x^2}}$ 的反函数表达式.

令 $y_1 = \sqrt[3]{x + \sqrt{1+x^2}}$, $y_2 = \sqrt[3]{x - \sqrt{1+x^2}}$, 那么 $y = y_1 + y_2$, 又因为
 $y_1^3 + y_2^3 = (y_1 + y_2)(y_1^2 - y_1 y_2 + y_2^2) = (y_1 + y_2)[(y_1 + y_2)^2 - 3y_1 y_2]$

其中 $y_1^3 + y_2^3 = x + \sqrt{1+x^2} + x - \sqrt{1+x^2} = 2x$, $y_1 y_2 = \sqrt[3]{x^2 - 1 - x^2} = -1$, 因此

$$2x = y(y^2 + 3) \Rightarrow x = \frac{y(y^2 + 3)}{2}.$$

例 1.1.10. 设 $f(x) = 2023x^{2023} + x + 1$, $f^{-1}(x)$ 是 $f(x)$ 的反函数, 计算极限

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f^{-1}(2023x) - f^{-1}(x)}{\sqrt[2023]{x}}.$$

设 $g(x) = f^{-1}(x)$, 由定义 1.1.5, 得 $f(g(x)) = x$, 于是

$$x = 2023g^{2023}(x) + g(x) + 1$$

则

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f^{-1}(x)}{\sqrt[2023]{x}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{g(x)}{\sqrt[2023]{2023x^{2023} + g(x) + 1}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt[2023]{2023 + \frac{1}{g^{2022}(x)} + \frac{1}{g^{2023}(x)}}} = \frac{1}{\sqrt[2023]{2023}}$$

进而有

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f^{-1}(2023x)}{\sqrt[2023]{x}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f^{-1}(2023x)}{\sqrt[2023]{2023x}} \cdot \frac{\sqrt[2023]{2023x}}{\sqrt[2023]{x}} = \frac{\sqrt[2023]{2023}}{\sqrt[2023]{2023}} = 1$$

故原极限为 $1 - \frac{1}{\sqrt[2023]{2023}}$.

1.1.4 函数的连续性及间断点的类型

连续函数

定义 1.1.6 (函数连续). 若 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$, 则称函数 $f(x)$ 在点 x_0 处连续, 若函数 $f(x)$ 在区间 I 内每一点都连续, 则称函数 $f(x)$ 在区间 I 内连续.

定义 1.1.7 (单侧连续). 若 $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = f(x_0)$, 则称函数 $f(x)$ 在 x_0 处左连续; 若 $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = f(x_0)$, 则称函数 $f(x)$ 在 x_0 处右连续.

定理 1.1.5 (函数连续的充要条件). $f(x)$ 在点 x_0 处连续等价于 $f(x)$ 在点 x_0 处既左连续又右连续.

第一类间断点

定义 1.1.8 (可去间断点). 如果不连续点 x_0 两侧函数的极限存在且相等, 无论在 x_0 处是否定义 (若有定义, 则函数值不是在这一点的左右极限), 这类间断点叫可去间断点 (或可移间断点), 这类函数通过补充定义

$$f(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x)$$

后可变为连续函数.

定义 1.1.9 (跳跃间断点). 如果不连续点 x_0 两侧函数的极限存在但不相等, 称函数在这些点是跳跃间断点.

第二类间断点

所有不是第一类间断点的类型, 都是第二类间断点.

定义 1.1.10 (无穷间断点). 函数在某点的左右极限至少有一个是无穷, 这样的间断点就是无穷间断点, 由此可知函数在这个间断点的某个邻域中无界. 无穷间断点的一个重要特性是它是必不可积的.

定义 1.1.11 (振荡间断点). 对于一个函数, 当自变量趋于某一点时, 函数值在两个常数间变动无限多次, 这时函数在这一点处不存在有限极限也不是无穷. 这样的间断点是振荡间断点, 由此可知函数在这个间断点的某个邻域中有界. 振荡间断点的一个重要特性是它可能是可积的.

例 1.1.11. 设 $f(x) = \frac{\left(1 - 2^{\frac{1}{x-1}}\right)e^{\frac{1}{x}}}{1 + 2^{\frac{2}{x-1}}} \cdot \arctan \frac{|x+1|}{x+1}$, 则下列关于 $f(x)$ 间断点的描述正确的是

- A. $f(x)$ 有一个可去间断点, 一个跳跃间断点, 一个第二类间断点
- B. $f(x)$ 有两个可去间断点, 一个第二类间断点
- C. $f(x)$ 有两个跳跃间断点, 一个第二类间断点
- D. $f(x)$ 有一个跳跃间断点, 两个第二类间断点

因为 $x \neq -1, 0, 1$, 下求各不连续点的左右极限值,

$$f(-1^-) = \lim_{x \rightarrow -1^-} f(x) = \lim_{\substack{x \rightarrow -1-\delta \\ \delta > 0}} f(x) = \frac{\left(1 - 2^{-\frac{1}{\delta}}\right)e^{-\frac{1}{\delta}}}{1 + 2^{-\frac{2}{\delta}}} \cdot \frac{\pi}{2}, \quad f(-1^+) = \lim_{x \rightarrow -1^+} f(x) = \lim_{\substack{x \rightarrow -1+\delta \\ \delta > 0}} f(x) = 0$$

则 $x = -1$ 为 f 的跳跃间断点;

$$f(0^-) = \lim_{x \rightarrow 0^-} f(x) = \lim_{\substack{x \rightarrow 0-\delta \\ \delta > 0}} f(x) = 0, \quad f(0^+) = \lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \lim_{\substack{x \rightarrow 0+\delta \\ \delta > 0}} f(x) = +\infty$$

则 $x = 0$ 为 f 的第二类间断点;

$$f(1^-) = \lim_{x \rightarrow 1^-} f(x) = \lim_{\substack{x \rightarrow 1-\delta \\ \delta > 0}} f(x) = e \cdot \arctan \frac{1}{2}, \quad f(1^+) = \lim_{x \rightarrow 1^+} f(x) = \lim_{\substack{x \rightarrow 1+\delta \\ \delta > 0}} f(x) = 0$$

则 $x = 1$ 为 f 的跳跃间断点, 故选 C.

1.1.5 漐近线方程

定义 1.1.12 (铅直漐近线). 若 $\lim_{x \rightarrow \varepsilon^-} f(x)$ 与 $\lim_{x \rightarrow \varepsilon^+} f(x)$ 至少有一个为无穷大, 则称 $x = \varepsilon$ 为曲线 $y = f(x)$ 的铅直漐近线.

定义 1.1.13 (水平漐近线). 若 $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = b$ 或 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = b$, 其中 b 为常数, 则称 $y = b$ 为曲线 $y = f(x)$ 的水平漐近线.

定义 1.1.14 (斜漐近线). 若 $\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x} = k$ 存在且不为零, 同时 $\lim_{x \rightarrow -\infty} [f(x) - kx] = b$ 也存在 (或 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} = k$ 存在且不为零, 同时 $\lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) - kx] = b$ 也存在), 则称 $y = kx + b$ 为曲线 $y = f(x)$ 斜漐近线.

例 1.1.12. 求下列曲线的全部漐近线.

$$\left| \begin{array}{ll} (1) y = \sqrt{4x^2 + x} \ln \left(2 + \frac{1}{x} \right). & (2) y = e^{x-2} \arctan \frac{x^2 + x + 1}{(x-1)(x+2)}. \\ (3) y = \frac{x^3}{(x-1)^2} \cos(2 \arctan x). & (4) y = (2x+1) \arctan x + \frac{\arctan \frac{x^2-1}{x^2+x-2}}{x^2+x-2}. \\ (5) y^3 = x(x^2 - 2y). & (6) x^3 - y^3 = 6xy. \end{array} \right.$$

(1) 由 $\lim_{x \rightarrow (-\frac{1}{2})^+} y = -\infty$, 且 $\lim_{x \rightarrow 0^-} y = 0$, 所以曲线存在一条铅直漐近线 $x = -\frac{1}{2}$, 又

$$\begin{aligned} k &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{y}{x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\sqrt{4x^2 + x} \ln \left(2 + \frac{1}{x} \right)}{x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{|x|}{x} \sqrt{4 + \frac{1}{x}} \ln \left(2 + \frac{1}{x} \right) = 2 \ln 2 \\ b &= \lim_{x \rightarrow +\infty} (y - kx) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left[\sqrt{4x^2 + x} \ln \left(2 + \frac{1}{x} \right) - 2 \ln 2 x \right] \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \left[\sqrt{4x^2 + x} \ln 2 - 2 \ln 2 \cdot x + \sqrt{4x^2 + x} \ln \left(2 + \frac{1}{x} \right) - \sqrt{4x^2 + x} \ln 2 \right] \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \left[\frac{x}{\sqrt{4x^2 + x} + 2x} \cdot \ln 2 + |x| \sqrt{4 + \frac{1}{x}} \ln \left(1 + \frac{1}{2x} \right) \right] = \frac{1}{4} \ln 2 + 1 \end{aligned}$$

故存在一条斜漐近线方程 $y = 2 \ln 2 x + \frac{1}{4} \ln 2 + 1$, 同理当 $x \rightarrow -\infty$ 时, 也存在一条斜漐近线方程

$$y = -2 \ln 2 x - \frac{1}{4} \ln 2 - 1.$$

(2) 由 $\lim_{x \rightarrow -2^-} y = \frac{\pi}{2e^4}$, $\lim_{x \rightarrow -2^+} y = -\frac{\pi}{2e^4}$, $\lim_{x \rightarrow 1^-} y = -\frac{\pi e}{2}$, $\lim_{x \rightarrow 1^+} y = \frac{\pi e}{2}$, $\lim_{x \rightarrow 0^-} y = -\infty$, 故 y 的铅直漐近线为 $x = 0$, 因为

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} y = \lim_{x \rightarrow +\infty} y = \lim_{x \rightarrow \infty} y = \lim_{x \rightarrow \infty} e^{x-2} \arctan \frac{1 + \frac{1}{x} + \frac{1}{x^2}}{1 + \frac{1}{x} - \frac{2}{x^2}} = \frac{\pi}{4}$$

故 y 的水平漐近线为 $y = \frac{\pi}{4}$, 又因为

$$k = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{y}{x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^{-x^2}}{x} \arctan \frac{x^2 + x + 1}{(x-1)(x+2)} = 0$$

故曲线共存在两条漐近线, 分别为 $x = 0$ 与 $y = \frac{\pi}{4}$.

(3) 显然 $x = 1$ 为该曲线的铅直渐近线, 下求斜渐近线,

$$\begin{aligned} k &= \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{y}{x} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{x^2}{(x-1)^2} \cos(2 \arctan x) = 1 \cdot -1 = -1 \\ b &= \lim_{x \rightarrow \pm\infty} (y - kx) = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{x^3 \cos(2 \arctan x) + x(x-1)^2}{(x-1)^2} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{-x^3 + x^3 - 2x^2 + x}{(x-1)^2} = -2 \end{aligned}$$

所以斜渐近线方程为 $y = -x - 2$.

(4) 因为 $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \infty$, 所以曲线 $y = f(x)$ 没有水平渐近线; 由 $\lim_{x \rightarrow -2} f(x) = \infty$, 得 $x = -2$ 为曲线 $y = f(x)$ 的铅直渐近线; 由

$$f(-1^-) = \lim_{x \rightarrow -1^-} f(x) = \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{4} = 0, f(-1^+) = \lim_{x \rightarrow -1^+} f(x) = \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2}$$

得 $x = -1$ 不是该曲线的铅直渐近线; 又由

$$\lim_{x \rightarrow 1} f(x) = \frac{3\pi}{4} + \lim_{x \rightarrow 1} \frac{\arctan \frac{1}{x^2-1}}{x^2+x-2} = \infty$$

得 $x = 1$ 是该曲线的铅直渐近线; 下求斜渐近线,

$$k_1 = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \left(2 + \frac{1}{x} \right) \arctan x + \frac{\arctan \frac{1}{x^2-1}}{x^3+x^2-2x} = -\pi$$

那么

$$\begin{aligned} b_1 &= \lim_{x \rightarrow -\infty} (f(x) - k_1 x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \left[(2x+1) \arctan x + \frac{\arctan \frac{1}{x^2-1}}{x^2+x-2} + \pi x \right] \\ &= 2 \lim_{x \rightarrow -\infty} x \left(\arctan x + \frac{\pi}{2} \right) + \lim_{x \rightarrow -\infty} \arctan x + \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\arctan \frac{1}{x^2-1}}{x^2+x-2} = -\frac{\pi}{2} - 2 \end{aligned}$$

那么一条斜渐近线为 $y = -\pi x - \frac{\pi}{2} - 2$, 同理可求解另一条斜渐近线为 $y = \pi x + \frac{\pi}{2} - 2$.

(5) 令 $k = \frac{y}{x}$, 有

$$k^3 \cdot x^3 = x(x^2 - 2kx) \Rightarrow k^3 = 1 - \frac{2k}{x}$$

两边取极限有

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} k^3 = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(1 - \frac{2k}{x} \right) \Rightarrow \lim_{x \rightarrow \pm\infty} k^3 = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(1 - 2k \cdot \frac{1}{x} \right) \Rightarrow k = 1$$

令 $b = y - kx = y - x$, 那么

$$(x+b)^3 = x(x^2 - 2x + 2b) \Rightarrow \frac{b^3}{x^2} + 3b + \frac{3b^2}{x} = -2\frac{b}{x} - 2$$

两边取极限有

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(\frac{b^3}{x^2} + 3b + \frac{3b^2}{x} \right) = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(-2\frac{b}{x} - 2 \right)$$

解得 $b = -\frac{2}{3}$, 于是斜渐近线方程为 $y = x - \frac{2}{3}$.

(6) 令 $y = tx$, 代入原方程得 $\begin{cases} x = \frac{6t}{1-t^3} & \text{当 } x \rightarrow \infty \text{ 时}, \frac{6t}{1-t^3} \rightarrow \infty \Rightarrow t \rightarrow 1, \text{ 并且此时 } y \rightarrow \infty, \text{ 因此} \\ y = \frac{6t^2}{1-t^3} \end{cases}$

$$k = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{y}{x} = \lim_{t \rightarrow 1} \frac{6t^2}{1-t^3} \cdot \frac{1-t^3}{6t} = \lim_{t \rightarrow 1} t = 1$$

$$b = \lim_{x \rightarrow \infty} (y - kx) = \lim_{t \rightarrow 1} \frac{6t^2 - 6t}{1-t^3} = 6 \lim_{t \rightarrow 1} \frac{t(t-1)}{-(t-1)(t^2+t+1)} = -2$$

因此该曲线的斜渐近线为 $y = x - 2$.

定理 1.1.6 (割线定理). (1) 设 $p > 0$, $y = f(x)$ 在 $[p, +\infty)$ 上有界, 若有

$$\begin{aligned}\lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x+1) - f(x)] &= k, \\ \lim_{x \rightarrow +\infty} [(x+1)f(x) - xf(x+1)] &= b\end{aligned}$$

则直线 $y = kx + b$ 是曲线 $y = f(x)$ 的渐近线.

(2) 设 $q < 0$, $y = f(x)$ 在 $(-\infty, q]$ 上有界, 若有

$$\begin{aligned}\lim_{x \rightarrow -\infty} [f(x+1) - f(x)] &= k, \\ \lim_{x \rightarrow -\infty} [(x+1)f(x) - xf(x+1)] &= b,\end{aligned}$$

则直线 $y = kx + b$ 是曲线 $y = f(x)$ 的渐近线.

例 1.1.13 (2023 数一). 求曲线 $y = x \ln \left(e + \frac{1}{x-1} \right)$ 的斜渐近线方程.

法一: 渐近线的斜率为

$$k = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{y}{x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \ln \left(e + \frac{1}{x-1} \right) = 1$$

渐近线的截距为

$$b = \lim_{x \rightarrow \infty} [f(x) - kx] = \lim_{x \rightarrow \infty} \left[x \ln \left(e + \frac{1}{x-1} \right) - x \right] = \lim_{x \rightarrow \infty} x \ln \left[1 + \frac{1}{e(x-1)} \right] = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x}{e(x-1)} = \frac{1}{e}$$

故所求斜渐近线方程为 $y = x + \frac{1}{e}$.

法二: 改写函数表达式为

$$y = x \ln e \left[1 + \frac{1}{e(x-1)} \right] = x + x \ln \left[1 + \frac{1}{e(x-1)} \right] = x + \frac{x}{e(x-1)} = x + \frac{1}{e} + o(1) \quad (x \rightarrow \infty)$$

所以斜渐近线方程为 $y = x + \frac{1}{e}$.

法三: 利用割线定理,

$$\begin{aligned}k &= \lim_{x \rightarrow \infty} [f(x+1) - f(x)] = \lim_{x \rightarrow \infty} \left[(x+1) \ln \left(e + \frac{1}{x} \right) - x \ln \left(e + \frac{1}{x-1} \right) \right] = 1 + \lim_{x \rightarrow \infty} x \ln \frac{e + x^{-1}}{e + (x-1)^{-1}} \\ &= 1 + \lim_{x \rightarrow \infty} x \cdot \frac{\frac{1}{x} - \frac{1}{x-1}}{e + \frac{1}{x-1}} = 1 - \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{e(x-1)+1} = 1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}b &= \lim_{x \rightarrow \infty} [(x+1)f(x) - xf(x+1)] = \lim_{x \rightarrow \infty} \left[(x+1)x \ln \left(e + \frac{1}{x-1} \right) - x(x+1) \ln \left(e + \frac{1}{x} \right) \right] \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} x(x+1) \ln \frac{e + \frac{1}{x} - \frac{1}{x} + \frac{1}{x-1}}{e + \frac{1}{x}} = \lim_{x \rightarrow \infty} x(x+1) \frac{\frac{1}{x-1} - \frac{1}{x}}{e + \frac{1}{x}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x}{ex+1} = \frac{1}{e}\end{aligned}$$

因此该曲线的斜渐近线为 $y = x + \frac{1}{e}$.

1.2 极限的概念、性质及存在准则

1.2.1 数列、函数极限的定义

数列的极限定义

定义 1.2.1 (数列极限 A). 设 $\{a_n\}$ 是一数列, 如果存在常数 a , 当 n 无限增大时, a_n 无限接近 (或趋近) 于 a , 则称数列 $\{a_n\}$ 收敛, a 称为数列 $\{a_n\}$ 的极限, 或称数列 $\{a_n\}$ 收敛于 a , 记作 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$, 或

$a_n \rightarrow \infty$, $n \rightarrow \infty$. 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 若不存在这样的常数 a , 则称数列 $\{a_n\}$ 发散或不收敛, 也可以说极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ 不存在.

定义 1.2.2 (数列极限 B). 设 $\{a_n\}$ 为一数列, a 为一个常数, 若对任意给定的 $\varepsilon > 0$, 都存在一个正整数 N , 使得当 $n > N$ 时, 有 $|a_n - a| < \varepsilon$, 则称 a 为数列 $\{a_n\}$ 的极限, 记作 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$.

例 1.2.1 (2003 数一). 设 $\{a_n\}, \{b_n\}, \{c_n\}$ 均为非负整数, 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = 1$, $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = +\infty$, 则必有

- | | |
|---|---|
| A. $a_n < b_n$ 对任意 n 成立 | B. $b_n < c_n$ 对任意 n 成立 |
| C. 极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n c_n$ 不存在 | D. 极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n c_n$ 不存在 |

取 $a_n = \frac{2}{n}$, $b_n = 1$, $c_n = \frac{n}{2}$, 则可排除选项 A、B、C, 因此选 D.

例 1.2.2 (2014 数三). 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0 \neq 0$, 则当 n 充分大时有

- | | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| A. $ a_n > \frac{ a }{2}$ | B. $ a_n < \frac{ a }{2}$ | C. $a_n > a - \frac{1}{n}$ | D. $a_n > a + \frac{1}{n}$ |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|

因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \neq 0$, 所以 $\forall \varepsilon > 0$, 都存在一个正整数 N , 使得当 $n > N$ 时, 有 $|a_n - a| < \varepsilon$, 即 $a - \varepsilon < a_n < a + \varepsilon$, 则 $|a| - \varepsilon < |a_n| \leq |a| + \varepsilon$, 取 $\varepsilon = \frac{|a|}{2}$, 得 $|a_n| > \frac{|a|}{2}$, 选 A.

函数的极限定义

定义 1.2.3 (函数的极限). 设函数 $f(x)$ 在点 x_0 的邻域内 (点 x_0 可除外) 有定义, A 为一个常数, 若对任意给定的 $\varepsilon > 0$, 都存在一个正数 δ , 当 $0 < |x - x_0| < \delta$ 时, 有 $|f(x) - A| < \varepsilon$, 则称 A 为函数 $f(x)$ 当 $x \rightarrow x_0$ 时的极限, 记作 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$.

定义 1.2.4 (左右极限). 若对于满足 $0 < x_0 - x < \delta$ ($0 < x - x_0 < \delta$) 的一切 x 所对应的 $f(x)$ 都不满足 $|f(x) - A| < \varepsilon$, 则称 A 为函数 $f(x)$ 当 x 自 x_0 左 (右) 侧趋于 x_0 时的极限, 即左 (右) 极限, 分别记作

$$\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = f(x_0 - 0) = A \quad (\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = f(x_0 + 0) = A)$$

类似地, 可以给出当 $x \rightarrow \infty$, $x \rightarrow +\infty$, $x \rightarrow -\infty$ 时, $f(x)$ 的极限为 A 的定义.

例 1.2.3. 设 $f(x)$ 在 $[a, +\infty)$ 连续, 则 " $\exists x_n \in [a, +\infty)$ 有 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$ 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = \infty$ " 是 $f(x)$ 在 $[a, +\infty)$ 无界的

- | | |
|------------|---------------|
| A. 充分非必要条件 | B. 必要非充分条件 |
| C. 充分必要条件 | D. 既非充分也非必要条件 |

题目中的两个条件分别为

(i) $\exists x_n \in [a, +\infty)$ 有 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$ 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = \infty$;

(ii) $f(x)$ 在 $[a, +\infty)$ 无界,

讨论充分性, 即 $(i) \rightarrow (ii)$

因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = \infty$ 可知对于 $\forall M > 0, \exists N \in [a, +\infty)$ 使得 $|f(x_N)| > M$, 故 $f(x)$ 在 $[a, +\infty)$ 无界;

讨论必要性, 即 $(ii) \rightarrow (i)$

因为 $f(x)$ 在 $[a, +\infty)$ 无界, 则对 $\forall M_1 > 0, \exists X_1 \in [a, +\infty)$, 使得 $|f(X_1)| > M_1$, 且 $\exists X_2 \in [X_1, +\infty)$, 使得 $|f(X_2)| > |f(X_1)|$, 同理可取 $x_1, \exists x_2 \in [x_1, +\infty)$, 使得 $|f(x_2)| > |f(x_1)|$; $\exists x_3 \in [x_2, +\infty)$, 使得 $|f(x_3)| > |f(x_2)|$, 由此递推, 得存在严格 \nearrow 的数列 $\{x_n\}$, 有 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \infty$, 且存在单调的 $|f(x_n)|$, 有 $\lim_{n \rightarrow \infty} |f(x_n)| = +\infty$, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = \infty$.

1.2.2 数列与其子列极限之间的关系

定理 1.2.1. $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a \Leftrightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n-1} \Leftrightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} x_{3n} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{3n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{3n+2} = a$.

例 1.2.4 (2015 数三). 设 $\{x_n\}$ 是数列, 下列命题中不正确的是

- A. 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n+1} = a$
- B. 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n+1} = a$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$
- C. 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{3n} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{3n+1} = a$
- D. 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{3n} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{3n+1} = a$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$

如 $x_{3n} = 1 + \frac{1}{3n}$, $x_{3n+1} = 1 + \frac{1}{3n+1}$, $x_{3n+2} = 2 + \frac{1}{3n+2}$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{3n} = 1$, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{3n+1} = 1$, 但 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{3n+2} = 2$, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n \neq 1$, 故选 D.

例 1.2.5. 设 $x_n = (-1)^n \cdot \frac{n+1}{n}$, 证明: 数列 $\{x_n\}$ 发散.

证 考察子列

$$x_{2n} = \frac{2n+1}{2n} = 1 + \frac{1}{2n} \rightarrow 1 \quad (n \rightarrow \infty), \quad x_{2n+1} = -\frac{2n+2}{2n+1} = -1 - \frac{1}{2n+1} \rightarrow -1 \quad (n \rightarrow \infty)$$

由定理 1.2.1 可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 不存在, 即得证数列 $\{x_n\}$ 发散.

1.2.3 数列、函数极限的性质

数列极限的性质

定理 1.2.2 (数列极限的唯一性). 收敛数列的极限是唯一的, 即若数列 $\{a_n\}$ 收敛, 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ 和 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = b$, 则 $a = b$.

定理 1.2.3 (数列极限的有界性). 设数列 $\{a_n\}$ 收敛, 则数列 $\{a_n\}$ 有界, 即存在常数 $M > 0$, 使得 $|a_n| < M \ (\forall n \in N)$.

定理 1.2.4 (数列极限的保号性). 设数列 $\{a_n\}$ 收敛, 其极限为 a

- (1) 若有正整数 N , 使得当 $n > N$, 有 $a_n > 0$ (或 < 0), 则 $a \geq 0$ (或 ≤ 0).

(2) 若 $a > 0$ (或 < 0), 则有正整数 N , 使得当 $n > N$, 时, 有 $a_n > 0$ (或 < 0).

例 1.2.6 (2017 数二). 设数列 $\{x_n\}$ 收敛, 则

A. 当 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sin x_n = 0$ 时, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$

B. 当 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n + \sqrt{|x_n|}) = 0$ 时, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$

C. 当 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n + x_n^2) = 0$ 时, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$

D. 当 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n + \sin x_n) = 0$ 时, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$

因为数列 $\{x_n\}$ 收敛, 故令 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, 则有 A 知 $\sin a = 0 \Rightarrow a = 0$, 同理 B、C 不正确, 而由 D 可知 $\sin a = -a \Rightarrow a = 0$, 故选 D.

函数极限的性质

定理 1.2.5 (函数极限的唯一性). 若 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$, 则 A 必唯一.

定理 1.2.6 (函数极限的有界性). 若 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$, 则 $f(x)$ 在点 x_0 的某一去心邻域内有界.

定理 1.2.7 (函数极限的保号性). 设 $f(x)$ 在 x_0 的某去心邻域内均有 $f(x) \geq 0$ (或 $f(x) \leq 0$), 且 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$, 则 $a \geq 0$ (或 $A \leq 0$).

定理 1.2.8 (函数极限的充要条件). (1) $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = A$.

(2) $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = A \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = A$.

证明函数 $f(x)$ 的极限不存在的方法

(1) 若 $f(x_0 - 0) \neq f(x_0 + 0)$, 则 $\lim_{x \rightarrow x_0}$ 不存在. 当 $x \rightarrow \infty$ 时, 对含有 a^x ($a > 0, a \neq 1$) 或 $\arctan x$ 或 $\operatorname{arccot} x$ 的函数极限, 一定要对 $x \rightarrow +\infty$ 与 $x \rightarrow -\infty$ 分别求极限, 若两者的极限值相等, 则 $x \rightarrow \infty$ 时极限存在, 否则不存在.

(2) 若存在数列 $\{x_n\} : x_n \rightarrow x_0, x_n \neq x_0$, 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n)$ 不存在; 或有两个数列 $\{x_n\}$ 与 $\{y_n\}$, 满足 $x_n \rightarrow x_0$ ($x_n \neq x_0$), $y_n \rightarrow y_0$ ($y_n \neq y_0$) 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) \neq \lim_{n \rightarrow \infty} f(y_n)$, 则 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ 不存在.

(3) 利用结论: 设 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A, \lim_{x \rightarrow x_0} g(x)$ 不存在, 则 $\lim_{x \rightarrow x_0} [f(x) + g(x)]$ 不存在; 若又有 $A \neq 0$, 则 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)g(x)$ 不存在.

1.2.4 数列、函数极限的存在准则

数列极限的存在准则

定理 1.2.9 (夹逼准则). 若 $\exists N$, 使得当 $n > N$ 时有 $y_n \leq x_n \leq z_n$, 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = \lim_{n \rightarrow \infty} z_n = a$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$.

定理 1.2.10 (数列的单调有界准则). 若数列 $\{x_n\}$ 单调上升有上界 (或单调下降有下界), 即 $x_{n+1} \leq x_n$ (或 $x_{n+1} \geq x_n$) ($n = 1, 2, \dots$), 并存在一个数 M (m) 使得对一切 n 有 $x_n \leq M$ (或 $x_n \geq m$), 则 $\{x_n\}$ 收敛, 即存在一个数 a , 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, 且有 $x_n \leq a$ (或 $x_n \geq a$) ($n = 1, 2, \dots$).

例 1.2.7 (2008 数一). 设函数 $f(x)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 内单调有界, $\{x_n\}$ 为数列, 下列命题正确的是

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| A. 若 $\{x_n\}$ 收敛, 则 $\{f(x_n)\}$ 收敛 | B. 若 $\{x_n\}$ 单调, 则 $\{f(x_n)\}$ 收敛 |
| C. 若 $\{f(x_n)\}$ 收敛, 则 $\{x_n\}$ 收敛 | D. 若 $\{f(x_n)\}$ 单调, 则 $\{x_n\}$ 收敛 |

若 $\{x_n\}$ 单调, $f(x)$ 单调有界, 则数列 $\{f(x_n)\}$ 单调有界, 因此数列 $\{f(x_n)\}$ 收敛, 故选 B.

函数极限的存在准则

例 1.2.8 (2000 数三). 设对任意 x , 总有 $\varphi(x) \leq f(x) \leq g(x)$, 且 $\lim_{x \rightarrow \infty} [g(x) - \varphi(x)] = 0$, 则 $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$

- | | | | |
|-----------|-------------|----------|----------|
| A. 存在且等于零 | B. 存在但不一定为零 | C. 一定不存在 | D. 不一定存在 |
|-----------|-------------|----------|----------|

本题中所给条件比夹逼准则的条件弱, 事实上, 若 $\lim_{x \rightarrow \infty} g(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \varphi(x) = A$ (有限), 则必有 $\lim_{x \rightarrow \infty} [g(x) - \varphi(x)] = 0$, 反之则不然, 因为当 $\lim_{x \rightarrow \infty} [g(x) - \varphi(x)] = 0$ 时, 极限 $\lim_{x \rightarrow \infty} g(x)$ 和 $\lim_{x \rightarrow \infty} \varphi(x)$ 可以都不存在, 如 $g(x) = \varphi(x) = x$.

- (1) 若取 $\varphi(x) = x - \frac{1}{x^2}$, $f(x) = x$, $g(x) = x + \frac{1}{x^2}$, 显然有 $\varphi(x) \leq f(x) \leq g(x)$, 且 $\lim_{x \rightarrow \infty} [g(x) - \varphi(x)] = 0$, 但 $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$ 不存在, 则排除选项 A、B.
(2) 若取 $\varphi(x) = f(x) = g(x) = 1$, 满足题设条件, 但 $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 1$ 存在, 则排除选项 C, 故选 D.

1.3 计算极限值的若干方法

计算极限值的方法有很多种, 常用的方法包括: 利用等价代换和初等变形、利用夹逼准则、利用 L'Hospital 法则以及利用 Taylor 展开等.

1.3.1 利用等价代换和初等变形

等价代换

当 $x \rightarrow 0$ 时, 下表是常见的等价代换.

(1) $x \sim \sin x \sim \tan x \sim \arcsin x \sim \arctan x \sim e^x - 1 \sim \ln(1 + x)$			
一阶	(2) $\log_a(1 + x) \sim \frac{x}{\ln a}$	(3) $a^x - 1 \sim x \ln a$	(4) $(1 + x)^\alpha - 1 \sim \alpha x$
	(5) $\ln(x + \sqrt{1 + x^2}) \sim x$		
<hr/>			
二阶	(6) $1 - \cos x \sim \frac{1}{2}x^2$	(7) $x - \ln(1 + x) \sim \frac{1}{2}x^2$	(8) $(1 + x)^x - 1 \sim x^2$
<hr/>			
三阶	(9) $x - \arctan x \sim \frac{1}{3}x^3$	(10) $\tan x - x \sim \frac{1}{3}x^3$	(11) $\tan x - \sin x \sim \frac{1}{2}x^3$
	(12) $x - \sin x \sim \frac{1}{6}x^3$	(13) $\arcsin x - x \sim \frac{1}{6}x^3$	

定理 1.3.1 (减法无穷小代换). 若 $f \sim g$, 则 $f - g \sim f(\ln f - \ln g)$.

例 1.3.1 (第一届数学竞赛初赛). 设函数 $f(x), g(x)$ 在 $x = 0$ 的某一邻域 U 内有定义, 对 $\forall x \in U, f(x) \neq g(x)$, 且 $\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0} g(x) = a > 0$, 求 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f^g - g^f}{f - g}$.

由定理 1.3.1 可易求得该极限值为 a^a .

例 1.3.2. 求下列极限值.

$$\left| \begin{array}{l} (1) \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\sin x}{x} \right)^{\frac{1}{1-\cos x}}. \\ (2) \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\arcsin x}{x} \right)^{\frac{1}{x^2}}. \\ (3) \lim_{x \rightarrow \pi} \frac{\sin mx}{\sin nx} (m, n \in \mathbb{N}). \\ (4) \lim_{x \rightarrow \pi/3} \frac{\tan^3 x - 3 \tan x}{\cos \left(x + \frac{\pi}{6} \right)}. \\ (5) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(1+x)^x - \cos \frac{x}{2}}{\left(\sin x - \sin \frac{x}{2} \right) \ln (1+x)}. \\ (6) \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x \ln \sin x - \sin x \ln x}{x^3 \ln x}. \\ (7) \lim_{x \rightarrow 1} \frac{1 - \sqrt[n]{\cos 2n\pi x}}{(x-1)(x^n-1)}. \\ (8) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^3 \sqrt[3]{2} \left(1 - \cos \frac{1}{n^2} \right)}{\sqrt[n]{n^2+1} - n}. \\ (9) \lim_{x \rightarrow -3} \frac{(x^2-9) \ln(4+x)}{\arctan^2(x+3)}. \\ (10) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\prod_{k=2}^{n-1} (1 - \sqrt[k]{\cos x})}{(1 - \cos x)^{n-1}}. \\ (11) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \prod_{k=1}^n \sqrt[k]{\cos kx}}{x^2}. \\ (12) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{n! x^n - \prod_{k=1}^n \sin kx}{x^{n+2}}. \end{array} \right.$$

$$(1) \text{ 原式} = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{1 - \cos x} \ln \frac{\sin x}{x} = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{1 - \cos x} \cdot \frac{\sin x - x}{x} = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-\frac{1}{6}x^3}{\frac{1}{2}x^3} = e^{-\frac{1}{3}}.$$

$$(2) \text{ 原式} = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^2} \ln \frac{\arcsin x}{x} = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^2} \cdot \frac{\arcsin x - x}{x} = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{6}x^3}{x^3} = e^{\frac{1}{6}}.$$

$$(3) \text{ 原式} \stackrel{t=x-\pi}{\lim} \frac{\sin m(t+\pi)}{\sin n(t+\pi)} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{(-1)^n \sin mt}{(-1)^n \sin nt} = (-1)^{m-n} \frac{m}{n}.$$

$$(4) \text{ 原式} = \lim_{x \rightarrow \pi/3} \frac{\tan x \cdot \frac{\sin^2 x - 3 \cos^2 x}{\cos^2 x}}{\frac{\sqrt{3}}{2} \cos x - \frac{1}{2} \sin x} = \lim_{x \rightarrow \pi/3} \frac{\tan x \left(\sin x + \sqrt{3} \cos x \right)}{-\frac{1}{2} \cos x^2} = -24.$$

$$(5) \text{ 原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(1+x)^x - 1 + \left(1 - \cos \frac{x}{2} \right)}{x \cdot \sin \frac{x}{2} \left(2 \cos \frac{x}{2} - 1 \right)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(1+x)^x - 1}{\frac{x^2}{2}} + \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos \frac{x}{2}}{\frac{x^2}{2}} = 2 + \frac{1}{4} = \frac{9}{4}.$$

$$(6) \text{ 原式} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x \ln x - \sin x \ln x}{x^3 \ln x} + \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x \ln \sin x - x \ln x}{x^3 \ln x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x - \sin x}{x^3} + \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln \frac{\sin x}{x}}{x^2 \ln x} = \frac{1}{6}.$$

$$(7) \text{ 原式} = -\lim_{x \rightarrow 1} \frac{n}{(x-1) \ln x} \stackrel{t=x-1}{\lim} -\lim_{t \rightarrow 0} \frac{n}{t \ln(t+1)} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{n \cdot \frac{1}{2} (2n\pi t)^2}{t^2} = 2n\pi^2.$$

$$(8) \text{ 原式} \stackrel{n \rightarrow \infty, \sqrt[3]{2}=1}{\lim} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2 \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n^4} \right)}{\sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} - 1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{2n^2}}{\frac{1}{2n^2}} = 1.$$

$$(9) \text{ 原式} = \lim_{x \rightarrow -3} \frac{(x+3)(x-3)(x+3)}{(x+3)^2} = -6.$$

$$(10) \text{ 由 } \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{\sqrt[k]{\cos x}} = 1, \text{ 即 } 1 - \sqrt[k]{\cos x} \sim -\ln \sqrt[k]{\cos x} = -\frac{1}{k} \ln \cos x \sim \frac{1}{k} (1 - \cos x) (x \rightarrow 0), \text{ 故}$$

$$\text{原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\prod_{k=2}^n \left[\frac{1}{k} (1 - \cos x) \right]}{(1 - \cos x)^{n-1}} = \frac{1}{n!}.$$

$$(11) \text{ 由 } \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{\prod_{k=1}^n \sqrt[k]{\cos kx}} = 1, \text{ 故 } 1 - \prod_{k=1}^n \sqrt[k]{\cos kx} \sim - \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \ln \cos kx \sim \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \ln(1 - \cos kx) (x \rightarrow 0),$$

$$\text{原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} (1 - \cos kx)}{x^2} = \sum_{k=1}^n \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{k} \cdot \frac{1}{2} (kx)^2}{x^2} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n k = \frac{n(n+1)}{4}.$$

$$(12) \text{ 法一: 因为 } \lim_{x \rightarrow 0} \frac{n!x^n}{\prod_{k=1}^n \sin kx} = 1, \text{ 所以 } n!x^n \sim \prod_{k=1}^n \sin kx (x \rightarrow 0).$$

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{n!x^n \left[\ln(n!x^n) - \ln \prod_{k=1}^n \sin kx \right]}{x^{n+2}} = n! \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=1}^n (\ln kx - \ln \sin kx)}{x^2} = n! \sum_{k=1}^n \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln \frac{kx}{\sin kx}}{x^2} \\ &= n! \sum_{k=1}^n \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{kx}{\sin kx} - 1}{x^2} = n! \sum_{k=1}^n \lim_{x \rightarrow 0} \frac{kx - \sin kx}{kx^3} = \frac{n!}{6} \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(2n+1)}{36} (n+1)! . \end{aligned}$$

$$\text{法二: 原式} = n! \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \frac{\prod_{k=1}^n \sin kx}{n!x^n}}{x^2} = n! \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \frac{\prod_{k=1}^n \sin kx}{kx}}{x^2}, \text{ 记 } f_n(x) = \frac{1 - \prod_{k=1}^n \frac{\sin kx}{kx}}{x^2}, \text{ 则有}$$

$$f_n(x) = f_1(x) + \sum_{k=2}^n (f_k(x) - f_{k-1}(x))$$

两边取极限有,

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} f_n(x) &= \lim_{x \rightarrow 0} f_1(x) + \lim_{x \rightarrow 0} \sum_{k=2}^n (f_k(x) - f_{k-1}(x)) = \frac{1}{6} + \lim_{x \rightarrow 0} \sum_{k=2}^n \frac{\left(\prod_{i=1}^{k-1} - \prod_{i=1}^k \right) \frac{\sin ix}{ix}}{x^2} \\ &= \frac{1}{6} + \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\prod_{i=1}^{k-1} \frac{\sin ix}{ix} \left(1 - \frac{\sin kx}{kx} \right)}{x^2} = \frac{1}{6} + \lim_{x \rightarrow 0} \sum_{k=2}^n \frac{kx - \sin kx}{kx^3} = \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} \\ \Rightarrow \text{原式} &= \frac{n(2n+1)}{36} (n+1)! . \end{aligned}$$

初等变形

常见的裂项公式.

$$\begin{array}{ll} (1) \frac{1}{n(n+k)} = \frac{1}{k} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+k} \right) & (2) \frac{1}{(n-k)n(n+k)} = \frac{1}{2k^2} \left[\left(\frac{1}{n-k} - \frac{1}{n} \right) - \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+k} \right) \right] \\ \hline (3) \frac{1}{\sqrt{n+k} + \sqrt{n}} = \frac{1}{k} (\sqrt{n+k} - \sqrt{n}) & (4) \frac{2^n}{(2^n+k)(2^{n+1}+k)} = \frac{1}{2^n+k} - \frac{1}{2^{n+1}+k} \end{array}$$

定理 1.3.2. 若 $B \sim \tilde{B}$, 且 $\exists a, b$ 使得 $\lim A - \tilde{B} = a$, $\lim \tilde{B} - B = b$, 则 $\lim A - B = a + b$.

例 1.3.3. 求下列极限值.

$$\begin{array}{l|l|l} (1) \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{k=2}^n \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) . & (2) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos \sqrt{\tan x - \sin x}}{\sqrt[3]{1+x^3} - \sqrt[3]{1-x^3}} . & (3) \lim_{n \rightarrow \infty} \cos^n \frac{x}{\sqrt{n}} . \\ (4) \lim_{n \rightarrow \infty} \sin^2 \left(\pi \sqrt{n^2+n} \right) . & (5) \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \sin \pi \sqrt{1+4n^2} \right)^n . & (6) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^{-n}}{n(n+1)} \sum_{k=1}^n C_n^k \cdot k^2 . \end{array}$$

$$(1) 1 - \frac{1}{k^2} = \frac{(k-1)(k+1)}{k^2} \text{ 进行变形. 原式} = \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{k=2}^n \frac{(k-1)(k+1)}{k^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+1}{2n} = \frac{1}{2}.$$

$$(2) \text{ 由 } \sqrt{\tan x - \sin x} = \sqrt{\frac{\sin x(1 - \cos x)}{\cos x}} \sim \sqrt{\frac{x^3}{2}}, \text{ 知 } 1 - \cos \sqrt{\tan x - \sin x} \sim \frac{x^3}{4},$$

$$\text{又 } \sqrt[3]{1+x^3} - \sqrt[3]{1-x^3} = \frac{2x^3}{\left(\sqrt[3]{1+x^3}\right)^2 + \sqrt[3]{1+x^3} \cdot \sqrt[3]{1-x^3} + \left(\sqrt[3]{1-x^3}\right)^2} \sim \frac{2x^3}{3}, \text{ 故原式} = \frac{3}{8}.$$

$$(3) \text{ 原式} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \tan^2 \frac{x}{\sqrt{n}}\right)^{-\frac{n}{2}} = e^{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(-\frac{n}{2}\right) \ln \left(1 + \tan^2 \frac{x}{\sqrt{n}}\right)} = e^{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(-\frac{n}{2}\right) \cdot \tan^2 \frac{x}{\sqrt{n}}} = e^{-\frac{x^2}{2}}.$$

$$(4) \sin^2 \left(\pi \sqrt{n^2+n}\right) = \sin^2 \left(\pi \sqrt{n^2+n} - n\pi\right) = \sin^2 \frac{n\pi}{\sqrt{n^2+n}+n} = \sin^2 \frac{\pi}{\sqrt{1+\frac{1}{n}}+1}.$$

由于初等函数在有定义的地方皆连续, 故

$$\text{原极限} = \sin^2 \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi}{\sqrt{1+\frac{1}{n}}+1} \right) = \sin^2 \frac{\pi}{2} = 1.$$

$$(5) \text{ 由 } \sin \pi \sqrt{1+4n^2} = \sin \pi \left(\sqrt{1+4n^2} - 2n\right) = \sin \frac{\pi}{\sqrt{1+4n^2}+2n}.$$

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \sin \frac{\pi}{\sqrt{1+4n^2}+2n}\right)^n = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} n \ln \left(1 + \sin \frac{\pi}{\sqrt{1+4n^2}+2n}\right) \\ &= \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n\pi}{\sqrt{1+4n^2}+2n} = e^{\frac{\pi}{4}} \end{aligned}$$

$$(6) \text{ 因为 } (1+x)^n = \sum_{k=0}^n C_n^k \cdot x^k, \text{ 两边关于 } x \text{ 求导, 得 } n(1+x)^{n-1} = \sum_{k=1}^n C_n^k \cdot kx^{k-1}, \text{ 两边再同时乘以 } x, \text{ 并再关于 } x \text{ 求导, 得 } n(1+x)^{n-1} + n(n-1)x(1+x)^{n-2} = \sum_{k=1}^n C_n^k \cdot k^2 x^{k-1}, \text{ 令 } x=1, \text{ 得}$$

$$n \cdot 2^{n-1} + n(n+1) \cdot 2^{n-2} = n(n+1) \cdot 2^{n-2} = \sum_{k=1}^n C_n^k k^2$$

$$\text{于是有原式} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^{-n}}{n(n+1)} \cdot n(n+1) \cdot 2^{n-2} = \frac{1}{4}.$$

例 1.3.4. 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$, 设

$$\left| \begin{array}{l} (1) x_n = \cos \frac{x}{2} \cos \frac{x}{2^2} \cdots \cos \frac{x}{2^n}. \\ (2) x_n = \frac{3}{2} \frac{5}{4} \frac{17}{16} \cdots \frac{2^{2^n}+1}{2^{2^n}}. \\ (3) x_n = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{1^3+2^3+\cdots+i^3}}. \\ (4) x_n = \sum_{i=1}^n \frac{1}{i(i+1)(i+2)}. \end{array} \right.$$

$$(1) \text{ 乘 } \frac{2^n \sin \frac{x}{2^n}}{2^n \sin \frac{x}{2^n}}, x_n = \cos \frac{x}{2} \cos \frac{x}{2^2} \cos \frac{x}{2^3} \cdots \cos \frac{x}{2^n} = \frac{2^n \sin \frac{x}{2^n}}{2^n \sin \frac{x}{2^n}} \cdot \prod_{k=1}^n \cos \frac{x}{2^k} = \frac{\sin x}{2^n \sin \frac{x}{2^n}}$$

$$\text{原式} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin x}{2^n \sin \frac{x}{2^n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin x}{x} \cdot \frac{\frac{x}{2^n}}{\sin \frac{x}{2^n}} = \frac{\sin x}{x}.$$

$$(2) \text{ 乘 } \frac{1 - \frac{1}{2}}{1 - \frac{1}{2}}, \text{ 再对分子反复应用公式 } (a+b)(a-b) = a^2 - b^2.$$

$$x_n = \left(1 + \frac{1}{2^{2^0}}\right) \left(1 + \frac{1}{2^{2^1}}\right) \left(1 + \frac{1}{2^{2^2}}\right) \cdots \left(1 + \frac{1}{2^{2^n}}\right) = \frac{1 - \frac{1}{2}}{1 - \frac{1}{2}} \cdot \prod_{k=0}^n \left(1 + \frac{1}{2^{2^k}}\right) \rightarrow 2 (n \rightarrow \infty)$$

$$(3) \text{ 因为 } \sum_{i=1}^n i^3 = \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2,$$

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{\sum_{j=1}^i j^3}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^i j \right)^2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\frac{1}{2} i(i+1)} \\ &= 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{i} - \frac{1}{i+1} \right) = 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{n+1} \right) = 2. \end{aligned}$$

$$(4) \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{i(i+1)} - \frac{1}{(i+1)(i+2)} \right] = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{(n+1)(n+2)} \right] = \frac{1}{4}.$$

例 1.3.5. 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \prod_{k=1}^n \frac{k+1 - \sqrt{k^2+k}}{\sqrt{k}(\sqrt{k+2} - \sqrt{k+1})}.$

$$\text{由 } \prod_{k=1}^n \frac{k+1 - \sqrt{k^2+k}}{\sqrt{k}(\sqrt{k+2} - \sqrt{k+1})} = \prod_{k=1}^n \frac{\sqrt{k+1}(\sqrt{k+1} - \sqrt{k})}{\sqrt{k}(\sqrt{k+2} - \sqrt{k+1})} = \prod_{k=1}^n \frac{\sqrt{k+1}}{\sqrt{k}} \cdot \prod_{k=1}^n \frac{\sqrt{k+1} - \sqrt{k}}{\sqrt{k+2} - \sqrt{k+1}}, \text{ 因此}$$

$$\begin{aligned} I &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \prod_{k=1}^n \frac{\sqrt{k+1}}{\sqrt{k}} \cdot \prod_{k=1}^n \frac{\sqrt{k+1} - \sqrt{k}}{\sqrt{k+2} - \sqrt{k+1}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdots \frac{\sqrt{n+1}}{\sqrt{n}} \cdot \frac{\sqrt{2} - \sqrt{1}}{\sqrt{3} - \sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{3} - \sqrt{2}}{\sqrt{4} - \sqrt{3}} \cdots \frac{\sqrt{n+1} - \sqrt{n}}{\sqrt{n+2} - \sqrt{n+1}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n+1}}{n} \cdot \frac{\sqrt{2} - \sqrt{1}}{\sqrt{n+2} - \sqrt{n+1}} = (\sqrt{2} - 1) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n+1}(\sqrt{n+2} + \sqrt{n+1})}{n} = 2\sqrt{2} - 2. \end{aligned}$$

例 1.3.6. 设 $(1 + \sqrt{3})^n = a_n + b_n \cdot \sqrt{3}$ (其中 a_n, b_n 均为正整数), 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n}$.

由二项式定理,

$$(1 + \sqrt{3})^n = \sum_{k=0}^n C_n^k (\sqrt{3})^k = \sum_{\substack{2k \leq n \\ k \in \mathbb{N}}} C_n^k (\sqrt{3})^k + \sum_{\substack{2k+1 \leq n \\ k \in \mathbb{N}}} C_n^k (\sqrt{3})^k = a_n + b_n \cdot \sqrt{3}$$

则 $(1 - \sqrt{3})^n = a_n - b_n \cdot \sqrt{3}$, 联立两式解得

$$\begin{cases} a_n = \frac{(1 + \sqrt{3})^n + (1 - \sqrt{3})^n}{2} \\ b_n = \frac{(1 + \sqrt{3})^n - (1 - \sqrt{3})^n}{2} \end{cases}$$

则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \sqrt{3} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(1 + \sqrt{3})^n + (1 - \sqrt{3})^n}{(1 + \sqrt{3})^n - (1 - \sqrt{3})^n} = \sqrt{3}.$$

1.3.2 利用已知极限

例 1.3.7 (西安电子科技大学). 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\sqrt[n]{a} + \sqrt[n]{b}}{2} \right)^n$ ($a, b \geq 0$).

$$\text{法一: } n \left(\frac{\sqrt[n]{a} + \sqrt[n]{b}}{2} - 1 \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{a^{\frac{1}{n}-1} + b^{\frac{1}{n}-1}}{\frac{1}{n}} \right) \rightarrow \frac{1}{2} (\ln a + \ln b) (n \rightarrow \infty), \text{ 故}$$

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

$$= e^{\frac{1}{2}(\ln a + \ln b)} = e^{\ln \sqrt{ab}} = \sqrt{ab}.$$

法二: 原式 $\xrightarrow{x=\frac{1}{n}} \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{a^x + b^x}{2} \right)^{\frac{1}{x}} = e^{\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \ln \frac{a^x + b^x}{2}} = e^{\lim_{x \rightarrow 0} \frac{a^x \ln a + b^x \ln b}{a^x + b^x}} = e^{\frac{1}{2}(\ln a + \ln b)} = \sqrt{ab}.$

推论 1.3.1. $a_i, p_i > 0, i = 1, 2, \dots, m, p = \sum_{i=1}^m p_i$, 则有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sqrt[m]{a_i} \right)^n = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m a_i}, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{p} \sum_{i=1}^m p_i \cdot \sqrt[n]{a_i} \right)^n = \sqrt[p]{\prod_{i=1}^m a_i^{p_i}}.$$

例 1.3.8. 求下列极限值.

$$(1) \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\sqrt[n]{2} + \sqrt[n]{3} + \sqrt[n]{5}}{3} \right)^n. \quad | \quad (2) \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2 + \sqrt[n]{64}}{3} \right)^{2n-1}. \quad | \quad (3) \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{a^{x+1} + b^{x+1} + c^{x+1}}{a+b+c} \right)^{\frac{1}{x}}.$$

(1) 原式 $= \sqrt[3]{2 \times 3 \times 5} = \sqrt[3]{30}$.

$$(2) \text{ 法一: } \text{原式} \xrightarrow{2n-1=t} \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{1 + 1 + \sqrt[\frac{t+1}{2}]{64}}{3} \right)^t = (\sqrt[3]{64})^2 = 16.$$

$$\text{法二: } \text{原式} = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{2}{x} - 1 \right) \ln \left(\frac{2 + 64^x}{3} \right) = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(2-x)(64^x - 1)}{3} \xrightarrow{L'} 1 e^{\frac{2}{3} \ln 64} = 16.$$

$$(3) \text{ 原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{a \cdot a^x + b \cdot b^x + c \cdot c^x}{a+b+c} \right)^{\frac{1}{x}} = \sqrt[a+b+c]{a^a b^b c^c}.$$

例 1.3.9. 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} + \dots + \frac{1}{2n} \right)$.

为解决该问题, 先介绍并证明一个重要的等式,

引理 1.3.1. $x_n = 1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} - \ln n = \gamma + o(1)$, 其中 $\gamma = 0.577215 \dots$ (称为 Euler 常数).

$$|x_n - x_{n-1}| = \left| \frac{1}{n} - [\ln n - \ln(n-1)] \right|, n \geq 2 \text{ 由 Lagrange 中值定理}$$

$$\ln n - \ln(n-1) = \frac{1}{\xi_n} (n-1 < \xi_n < n)$$

$$|x_n - x_{n-1}| = \frac{n - \xi_n}{n \cdot \xi_n} < \frac{1}{(n-1)^2}, \text{ 而 } \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{(n-1)^2} \text{ 收敛, 故 } \sum_{n=2}^{\infty} |x_n - x_{n-1}| \text{ 收敛, } x_n \text{ 也收敛.}$$

$$\text{原式} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^{2n} \frac{1}{i} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} [(\ln 2n + \gamma + \alpha_{2n}) - (\ln n + \gamma + \alpha_n)] = \lim_{n \rightarrow \infty} (\ln 2 + \alpha_{2n} - \alpha_n) = \ln 2$$

其中 γ 为 Euler 常数.

推论 1.3.2. 已知 m 为正整数, 则有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{mn+1} + \frac{1}{mn+2} + \dots + \frac{1}{(m+1)n} \right] = \ln \frac{m+1}{m}.$$

$$\text{证 } \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{mn+k} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{m + \frac{k}{n}} = \int_0^1 \frac{dx}{m+x} = \ln \frac{m+1}{m}.$$

¹该标记表示经 L'Hospital 法则得到的计算结果, 关于 L'Hospital 法则可见定理 1.3.7.

例 1.3.10. 试借助 Stirling 公式

$$n! = \sqrt{2\pi n} n^n e^{-n + \frac{\theta_n}{12n}}, \quad 0 \leq \theta_n \leq 1$$

求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \prod_{i=1}^n \frac{e^{1-\frac{1}{i}}}{(1+\frac{1}{i})^i}$.

由引理 1.3.1, 得

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \frac{e^{n - \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}}}{\prod_{i=1}^n \left(\frac{i+1}{i}\right)^i} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n} \cdot n! e^{n - \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}}}{(n+1)^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n} \sqrt{2\pi n} \cdot n^n e^{\frac{\theta_n}{12n}}}{(n+1)^n e^{\sum_{i=1}^n \frac{1}{i}}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2\pi n} e^{\frac{\theta_n}{12n}}}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n e^{\sum_{i=1}^n \frac{1}{i}}} = \sqrt{2\pi} \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\ln n + \frac{\theta_n}{12n} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \right) = \sqrt{2\pi} e^{-(1+\gamma)} \end{aligned}$$

其中 γ 为 Euler 常数.

1.3.3 利用函数与极限的关系

定理 1.3.3 (极限值与函数式的转换). $\lim f(x) = A \Leftrightarrow f(x) = A + \alpha(x), \alpha(x) \rightarrow 0$.

定理 1.3.4 (分式极限的关系). 设 $\lim \frac{f(x)}{g(x)} = A$, A 为有限常数, 则

(1) 当 $g(x) \rightarrow 0$ 时, 必有 $f(x) \rightarrow 0$;

(2) 当 $f(x) \rightarrow 0$, 且 $A \neq 0$ 时, 必有 $g(x) \rightarrow 0$.

例 1.3.11. 设函数 $f(x)$ 在 $x = 0$ 的某个邻域内有连续导数, 且 $\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\sin x}{x^2} + \frac{f(x)}{x} \right) = 2$, 求 $f(0)'$.

由已知 $\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\sin x}{x^2} + \frac{f(x)}{x} \right) = 2$, 得 $f(x) = 2x - \frac{\sin x}{x} + x \cdot \alpha(x)$, $\alpha(x) \rightarrow 0$ ($x \rightarrow 0$), 则有

$$f(0) = \lim_{x \rightarrow 0} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0} \left(2x - \frac{\sin x}{x} + x \cdot \alpha(x) \right) = -1$$

$$f(0)' = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(0)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x) + 1}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \left(2 + \frac{x - \sin x}{x^2} + \alpha(x) \right) = 2.$$

例 1.3.12. (运用两种方法) 根据假设求极限.

$$\begin{array}{ll} (1) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin 6x + xf(x)}{x^3} = 0, \lim_{x \rightarrow 0} \frac{6 + f(x)}{x^2}. & (2) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1+2x) + xf(x)}{\sin x^2} = 2, \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2 + f(x)}{x}. \\ (3) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln \left(1 + \frac{f(x)}{\sin 2x}\right)}{3^x - 1} = 5, \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x^2}. & (4) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln \left(1 + \frac{3f(x)}{1 - \cos x}\right)}{e^x - 1} = 9, \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{\tan x - \sin x}. \end{array}$$

(1) 法一: 由已知得 $f(x) = \frac{-\sin 6x + x^3 \cdot \alpha(x)}{x}$, $\alpha(x) \rightarrow 0$, 故

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{6 + f(x)}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{6x - \sin 6x + x^3 \cdot \alpha(x)}{x^3} = \frac{\frac{1}{6}(6x)^3}{x^3} = 36.$$

$$\text{法二: } \lim_{x \rightarrow 0} \frac{6 + f(x)}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{6x + xf(x)}{x^3} = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\sin 6x + xf(x)}{x^3} + \frac{6x - \sin 6x}{x^3} \right) = 36.$$

(2) 法一: 由已知得 $f(x) = \frac{2 \sin x^2 + \alpha(x) \cdot \sin x^2 - \ln(1+2x)}{x}$, $\alpha(x) \rightarrow 0$, 故

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{2+f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2x + 2 \sin x^2 + \alpha(x) \sin x^2 - \ln(1+2x)}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \left[\frac{2 \sin x^2}{x^2} + \frac{2x - \ln(1+2x)}{x^2} \right] = 4.$$

法二: 因为 $x \sim \sin x$ ($x \rightarrow 0$), 所以 $\frac{2+f(x)}{x} = \frac{2x+xf(x)}{x^2} \sim \frac{2x+f(x)}{\sin x^2}$, 故

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{2+f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \left[\frac{\ln(1+2x)+xf(x)}{\sin x^2} + \frac{2x-\ln(1+2x)}{x^2} \right] = 2+2=4.$$

(3) 法一: 由已知得 $f(x) = \sin 2x \cdot [e^{(5+\alpha(x)) \cdot (3^x-1)} - 1]$, $\alpha(x) \rightarrow 0$, 故

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin 2x \cdot (5 + \alpha(x)) \cdot (3^x - 1)}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2x \cdot (5 + \alpha(x)) \cdot x \ln 3}{x^2} = 10 \ln 3.$$

法二: 因为 $\lim_{x \rightarrow 0} (3^x - 1) = 0$, 所以有 $\lim_{x \rightarrow 0} \ln \left(1 + \frac{f(x)}{\sin 2x} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln \left(1 + \frac{f(x)}{\sin 2x} \right)}{3^x - 1} \cdot (3^x - 1) = 0$.

于是 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{\sin 2x} = 0$, 从而当 $x \rightarrow 0$ 时, $\ln \left(1 + \frac{f(x)}{\sin 2x} \right) \sim \frac{f(x)}{\sin 2x}$. 又 $3^x - 1 \sim x \ln 3$, $x \rightarrow 0$, 再由已知

$$5 = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln \left(1 + \frac{f(x)}{\sin 2x} \right)}{3^x - 1} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{f(x)}{\sin 2x}}{x \cdot \ln 3} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{2 \ln 3 \cdot x^2}$$

故得 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x^2} = 10 \ln 3$.

(4) 法一: 由已知得 $f(x) = [e^{(9+\alpha(x))(e^x-1)} - 1] \cdot \frac{1-\cos x}{3} \sim (9+\alpha(x)) \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot x^3$, $\alpha(x) \rightarrow 0$,

且 $\tan x - \sin x \sim \frac{1}{2}x^3$, $x \rightarrow 0$, 所以 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x}{\tan x - \sin x} = 3$.

法二: 同上例解法 2.

1.3.4 利用夹逼准则

当极限不易直接求出时, 可考虑将求极限的变量, 作适当的放大和缩小, 使放大、缩小所得的新变量易于求极限, 且二者的极限值相同, 则原极限存在, 且等于公共值.

定理 1.3.5 (夹逼准则的函数形式). 设函数 $g(x) \leq f(x) \leq h(x)$, 如果在自变量 x 的同一变化过程中, 则

$$\lim g(x) = \lim h(x) = A \Rightarrow \lim f(x) = A$$

定理 1.2.9 给出了数列形式的情况.

例 1.3.13. 证明 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$. (该结论可作为重要极限使用).

证法一 因为 $(a+b)^n = \sum_{k=0}^n C_n^k a^k b^{n-k}$, 所以当 $n \leq 2$ 时, 由

$$n = 1 + (n-1) = 1 + \frac{n(n-1)}{2} \cdot \frac{2}{n} = 1 + C_n^2 \left(\sqrt{\frac{2}{n}} \right)^2 < \left(1 + \sqrt{\frac{2}{n}} \right)^n$$

得 $1 < \sqrt[n]{n} < \sqrt{\frac{2}{n}}$, 于是由夹逼准则得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$.

证法二 由定理 2.6.2 知算术-几何-调和平均值不等式: 设 $a_i > 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 则有

$$\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i}} \leq \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_i} \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$$

因为 n 可看作两个 \sqrt{n} 与 $n-2$ 个 1 的乘积, 所以由上述不等式有

$$\frac{2}{\sqrt{n} + n - 2} \leq \sqrt[n]{n} = \sqrt[n]{\underbrace{\sqrt{n} \cdot \sqrt{n} \cdot 1 \cdot 1 \cdots 1}_{n-2}} \leq \frac{2\sqrt{n} + n - 2}{n} < 1 + \frac{2}{\sqrt{n}}$$

而 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\frac{2}{\sqrt{n}} + n - 2} = 1$, $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{2}{\sqrt{n}}\right) = 1$, 故由夹逼准则得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$.

例 1.3.14. (要求用夹逼准则求解) 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$, 设

(1) (东北师范大学) $x_n = \frac{1 \cdot 3 \cdots (2n-1)}{2 \cdot 4 \cdots (2n)}$.	(2) $x_n = \sum_{k=n^2}^{(n+1)^2} \frac{1}{\sqrt{k}}$.
(3) $x_n = \sum_{k=1}^n \left[(n^k + 1)^{-\frac{1}{k}} + (n^k - 1)^{-\frac{1}{k}} \right]$.	(4) (北京大学) $x_n = (n!)^{\frac{1}{n^2}}$.
(5) $x_n = \frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} + \cdots + \frac{1}{n+n}$.	(6) (中国地质大学) $x_n = \frac{\sqrt[n]{n!}}{n}$.
(7) (2003 浙江省数学竞赛) $x_n = \sum_{k=1}^n \frac{n+k}{n^2+k}$.	(8) $x_n = \sqrt[n]{\sum_{k=1}^m a_k^n}$, $a_k > 0$.

(1) 因为几何平均小于算术平均, 故分母中的因子

$$2n = \frac{(2n-1) + (2n+1)}{2} > \sqrt{(2n-1)(2n+1)}$$

由此可知

$$0 < x_n = \frac{1 \cdot 3 \cdots (2n-1)}{2 \cdot 4 \cdots (2n)} < \frac{1}{\sqrt{2n+1}} \rightarrow 0$$

故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$.

(2) $\sum_{k=n^2}^{(n+1)^2} \frac{1}{\sqrt{k}}$ 共有 $2n+2$ 项, 最小项为 $\frac{1}{\sqrt{(n+1)^2}} = \frac{1}{n+1}$, 最大项为 $\frac{1}{n}$, 因此

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

左右两端极限均为 2, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=n^2}^{(n+1)^2} \frac{1}{\sqrt{k}} = 2$.

(3) 因为 $n^k < n^k + 1 < (n+1)^k$, 所以

$$n^{-1}(n^k + 1)^{-\frac{1}{k}} > (n+1)^{-1} \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

相加得 $\frac{n}{n} > \sum_{k=1}^n (n^k + 1)^{-\frac{1}{k}} > \frac{n}{n+1}$. 令 $n \rightarrow \infty$, 取极限得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n (n^k + 1)^{-\frac{1}{k}} = 1$.

同理可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n (n^k - 1)^{-\frac{1}{k}} = 1$, 从而 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 2$.

(4) $1 \leq (n!)^{\frac{1}{n^2}} \leq (n^n)^{\frac{1}{n^2}} = n^{\frac{1}{n}}$, 因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$ (见例 1.3.13), 所以 $\lim_{n \rightarrow \infty} (n!)^{\frac{1}{n^2}} = 1$.

(5) 由对数不等式

$$\frac{1}{n+1} \leq \ln \left(1 + \frac{1}{n}\right) \leq \frac{1}{n}$$

$$\ln \left(1 + \frac{1}{n+1}\right) + \cdots + \ln \left(1 + \frac{1}{n+n}\right) \leq x_n \leq \ln \left(1 + \frac{1}{n}\right) + \cdots + \ln \left(1 + \frac{1}{n+n-1}\right)$$

$$\text{左端} = \ln \left(\frac{n+2}{n+1} \cdot \frac{n+3}{n+2} \cdots \frac{n+n}{n+n-1} \cdot \frac{n+n+1}{n+n} \right) = \ln \frac{2n+1}{n+1} \rightarrow \ln 2 \quad (n \rightarrow \infty).$$

$$\text{同理, 右端} = \ln \frac{2n}{n} \rightarrow \ln 2 \quad (n \rightarrow \infty), \text{ 所以 } \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \ln 2.$$

(6) 利用不等式: $\left(\frac{n+1}{e}\right)^n < n! < e \left(\frac{n+1}{e}\right)^{n+1}$, 知

$$\frac{1}{e} \cdot \frac{n+1}{n} < \frac{\sqrt[n]{n!}}{n} < \sqrt[n]{e} \cdot \frac{1}{e} \cdot \frac{n+1}{n} \cdot \sqrt[n]{\frac{n+1}{e}}$$

故有夹逼准则, 得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n]{n!}}{n} = \frac{1}{e}$.

(7) 因为 $\frac{n+k}{n^2+n} \leq \frac{n+k}{n^2+k} < \frac{n+k}{n^2}, k=1,2,\dots,n$, 所以

$$\sum_{k=1}^n \frac{n+k}{n^2+n} \leq \sum_{k=1}^n \frac{n+k}{n^2+k} < \sum_{k=1}^n \frac{n+k}{n^2}$$

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

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

故由夹逼准则, 得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{n+k}{n^2+k} = \frac{3}{2}$.

(8) 记 $a_{i0} = \max_{1 \leq j \leq m} \{a_j\}$, 则 $a_{i0} < \sum_{k=1}^m a_k^n < m a_{i0}^n$, 于是 $a_{i0} < \sqrt[m]{\sum_{k=1}^m a_k^n} < \sqrt[m]{m a_{i0}^n}$, 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[m]{m} = 1$ 及夹逼准则得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[m]{\sum_{k=1}^m a_k^n} = a_{i0} = \max\{a_1, a_2, \dots, a_m\}.$$

推论 1.3.3. 设 $a_i, p_i > 0, i = 1, 2, \dots, m, p = \sum_{i=1}^m p_i$, 则有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[m]{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_i^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[m]{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^m p_i a_i^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[m]{\sum_{i=1}^m p_i a_i^n} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \sqrt[m]{\sum_{i=1}^m p_i a_i^x} = \max_{1 \leq i \leq m} \{a_i\}$$

例 1.3.15. 求下列极限值.

$$(1) \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{1 + 2^n \cdot \sin^n x}. \quad (2) \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\sin^2 n + 2 \cos^2 n}. \quad (3) \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{2^n + a^{2n}}, a \text{ 为常数.}$$

$$(1) \text{ 原式} = \max\{1, 2 \sin x\} = \begin{cases} 2 \sin x & , |\sin x| > \frac{1}{2} \\ 1 & , -\frac{1}{2} < \sin x \leq \frac{1}{2} \\ \text{不存在} & , \sin x = -\frac{1}{2}. \end{cases}$$

$$(2) \text{ 原式} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{1 + (\cos \frac{2}{n} n)^n} = \max \left\{ 1, \cos \frac{2}{n} n \right\} = 1, \text{ 其中易求得 } \cos \frac{2}{n} n \text{ 的最大值为 } 1.$$

$$(3) \text{ 原式} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{2^n + \underbrace{a^n + a^n + \dots + a^n}_{a_n}} = \max\{2, a\}.$$

例 1.3.16. 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{3} - \sum_{k=1}^n \frac{k^2}{n^2+k} \right)$.

$$\text{因为 } \frac{n}{3} - \sum_{k=1}^n \frac{k^2}{n^2+k} = \frac{n}{3} - \sum_{k=1}^n \frac{k^2}{n^2} + \sum_{k=1}^n \frac{k^3}{n^2(n^2+k)}, \text{ 那么}$$

$$I_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{3} - \sum_{k=1}^n \frac{k^2}{n^2} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{n}{3} - \frac{(n+1)(2n+1)}{6n} \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{-3n-1}{6n} = -\frac{1}{2}$$

并且 $\sum_{k=1}^n k^3 = \left(\sum_{k=1}^n k \right)^2 = \left[\frac{n(n+1)}{2} \right]^2 = \frac{n^2(n+1)^2}{4}$, 于是有

$$\frac{1}{4} \leftarrow \frac{n+1}{4n} = \frac{1}{n^2(n^2+n)} \sum_{k=1}^n k^3 < \sum_{k=1}^n \frac{k^3}{n^2(n^2+k)} < \frac{1}{n^4} \sum_{k=1}^n k^3 = \frac{(n+1)^2}{4n^2} \rightarrow \frac{1}{4} (n \rightarrow \infty)$$

故由夹逼准则得原极限 $I = -\frac{1}{2} + \frac{1}{4} = -\frac{1}{4}$.

例 1.3.17 (第十一届数学竞赛决赛). $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt{n} \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n + \sqrt{i}} \right)$.

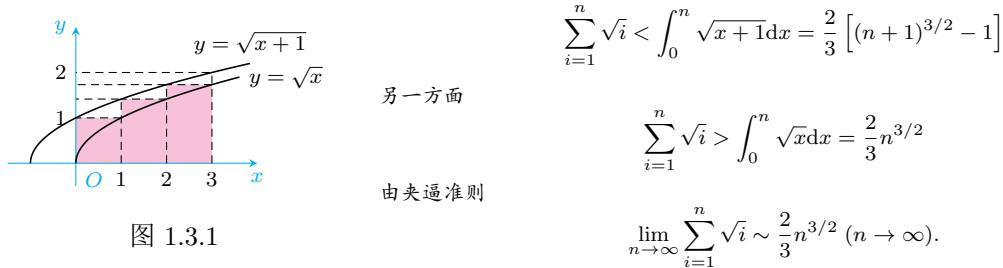
$$\text{原式} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n + \sqrt{i}} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{i}}{n(n + \sqrt{i})} = \lim_{n \rightarrow \infty} n^{-3/2} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{i}}{1 + \frac{\sqrt{i}}{n}} := \lim_{n \rightarrow \infty} f$$

$$n^{-3/2} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{i}}{1 + \frac{\sqrt{i}}{n}} \leq f \leq n^{-3/2} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{i}}{1 + \frac{1}{n}}$$

$$\text{其中 } \lim_{n \rightarrow \infty} n^{-3/2} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{i}}{1 + \frac{\sqrt{i}}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{-3/2}}{1 + n^{-1/2}} \sum_{i=1}^n \sqrt{i} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{-3/2}}{1 + n^{-1/2}} \frac{n^{3/2}}{3/2} = \frac{2}{3},$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n^{-3/2} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{i}}{1 + \frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{-3/2}}{1 + \frac{1}{n}} \cdot \frac{n^{3/2}}{3/2} = \frac{2}{3}$$

由夹逼准则, 得原式 $= \frac{2}{3}$, 下证 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \sqrt{i} \sim \frac{2}{3} n^{3/2} (n \rightarrow \infty)$.
由图 1.3.1 得: 一方面



例 1.3.18. 求极限 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\frac{n+1}{2} - \sum_{i=1}^n \frac{i}{n + \sqrt{i}} \right)$.

$$\text{原式} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{in}{n + \sqrt{i}} \right) = \lim_{n \rightarrow +\infty} n^{-3/2} \sum_{i=1}^n \frac{i^{3/2}}{n + \sqrt{i}} := \lim_{n \rightarrow +\infty} f$$

$$\frac{2}{5} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{-3/2}}{n + \sqrt{n}} \cdot \frac{2}{5} n^{5/2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{-3/2}}{n + \sqrt{n}} \sum_{i=1}^n i^{3/2} \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} f \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{-3/2}}{n + 1} \sum_{i=1}^n i^{3/2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{-3/2}}{n + 1} \cdot \frac{2}{5} n^{5/2} = \frac{2}{5}$$

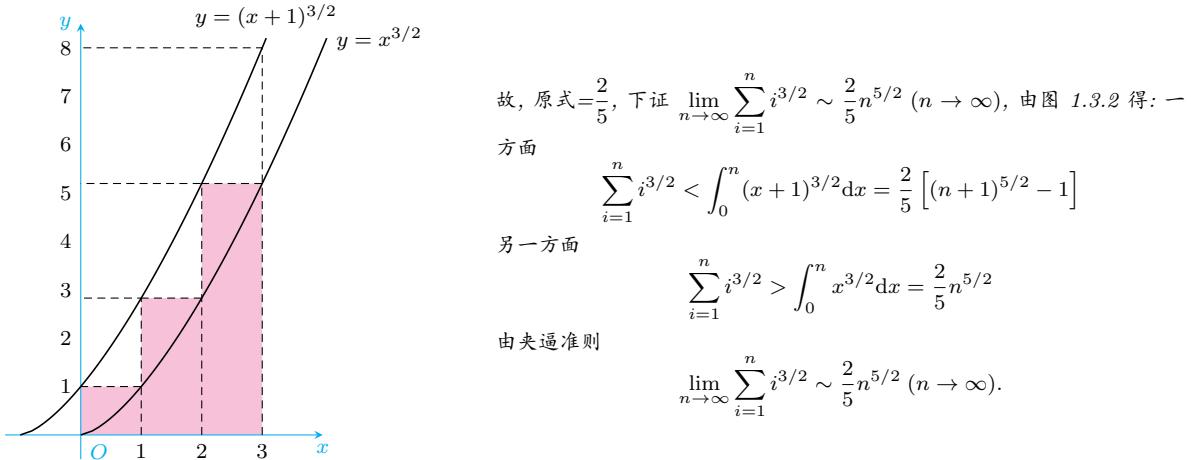


图 1.3.2

例 1.3.19 (第四届数学竞赛). 求极限 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \sqrt[3]{x} \int_x^{x+1} \frac{\sin t}{\sqrt{t+\cos t}} dt$.

当 $x > 1$ 时, 因为

$$0 \leq \left| \int_x^{x+1} \frac{\sin t}{\sqrt{t+\cos t}} dt \right| \leq \int_x^{x+1} \frac{dt}{\sqrt{t-1}} = 2(\sqrt{x} - \sqrt{x-1}) = \frac{2}{\sqrt{x} + \sqrt{x-1}} \leq \frac{2}{\sqrt{x}}$$

所以

$$0 \leq \lim_{x \rightarrow +\infty} \left| \int_x^{x+1} \frac{\sin t}{\sqrt{t+\cos t}} dt \right| \leq \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2\sqrt[3]{x}}{\sqrt{x}} = 0$$

故由夹逼准则得原极限 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \sqrt[3]{x} \int_x^{x+1} \frac{\sin t}{\sqrt{t+\cos t}} dt = 0$.

例 1.3.20 (2013 浙江省数学竞赛). 设 $f_n(x) = x^n \ln x$, 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n!} f_n^{(n-1)}\left(\frac{1}{n}\right)$.

因为 $f'_n(x) = nx^{n-1} \ln x + x^{n-1} = nf_{n-1}(x) + x^{n-1}$, 所以

$$f_n^{(n-1)}(x) = [f'_n(x)]^{(n-2)} = [nf_{n-1}(x) + x^{n-1}]^{(n-2)} = nf_{n-1}^{(n-2)}(x) + (n-1)!x$$

经过递推可得

$$\frac{1}{n!} f_n^{(n-1)}(x) = \frac{f_{n-1}^{(n-2)}(x)}{(n-1)!} + \frac{x}{n} = \frac{f_{n-2}^{(n-3)}(x)}{(n-2)!} + \frac{x}{n-1} + \frac{x}{n} = \cdots = \frac{f'_2(x)}{2!} + x \sum_{k=3}^n \frac{1}{k} = x \left(\ln x + \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} \right)$$

于是, 有 $\frac{1}{n!} f_n^{(n-1)}\left(\frac{1}{n}\right) = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=2}^n \frac{1}{k} - \ln n \right)$, 并且

$$\ln(n+1) - \ln 2 = \int_1^n \frac{dx}{x+1} < \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} < \int_1^n \frac{dx}{x} = \ln n$$

所以

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

由夹逼准则得原极限为 0.

夹逼准则的推广形式

当使用夹逼准则时, 若放大与缩小所得之量的极限值不相等, 但两者只相差一个任意小量, 则夹逼准则仍然有效.

例 1.3.21. (推论 1.3.3 的连续形式) 设 $f(x) > 0$, 在区间 $[0, 1]$ 上连续, 试证

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\sum_{i=1}^n \left[f\left(\frac{i}{n}\right) \right]^n \frac{1}{n}} = \max_{0 \leq x \leq 1} f(x).$$

记 $M = \max_{0 \leq x \leq 1} f(x)$, 则

$$x_n := \sqrt[n]{\sum_{i=1}^n \left[f\left(\frac{i}{n}\right) \right]^n \frac{1}{n}} \leq M$$

因为 $f(x)$ 连续, 根据闭区间连续函数的性质, $\exists x_0 \in [0, 1]$, s.t. $f(x_0) = M$. 于是 $\forall \varepsilon > 0$, $\exists \delta > 0$, 当 $|x - x_0| < \delta$, $x \in [0, 1]$ 时, 有

$$M - \varepsilon < f(x) < M + \varepsilon$$

当 n 充分大时有 $\frac{1}{n} < \delta$, $\exists i_0$, s.t. $\left| \frac{i_0}{n} - x_0 \right| < \delta$, $f\left(\frac{i_0}{n}\right) > M - \varepsilon$. 故

$$x_n := \sqrt[n]{\sum_{i=1}^n \left[f\left(\frac{i}{n}\right) \right]^n \frac{1}{n}} \geq \sqrt[n]{\left(f\left(\frac{i_0}{n}\right) \right)^n \frac{1}{n}} > (M - \varepsilon) \frac{1}{\sqrt[n]{n}} \rightarrow M - \varepsilon$$

由 $\varepsilon > 0$ 的任意性, 知 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = M$.

例 1.3.22. 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n x dx$.

法一: $\forall 0 < \varepsilon < \frac{\pi}{2}$, 有

$$0 \leq \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n x dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}-\varepsilon} \sin^n x dx + \int_{\frac{\pi}{2}-\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \sin^n x dx \leq \frac{\pi}{2} \cdot \sin^n x \left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon \right) + \int_{\frac{\pi}{2}-\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} dx = \frac{\pi}{2} \cdot \sin^n \left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon \right) + \varepsilon$$

令 $n \rightarrow \infty$, 得

$$0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n x dx \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi}{2} \cdot \sin^n x \left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon \right) + \varepsilon = \varepsilon$$

再由 ε 的任意性及夹逼准则, 得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n x dx = 0$.

法二: 记 $I_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n x dx$, 则由

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n x dx = \begin{cases} \frac{(n-1)!!}{n!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & n \text{ 为正偶数} \\ \frac{(n-1)!!}{n!!}, & n \text{ 为大于 1 的奇数} \end{cases}$$

其中 $n!!$ 表示不大于 n 且与 n 有相同奇偶性的数的连乘积. 得

$$I_{2k} = \frac{(2k-1)!!}{(2k)!!} \cdot \frac{\pi}{2}$$

于是有

$$I_{2k}^2 = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdots (2k-3)(2k-1)(2k-1) \cdot 1}{2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 6 \cdots (2k-4)(2k-2)(2k-2)(2k) \cdot 2k} \cdot \frac{\pi}{4}$$

从而得 $\frac{1}{4k} \cdot \frac{\pi^2}{4} < I_{2k}^2 < \frac{2k-1}{4k^2} \cdot \frac{\pi^2}{4}$, 故 $\lim_{k \rightarrow 0} I_{2k} = 0$. 又因为 $0 \leq I_{2k+1} \leq I_{2k}$, 所以 $\lim_{k \rightarrow \infty} I_{2k+1} = 0$, 从而得 $\lim_{n \rightarrow \infty} I_n = 0$,

即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n x dx = 0$.

Wallis 公式

推论 1.3.4. $I_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n x dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^n x dx = \begin{cases} \frac{(n-1)!!}{n!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & n \text{ 为正偶数} \\ \frac{(n-1)!!}{n!!}, & n \text{ 为大于 1 的奇数.} \end{cases}$

一般形式:

$$I_{m,n} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^m x \cos^n x dx = \begin{cases} \frac{(m-1)!!(n-1)!!}{(m+n)!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & m, n \text{ 为正偶数} \\ \frac{(m-1)!!(n-1)!!}{(m+n)!!}, & m, n \text{ 为大于 1 的奇数} \end{cases}.$$

证 利用分部积分公式 $\int f dg = fg - \int g df$,

$$\begin{aligned} I_{m,n} &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^m x \cos^n x dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^m x \cos^{n-1} x d(\sin x) = \sin^{m+1} x \cos^{n-1} x \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin x d(\sin^m x \cos^{n-1} x) \\ &= -m \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^m x \cos^n x dx + (n-1) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{m+2} x \cos^{n-2} x dx = -m I_{m,n} + (n-1) I_{m+2,n-2} \end{aligned}$$

(1) 当 n 为正偶数 $n = 2k$ 时,

$$\begin{aligned} I_{m,n} &= \frac{n-1}{m+1} I_{m+2,n-2} = \frac{n-1}{m+1} \cdot \frac{n-3}{m+3} I_{m+4,n-4} = \cdots = \frac{(n-1)(n-3)\cdots 1}{(m+1)(m+3)\cdots(m+n-1)} I_{m+n,0} \\ &= \begin{cases} \frac{(n-1)(n-3)\cdots 1}{(m+1)(m+3)\cdots(m+n-1)} \frac{(m+n-1)!!}{(m+n)!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & \text{当 } m \text{ 也为正偶数时} \\ \frac{(n-1)(n-3)\cdots 1}{(m+1)(m+3)\cdots(m+n-1)} \frac{(m+n-1)!!}{(m+n)!!}, & \text{否则} \end{cases} \\ &= \begin{cases} \frac{(m-1)!!(n-1)!!}{(m+n)!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & \text{当 } m \text{ 也为正偶数时} \\ \frac{(m-1)!!(n-1)!!}{(m+n)!!}, & \text{否则} \end{cases} \end{aligned}$$

$$\text{因为 } \frac{(n-1)(n-3)\cdots 1}{(m+1)(m+3)\cdots(m+n-1)} = \frac{(m-1)!!(n-1)!!}{(m+n-1)!!}.$$

(2) 当 n 为大于 1 的奇数 $n = 2k+1$ 时 (不论 m 是偶数还是奇数) 时,

$$I_{m,n} = \frac{n-1}{m+1} I_{m+2,n-2} = \frac{n-1}{m+1} \cdot \frac{n-3}{m+3} I_{m+4,n-4} = \cdots = \frac{(n-1)(n-3)\cdots 2}{(m+1)(m+3)\cdots(m+n-2)} I_{m+n-1,1}$$

$$\text{其中 } I_{m+n-1,1} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{m+n-1} x \cos x dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{m+n-1} x d(\sin x) = \int_0^1 t^{m+n-1} dt = \frac{1}{m+n}, \text{ 代入上式, 得}$$

$$I_{m,n} = \frac{(n-1)(n-3)\cdots 2}{(m+1)(m+3)\cdots(m+n-2)} \cdot \frac{1}{m+n} = \frac{(n-1)!!(m-1)!!}{(m+n)!!}.$$

综上即得欲证等式.

定理 1.3.6 (双阶乘与阶乘的转化). $(2n)!! = 2^n \cdot n!$, $(2n-1)!! = \frac{(2n)!}{2^n \cdot n!}$.

例 1.3.23. 设 $a_n = \int_0^1 x^n \sqrt{1-x^2} dx$, $b_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n x \cos^n x dx$, 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n}{a_n}$.

由推论 1.3.4 知, $b_n = \begin{cases} \frac{[(n-1)!!]^2}{(2n)!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & n \text{ 为正偶数} \\ \frac{[(n-1)!!]^2}{(2n)!!}, & n \text{ 大于 1 的奇数} \end{cases}$, 并且

$$a_n \xrightarrow{x=\cos t} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^n t \cdot \sin^2 t dt = \begin{cases} \frac{(n-1)!!}{(n+2)!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & n \text{ 为正偶数} \\ \frac{(n-1)!!}{(n+2)!!}, & n \text{ 大于 1 的奇数} \end{cases}$$

因此

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n}{a_n} = \begin{cases} \frac{[(n-1)!!]^2}{(2n)!!} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{(n+2)!!}{(n-1)!!} \cdot \frac{2}{\pi} = \frac{(n-1)!! \cdot (n+2)!!}{(2n)!!} = \frac{n!(n+2)}{2^n \cdot n!} = \frac{n+2}{2^n} \rightarrow 0, & n \text{ 为正偶数} \\ \frac{[(n-1)!!]^2}{(2n)!!} \cdot \frac{(n+2)!!}{(n-1)!!} = \frac{(n-1)!! \cdot (n+2)!!}{(2n)!!} = \frac{n!(n+2)}{2^n \cdot n!} = \frac{n+2}{2^n} \rightarrow 0, & n \text{ 大于 1 的奇数} \end{cases}$$

故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n}{a_n} = 0$.

1.3.5 求极限其他常用方法

下述的各种方法涉及到之后的知识点, 若对知识点掌握不扎实, 可暂缓阅读.

L'Hospital 法则

定理 1.3.7 ($\frac{0}{0}$ 型 L'Hospital 法则). 如果函数 $f(x)$ 和 $g(x)$ 满足以下条件:

- (1) 当 $x \rightarrow a$ 时, $f(x)$ 和 $g(x)$ 都是无穷小 (或无穷大);
- (2) 在点 a 的某个去心邻域内, $f(x)$ 和 $g(x)$ 都是可导的, 且 $g'(x) \neq 0$;
- (3) $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f'(x)}{g'(x)}$ 存在 (或为无穷大),

那么 $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow a} \frac{f'(x)}{g'(x)}$.

定理 1.3.8 ($\frac{*}{\infty}$ 型 L'Hospital 法则). 对于 $\frac{\infty}{\infty}$ 型的不定式, 一般情形 (即 $\frac{*}{\infty}$ 型的不定式) 为: 如果函数 $f(x)$ 和 $g(x)$ 满足

- (1) 在点 a 的某个去心邻域内, $f(x)$ 和 $g(x)$ 都是可导的, 且 $g'(x) \neq 0$;
- (2) $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = \infty$;
- (3) $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f'(x)}{g'(x)}$ 存在 (或为无穷大),

那么 $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow a} \frac{f'(x)}{g'(x)}$.

每次使用 L'Hospital 法则之前, 务必考察它是否属于七种不定型, 否则不能用, 七种不定型如下.

$$\frac{0}{0}, \frac{\infty}{\infty}, 0 \cdot \infty, \infty - \infty, 0^0, 1^\infty, \infty^0$$

一旦用 L'Hospital 法则算不出结果, 不等于极限不存在. 例如 $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{x + \sin x}{x + \cos x} = 1$, 就是如此. 这是因为 L'Hospital 法则只是充分条件, 不是必要条件.

使用 $\frac{\infty}{\infty}$ 型的 L'Hospital 法则时, 只需要检验分母趋向无穷大即可, 分子不趋向 ∞ 没有关系.

在多数需要使用 L'Hospital 法则的情境下, 式子含有变限积分, 变限积分的求导公式如下:

$$\frac{d}{dx} \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} f(t) dt = f(\beta(x)) \cdot \beta'(x) - f(\alpha(x)) \cdot \alpha'(x).$$

定理 1.3.9 (Heine 定理). 若 $x_n \neq x_0$, $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A \Leftrightarrow \forall x_n \rightarrow x_0 (n \rightarrow \infty)$, 恒有 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = A$.

例 1.3.24. 求下列极限值.

$$\left| \begin{array}{ll} (1) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \int_{\frac{1}{n}}^1 \frac{\cos 2t}{4t^2} dt. & (2) \lim_{n \rightarrow +\infty} \left[\left(n^3 - n^2 + \frac{n}{2} \right) e^{\frac{1}{n}} - \sqrt{1+n^6} \right]. \\ (3) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{n}} \int_1^n \ln \left(1 + \frac{1}{\sqrt{x}} \right) dx. & (4) (\text{中国科学院}) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \int_0^x e^{t^2} dt}{x^2 \sin 2x}. \\ (5) \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\frac{2}{\pi} \arctan x \right)^x. & (6) \lim_{n \rightarrow \infty} \sin \frac{1}{n} \cdot \int_n^{n^2} \left(1 + \frac{1}{2t} \right)^t \sin \frac{1}{\sqrt{t}} dt. \end{array} \right.$$

(1) 将 $\frac{1}{n}$ 替换为 x , 利用 Heine 定理把数列极限转化为函数极限,

$$\text{原式} = \lim_{x \rightarrow 0^+} x \int_x^1 \frac{\cos 2t}{4t^2} dt = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_x^1 \frac{\cos 2t}{4t^2} dt}{t^{-1}} \stackrel{L'}{\equiv} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{-\frac{\cos 2x}{4x^2}}{-\frac{1}{x^2}} = \frac{1}{4} \lim_{x \rightarrow 0^+} \cos 2x = \frac{1}{4}.$$

(2) 由 Heine 定理, 将数列极限转为函数极限, 并且令 $t = \frac{1}{x}$, 那么 $t \rightarrow 0^+$,

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \lim_{t \rightarrow 0^+} \left[\left(\frac{1}{t^3} - \frac{1}{t^2} + \frac{1}{2t} \right) e^t - \sqrt{1 + \frac{1}{t^6}} \right] = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\left(1 - t + \frac{t^2}{2} \right) e^t - \sqrt{1+t^6}}{t^3} \\ &\stackrel{L'}{\equiv} \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{(-1+t)e^t + \left(1 - t + \frac{t^2}{2} \right) e^t - \frac{6t^5}{2\sqrt{1+t^6}}}{3t^2} = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\frac{1}{2}e^t - \frac{3t^3}{\sqrt{1+t^6}}}{3} = \frac{1}{6}. \end{aligned}$$

(3) 为 $\frac{*}{\infty}$ 型, 原式 $\stackrel{L'}{\equiv} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \left(1 + \frac{1}{\sqrt{n}} \right)}{\frac{1}{2\sqrt{n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \frac{2\sqrt{n}}{1} = 2$.

(4) 为 $\frac{0}{0}$ 型, 原式 $= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \int_0^x e^{t^2} dt}{2x^3} \stackrel{L'}{\equiv} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - e^{x^2}}{6x^2} = -\frac{1}{6}$.

(5) 为 1^∞ 型,

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \exp \lim_{x \rightarrow +\infty} x \ln \left(\frac{2}{\pi} \arctan x \right) = \exp \lim_{x \rightarrow +\infty} x \cdot \left(\frac{2}{\pi} \arctan x - 1 \right) \\ &\stackrel{\frac{1}{x}=t}{=} \exp \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\frac{2}{\pi} \arctan \frac{1}{t} - 1}{t} \stackrel{L'}{\equiv} \exp \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{2}{\pi} \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{t^2}} \cdot \left(-\frac{1}{t^2} \right) \right] = e^{-\frac{2}{\pi}}. \end{aligned}$$

(6) 原式 $= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_n^{n^2} \left(1 + \frac{1}{2t} \right)^t \sin \frac{1}{\sqrt{t}} dt}{n} \stackrel{L'}{\equiv} \lim_{n \rightarrow \infty} \left[2n \left(1 + \frac{1}{2n^2} \right)^{n^2} \sin \frac{1}{n} - \left(1 + \frac{1}{2n} \right)^n \sin \frac{1}{\sqrt{n}} \right]$,

其中

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

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{2n} \right)^n \sin \frac{1}{\sqrt{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(1 + \frac{1}{2n} \right)^n}{\sqrt{n}} = 0.$$

故, 原式 $= 2\sqrt{e}$.

例 1.3.25 (中南大学). 设 $f(x)$ 有二阶导数, 在原点附近不为零, 但 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x} = 0$, $f''(0) = 4$, 求

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left(1 + \frac{f(x)}{x} \right)^{\frac{1}{x}}.$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left(1 + \frac{f(x)}{x}\right)^{\frac{1}{x}} = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \ln \left(1 + \frac{f(x)}{x}\right) \stackrel{L'}{=} \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{f'(x)}{x} - \frac{f(x)}{x^2}}{1 + \frac{f(x)}{x}}, \text{下求分子分母的极限.}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x} = 0 \Rightarrow f(0) = \lim_{x \rightarrow 0} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x} \cdot x = 0$$

$$f'(0) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(0)}{x} \stackrel{f(0)=0}{=} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x} = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x^2} \stackrel{L'}{=} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f'(x)}{2x} = \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f'(x) - f'(0)}{x} = \frac{1}{2} f''(0) = 2$$

于是 $\lim_{x \rightarrow 0} \left(1 + \frac{f(x)}{x}\right)^{\frac{1}{x}} = e^{\frac{4-2}{1}} = e^2.$

例 1.3.26 (2005 数学 (二)). 设函数 $f(x)$ 在 $x = 0$ 的某邻域内连续, 且 $f(0) \neq 0$, 求极限

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\int_0^x (x-t)f(t)dt}{x \int_0^x f(x-t)dt}.$$

$$\int_0^x f(x-t)dt \stackrel{x-t=u}{=} -\int_x^0 f(u)du = \int_0^x f(u)du = \int_0^x f(t)dt, \text{ 于是}$$

$$\text{原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x \int_0^x f(t)dt - \int_0^x t f(t)dt}{x \int_0^x f(t)dt} \stackrel{L'}{=} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\int_0^x f(t)dt}{\int_0^x f(t)dt + xf(x)}$$

因为 $f(x)$ 在 $x = 0$ 的某邻域内未必可导, 不满足 L'Hospital 法则条件, 不能继续用 L'Hospital 法则. 以下给出两种解法:

法一: 用积分中值定理 $\int_0^x f(x)dx = f(\xi) \cdot x$, 其中 ξ 介于 0 与 x 之间.

$$\text{原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{xf(\xi)}{xf(\xi) + xf(x)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(\xi)}{f(\xi) + f(x)} = \frac{1}{2}.$$

法二: 令 $F(x) = \int_0^x f(t)dt$, 则 $F'(x) = f(x)$, $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{F(x) - F(0)}{x} = f(0).$

$$\text{原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{F(x)}{F(x) + xF'(x)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{F(x) - F(0)}{x}}{\frac{F(x) - F(0)}{x} + F'(x)} = \frac{f(0)}{f(0) + f(0)} = \frac{1}{2}.$$

注意连续不一定可导, 可导必连续, 即当不满足 L'Hospital 法则条件时, 可参考例题 1.3.26 中给出的两种方法.

$$\text{例 1.3.27.} \text{ 设 } f'(x) \text{ 连续, } f(0) = 0, f'(0) \neq 0, \text{ 求 } \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\int_0^{x^2} f(x^2 - t)dt}{x^3 \int_0^1 f(xt)dt}.$$

分子有

$$\int_0^{x^2} f(x^2 - t)dt \stackrel{x^2-t=u}{=} -\int_{x^2}^0 f(u)du = \int_0^{x^2} f(u)du = \int_0^{x^2} f(t)dt$$

分母有

$$\int_0^1 f(xt)dt \stackrel{xt=v}{=} \frac{1}{x} \int_0^x f(v)dv = \frac{1}{x} \int_0^x f(t)dt$$

于是

$$\text{原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\int_0^{x^2} f(t)dt}{x^2 \int_0^x f(t)dt} \stackrel{L'}{=} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2f(x^2)}{2 \int_0^x f(t)dt + xf(x)} \stackrel{L'}{=} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{4xf'(x^2)}{3f(x) + xf'(x)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{4f'(x^2)}{3 \frac{f(x)}{x} + f'(x)} = \frac{4f'(0)}{4f'(0)} = 1.$$

例 1.3.28. 设 $f(x)$ 在 $x=0$ 的某邻域内连续, 且 $f(0)=0, f'(0)=1$, 求 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\int_0^x t f(x^2 - t^2) dt}{x^3 \sin x}$.

因为 $\int_0^x t f(x^2 - t^2) dt \xrightarrow{x^2 - t^2 = u} -\frac{1}{2} \int_{x^2}^0 f(u) du = \frac{1}{2} \int_0^{x^2} f(t) dt$, 于是

$$\text{原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{2} \int_0^{x^2} f(t) dt}{x^4} \xrightarrow{L'} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x^2)}{4x^2} \xrightarrow{L'} \frac{1}{4} f'(x^2) = \frac{1}{4}.$$

例 1.3.29. 设 $f(x)$ 在 $x=0$ 的某邻域内二阶可导, $f'(0) \neq 0$, $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f(x)}{x} = 0$, $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^x f(t) dt}{x^\alpha - \sin x} = \beta \neq 0$, 求 α 与 β 的值.

由定理 1.3.4 知, $\lim_{x \rightarrow 0^+} (x^\alpha - \sin x) = 0$, 即 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^\alpha}{\sin x} = 1 \Rightarrow \alpha = 1$, 所以

$$\text{原式} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^x f(t) dt}{x - \sin x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^x f(t) dt}{\frac{1}{6} x^3} \xrightarrow{L'} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{2f(x)}{x^2} \xrightarrow{L'} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f'(x)}{x}$$

由 $f'(0) \neq 0$, $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f(x)}{x} = 0$, 可设 $f(x) = x^2$, 故 $\alpha = 1, \beta = 2$.

Taylor 展开

无穷小的相关概念 在正式介绍如何用 Taylor 展开计算极限前, 需要对无穷小性质做相关介绍.

定义 1.3.1 (无穷小的相关定义). (1) 如果 $\lim \frac{\beta}{\alpha} = 1$, 那么称 β 与 α 是等价无穷小, 记作 $\alpha \sim \beta$;

(2) 如果 $\lim \frac{\beta}{\alpha} = c \neq 0$, 那么称 β 是比 α 同阶的无穷小, 记作 $\beta \sim c\alpha$;

(3) 如果 $\lim \frac{\beta}{\alpha^k} = c \neq 0, k > 0$, 那么称 β 是关于 α 的 k 阶无穷小, 记作 $\beta \sim c\alpha^k$;

(4) 如果 $\lim \frac{\beta}{\alpha} = 0$, 那么称 β 是比 α 高阶的无穷小, 记作 $\beta = o(\alpha)$;

(5) 如果 $\lim \frac{\beta}{\alpha} = \infty$, 那么称 β 是比 α 低阶的无穷小.

定理 1.3.10 (等价无穷小的充要条件). β 与 α 是等价无穷小的充分必要条件为 $\beta = \alpha + o(\alpha)$.

定理 1.3.11 (无穷小量的传递性). 设 $\alpha \sim \alpha'$, $\beta \sim \beta'$, 且 $\lim \frac{\beta'}{\alpha'}$ 存在, 则 $\lim \frac{\beta}{\alpha} = \lim \frac{\beta'}{\alpha'}$.

定理 1.3.12 (无穷小量的加法). 设 $m > n > 0$ 且 $\lim \alpha = 0$, 则有 $o(\alpha^m) \pm o(\alpha^n) = o(\alpha^k)$ ($0 < k \leq m+n$).

证 $\lim \frac{o(\alpha^m) \pm o(\alpha^n)}{\alpha^k} = \lim \frac{o(\alpha^m)}{\alpha^m} \cdot \alpha^{m-k} \pm \lim \frac{o(\alpha^n)}{\alpha^n} \cdot \alpha^{n-k} = 0$.

定理 1.3.13 (无穷小量的乘法). $m, n > 0$ 且 $\lim \alpha = 0$, 则有 $o(\alpha^m)(\text{或 } \alpha^m) \cdot o(\alpha^n) = o(\alpha^k)$ ($0 < k \leq m+n$).

证 $\lim \frac{o(\alpha^m) \cdot o(\alpha^n)}{\alpha^k} = \lim \frac{o(\alpha^m)}{\alpha^m} \cdot \lim \frac{o(\alpha^n)}{\alpha^n} \cdot \lim \alpha^{m+n-k} = 0 \times 0 \times 0 = 0$. (α^m 同理).

例 1.3.30. 设 $\cos x - 1 = x \sin \alpha(x)$, 其中 $|\alpha(x)| < \frac{\pi}{2}$, 则当 $x \rightarrow 0$ 时, $\alpha(x)$ 是

- A. 比 x 高阶的无穷小量
- B. 比 x 低阶的无穷小量
- C. 与 x 同阶但不等价的无穷小量
- D. 与 x 等价的无穷小量

由 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\alpha(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin \alpha(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x \sin \alpha(x)}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos x - 1}{x^2} = -\frac{1}{2} \neq 1$, 于是当 $x \rightarrow 0$ 时, $\alpha(x)$ 与 x 同阶但不等价的无穷小量, 选 C.

例 1.3.31. 设 $g(x)$ 可导, 且当 $x \rightarrow 0$ 时, $g(x)$ 是 x 的高阶无穷小, 则当 $x \rightarrow 0$ 时, 必有

- A. $g'(x)$ 是无穷小量
- B. $\frac{x}{g(x)}$ 是无穷大量
- C. 若 $G'(x) = g(x)$, 则 $G(x)$ 是 x 的高阶无穷小
- D. $\int_0^x g(t)dt$ 是 x^2 的高阶无穷小

由于 $g(x)$ 是 x 的高阶无穷小, 故 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{g(x)}{x} = 0$, 则

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\int_0^x g(t)dt}{x^2} \stackrel{L'H}{=} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{g(x)}{2x} = 0$$

因此 $\int_0^x g(t)dt$ 是 x^2 的高阶无穷小, 故选 D.

反例: 对于 A 选项 $g(x) = \begin{cases} x^2 \sin \frac{1}{x}, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$ 此时 $g(x)$ 是 x 的高阶无穷小, 但此时

$$g'(x) = \begin{cases} 2x \sin \frac{1}{x} - \cos \frac{1}{x}, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$$

它在 $x = 0$ 附件是振荡的, 极限不存在, 无法使用 L'Hospital 法则; 对于 B 选项, $g(x) = 0$, 在 $g(x) \neq 0$ 的情况下是对的; 对于 C 选项 $G(x) = x^3 + 1$, $g(x) = 3x^2$, $g(x)$ 的原函数有无数个, 它们相差一个常数, 而只有一个能保证 $G(x)$ 是无穷小.

例 1.3.32. 若 $x \rightarrow 0$ 时, 函数 $\cos x - \frac{c+9x^2}{c+4x^2}$ 是 x^2 的高阶无穷小, 求 c .

因为 $\cos x = 1 - \frac{1}{2}x^2 + o(x^2)$, 且 $\frac{c+9x^2}{c+4x^2} = \frac{9}{4} - \frac{5}{4\left(1+\frac{4}{c}x^2\right)} = \frac{9}{4} - \frac{5}{4}\left[1 - \frac{4}{c}x^2 + o(x^2)\right] = 1 + \frac{5}{c}x^2 + o(x^2)$, 于是

$$\cos x - \frac{c+9x^2}{c+4x^2} = 1 - \frac{1}{2}x^2 - \left[1 + \frac{5}{c}x^2\right] + o(x^2) = \left(-\frac{1}{2} - \frac{5}{c}\right)x^2 + o(x^2)$$

故 $-\frac{1}{2} - \frac{5}{c} = 0$, 解得 $c = -10$.

符号 O 与 o 的含义 符号 “ $f(x) = O(1)$ ” 表示在所讨论过程中, “ $f(x)$ 是有界量”, 即 $\exists M > 0$, 使得 $|f(x)| \leq M$ (在此过程中保持成立); 符号 “ $o(1)$ ” 代表在所讨论过程里, 它是“无穷小量”. 例如: $\alpha = o(1)$, 意指: (在所讨论过程里) α 是无穷小量.

$f(x) = O(g(x))$ 代表 $\frac{f(x)}{g(x)} = O(1)$, $f(x) = o(g(x))$ 代表 $\frac{f(x)}{g(x)} = o(1)$.

推论 1.3.5 (Laurent 级数). 作为例题 1.3.13 的推广表达式:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1 + \frac{\ln(n)}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right);$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e - \frac{e}{2n} + \frac{11e}{24n^2} - \frac{7e}{16n^3} + \frac{2447e}{5760n^4} + O\left(\frac{1}{n^5}\right);$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} x^x = 1 + x \ln x + \frac{1}{2}x^2 \ln^2 x + \frac{1}{6}x^3 \ln^3 x + \frac{1}{24}x^4 \ln^4 x + \frac{1}{120}x^5 \ln^5 x + O(x^6);$$

$$\lim_{x \rightarrow 1} x^x = 1 + (x-1) + (x-1)^2 + \frac{1}{2}(x-1)^3 + \frac{1}{3}(x-1)^4 + \frac{1}{12}(x-1)^5 + O((x-1)^6).$$

例 1.3.33. 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left[\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n - e + \frac{e}{2n} \right].$

由推论 1.3.5 知, 极限可化为 $\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \cdot \left[\frac{11e}{24n^2} + O\left(\frac{1}{n^2}\right) \right] = \frac{11e}{24}.$

例 1.3.34. 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(2 \cdot n^{\frac{1}{n}} - 1\right)^n}{n^2}.$

因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1 + \frac{\ln n}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right)$, 于是原式化为

$$I = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left[1 + \frac{2 \ln n}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right)\right]^n}{n^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{1 + \frac{2 \ln n}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right)}{n^{\frac{2}{n}}} \right]^n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{n + 2 \ln n + O\left(\frac{1}{n}\right)}{n^{\frac{2}{n}+1}} \right]^n$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, $n^{\frac{2}{n}+1} \rightarrow n$, $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{n} = 0$, 故上式极限为 1.

例 1.3.35. 求极限 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{(1+2x)^{\frac{1}{x}} + e^2(x - \sqrt{1-2x})}{x^2}.$

因为 $(1+2x)^{\frac{1}{x}} = (1+2x)^{\frac{1}{2x} \cdot 2} = \left(e - \frac{e}{2} \cdot 2x + \frac{11e}{24} \cdot (2x)^2 + o(x^2)\right)^2 = e^2 \left(1 - 2x + \frac{14}{3}x^2\right) + o(x^2)$, 且 $x - \sqrt{1-2x} = -1 + 2x + \frac{1}{2}x^2 + o(x^2)$, 于是

$$I = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^2 \left(1 - 2x + \frac{14}{3}x^2 - 1 + 2x + \frac{1}{2}x^2 + o(x^2)\right)}{x^2} = \frac{31}{6}e^2.$$

Taylor 公式 若 $f^{(n)}(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, $f^{(n+1)}(x)$ 在 (a, b) 内可导, 则 $\forall x, x_0 \in [a, b], \exists \xi$ 位于 x 与 x_0 之间, 使得下式成立:

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \cdots + \frac{1}{n!} f^{(n)}(x_0)(x - x_0)^n + R_n(x)$$

其中, $R_n(x) = \frac{1}{(n+1)!} f^{(n+1)}(\xi)(x - x_0)^{n+1}$ 为 Lagrange 余项.

若 $f(x)$ 在 x_0 处有 n 阶导数 $f^{(n)}(x_0)$, 则在 x_0 邻域内上式成立, 其中 $R_n(x) = o((x - x_0)^n)$ ($x \rightarrow x_0$), 称为 Peano 余项. 常用函数的展开式可见 7.2.3 节.

例 1.3.36. 若要使 $x \rightarrow 0$ 时, $e^x - \frac{1+ax}{1+bx}$ 为尽可能高阶的无穷小量, 问数 a, b 应取何值? 用 x 的幂级数写出此时的等价无穷小.

用 Taylor 公式展开到 x^3 此项, 有 $e^x = \sum_{k=0}^3 \frac{x^k}{k!} + o(x^3)$,

$$\frac{1+ax}{1+bx} = \frac{1+bx+(a-b)x}{1+bx} = 1 + (a-b)x \left[\sum_{k=0}^2 (-bx)^k + o(x^2) \right] = 1 + (a-b) \sum_{k=0}^2 (-1)^k b^k x^{k+1} + o(x^3)$$

于是

$$e^x - \frac{1+ax}{1+bx} = [1 - (a-b)]x + \left[\frac{1}{2} + (a-b)b \right] x^2 + \left(\frac{1}{3!} - ab^2 + b^3 \right) x^3 + o(x^3)$$

令 x 的一、二次项系数为零, 解得 $a = \frac{1}{2}$, $b = -\frac{1}{2}$, 此时

$$e^x - \frac{1+ax}{1+bx} = -\frac{1}{12}x^3 + o(x^3) \sim -\frac{1}{12}x^3 (x \rightarrow 0).$$

例 1.3.37. 用 Taylor 展开求下列极限值.

(1) $\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{3-e^x}{2+x} \right)^{\csc x}.$	(2) $\lim_{x \rightarrow 0} \left(2 - \frac{\ln(1+x)}{x} \right)^{\frac{1}{x}}.$	(3) $\lim_{x \rightarrow 0} (\cos 2x + 2x \sin x)^{\frac{1}{x^4}}.$
(4) $\lim_{x \rightarrow \infty} e^{-x} \cdot \left(1 + \frac{1}{x} \right)^{x^2}.$	(5) $\lim_{x \rightarrow 0} \left[\frac{(1+x)^{\frac{1}{x}}}{e} \right]^{\frac{1}{x}}.$	(6) $\lim_{x \rightarrow +\infty} \left(x^{\frac{1}{x}} - 1 \right)^{\frac{1}{\ln x}}.$
(7) $\lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{x} + 2^{\frac{1}{x}} \right)^x.$	(8) $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{x^2}{2} + 1 - \sqrt{1+x^2}}{(\cos x - e^{x^2}) \sin(x^2)}.$	(9) $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^{(1+x)^{\frac{1}{x}}} - (1+x)^{\frac{e}{x}}}{x^2}.$

$$(1) \text{ 原式} = e^{\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \ln \frac{3-e^x}{2+x}} = e^{\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1-e^x-x}{(2+x)x}} = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1-x-\left(1+x+\frac{x^2}{2!}+o(x^2)\right)}{x(2+x)} = \frac{1}{e}.$$

(2) 本题也可以用等价无穷小来写.

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \ln \left(2 - \frac{\ln(1+x)}{x} \right) = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \cdot \left(1 - \frac{\ln(1+x)}{x} \right) \\ &= \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \ln(1+x)}{x^2} = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \left(x - \frac{x^2}{2} + o(x^2) \right)}{x^2} = \sqrt{e}. \end{aligned}$$

(3) 要将 $\sin x$ 与 $\cos x$ 展开到四阶, 与分母等价.

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^4} \ln(\cos 2x + 2x \sin x) = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos 2x + 2x \sin x - 1}{x^4} \\ &= \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \frac{(2x)^2}{2!} + \frac{(2x)^4}{4!} + o(x^4) + 2x \left(x - \frac{x^3}{3!} + o(x^3) \right) - 1}{x^4} = e^{\frac{1}{3}}. \end{aligned}$$

(4) 注意本题要将 $\ln \left(1 + \frac{1}{x} \right)$ 展开到二阶.

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \exp \lim_{x \rightarrow \infty} x \ln \left[e^{-1} \left(1 + \frac{1}{x} \right)^x \right] = \exp \lim_{x \rightarrow \infty} x \left[x \ln \left(1 + \frac{1}{x} \right) - 1 \right] \\ &= \exp \lim_{x \rightarrow \infty} x \left[x \cdot \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{2x^2} + o\left(\frac{1}{x^2}\right) \right) - 1 \right] = e^{-\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

$$(5) \text{ 原式} = e^{\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \ln \frac{(1+x)^{\frac{1}{x}}}{e}} = e^{\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} [\frac{1}{x} \ln(1+x) - 1]} = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \left[\frac{1}{x^2} \left(x - \frac{x^2}{2} + o(x^2) \right) - \frac{1}{x} \right] = e^{-\frac{1}{2}}.$$

(6) 本题也可以用等价无穷小来写.

$$\text{原式} = \exp \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{\ln x} \ln \left(x^{\frac{1}{x}} - 1 \right) = \exp \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln \ln x - \ln x + \frac{\ln x}{2x} + o\left(\frac{1}{x^2}\right)}{\ln x + o\left(\frac{1}{x^2}\right)}$$

$$= \exp \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2x \ln \ln x + (1-2x) \ln x + o\left(\frac{1}{x^2}\right)}{2x \ln x + o\left(\frac{1}{x^2}\right)} = \exp \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2 \ln \ln x}{\ln x} + \frac{1}{x} - 2 \right) = e^{-1}.$$

(7) 本题也可以用等价无穷小来写.

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \exp \lim_{x \rightarrow \infty} x \ln \left(\frac{1}{x} + 2^{\frac{1}{x}} \right) = \exp \lim_{x \rightarrow \infty} x \left(\frac{1}{x} + 2^{\frac{1}{x}} - 1 \right) \stackrel{\frac{1}{x}=t}{=} \exp \lim_{t \rightarrow 0} \frac{t + 2^t - 1}{t} \\ &= \exp \lim_{t \rightarrow 0} \frac{t + e^{t \ln 2} - 1}{t} = \exp \lim_{t \rightarrow 0} \frac{t + t \ln 2 + o(t)}{t} = e^{1+\ln 2} = 2e. \end{aligned}$$

$$(8) \text{ 原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{x^2}{2} + 1 - \left(1 + \frac{x^2}{2} - \frac{x^4}{8} + o(x^4)\right)}{(\cos x - 1 + 1 - e^{x^2}) \cdot x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{x^4}{8} + o(x^4)}{\left(-\frac{x^2}{2} - x^2 + o(x^2)\right) x^2} = -\frac{1}{12}$$

(9) 因为 $\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + o(x^4)$, 则

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^{(1+x)^{1/x}} \left[(1+x)^{\frac{1}{x}} - \frac{e}{x} \ln(1+x) \right]}{x^2} = e^{e+1} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\exp \left[\frac{1}{x} \ln(1+x) - 1 \right] - \frac{1}{x} \ln(1+x)}{x^2} \\ &= e^{e+1} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\exp \left(-\frac{x}{2} + \frac{x^2}{3} + o(x^2) \right) - 1 + \frac{x}{2} - \frac{x^2}{3} + o(x^2)}{x^2} = e^{e+1} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{2} \left(-\frac{x}{2} + \frac{x^2}{3} + o(x^2) \right)^2}{x^2} = \frac{e^{e+1}}{8}. \end{aligned}$$

例 1.3.38. 用 Taylor 展开求下列极限值.

$$\left| \begin{array}{ll} (1) \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\sqrt[3]{x^3 + 3x^2} - \sqrt[4]{x^4 - 2x^3} \right). & (2) \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\sqrt[3]{x^3 + 2x^2 + 1} - xe^{\frac{1}{x}} \right). \\ (3) \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\sin \frac{2}{x^2} + \cos \frac{1}{x} \right)^{\sin^{-2}(\frac{1}{x})}. & (4) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\left(e^{x^2} - 1 \right) \cdot (\sqrt{1+x} + \sqrt{1-x} - 2)}{[\ln(1-x) + \ln(1+x)] \cdot \sin \frac{x^2}{1+x}}. \\ (5) \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_1^x [t^2 (e^{\frac{1}{t}} - 1) - t] dt}{x^2 \ln \left(1 + \frac{1}{x} \right)}. & (6) \lim_{x \rightarrow 0} \left(1 - x^{\frac{2}{3}} + \int_0^{\sqrt[5]{x^2}} e^{\frac{1}{2}t^2} dt \right)^{x^{-2}}. \end{array} \right.$$

$$(1) \text{ 原式} = \lim_{x \rightarrow +\infty} x \left(\sqrt[3]{1 + \frac{3}{x}} - \sqrt[4]{1 - \frac{2}{x}} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} x \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{3}{x} - 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{2}{x} + o\left(\frac{1}{x}\right) \right) = \frac{3}{2}.$$

$$(2) \text{ 原式} = \lim_{x \rightarrow +\infty} x \left(\sqrt[3]{1 + \frac{2}{x} + \frac{1}{x^3}} - e^{\frac{1}{x}} \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} x \left(1 + \frac{2}{3x} + \frac{1}{3x^3} - 1 - \frac{1}{x} + o\left(\frac{1}{x}\right) \right) = -\frac{1}{3}.$$

(3) 等价无穷小与 Taylor 展开配合使用.

$$\text{原式} \stackrel{\frac{1}{x}=t}{=} \exp \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{\sin^2 t} \ln (\sin 2t^2 + \cos t) = \exp \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sin 2t^2 + \cos t - 1}{t^2} = \exp \lim_{t \rightarrow 0} \frac{2t^2 - \frac{t^2}{2} + o(t^2)}{t^2} = e^{\frac{3}{2}}.$$

$$(4) \text{ 原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 \left(\frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} - \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} + o(x^2) \right)}{-\left(x + \frac{x^2}{2} + o(x^2) \right) + x - \frac{x^2}{2} + o(x^2)} \cdot \frac{1+x}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-\frac{x^2}{4}}{-x^2} = \frac{1}{4}.$$

(5) 等价无穷小与 L'Hospital 法则和 Taylor 展开配合使用, 要注意展开的阶数.

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_1^x [t^2 (e^{\frac{1}{t}} - 1) - t] dt}{x} \stackrel{L'}{=} \lim_{x \rightarrow +\infty} x^2 \left[\left(e^{\frac{1}{x}} - 1 \right) - x \right] \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \left[x^2 \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{2x^2} + o\left(\frac{1}{x^2}\right) \right) - x \right] = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

(6) 被积函数的 Taylor 展开 若 $F(x) = f(x) + o(x^n)$, 则有 $\int_0^x F(t)dt = \int_0^x f(t)dt + o(x^{n+1})$,

$$\begin{aligned} \text{原式 } & \frac{x^{\frac{2}{3}}=y}{y \rightarrow 0} \lim_{y \rightarrow 0} \left(1 - y + \int_0^y e^{\frac{1}{2}t^2} dt \right)^{y-3} = \exp \lim_{y \rightarrow 0} \frac{1}{y^3} \ln \left(1 - y + \int_0^y e^{\frac{1}{2}t^2} dt \right) \\ & = \exp \lim_{y \rightarrow 0} \frac{-y + \int_0^y \left(1 + \frac{1}{2}t^2 + o(t^2) \right) dt}{y^3} = \exp \lim_{y \rightarrow 0} \frac{-y + y + \frac{1}{6}y^3 + o(y^3)}{y^3} = e^{\frac{1}{6}}. \end{aligned}$$

例 1.3.39. 设 $f(x)$ 在 $x=0$ 的某领域内可导, 且 $f(0)=1, f'(0)=2$, 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(n \cdot \sin \frac{1}{n} \right)^{\frac{n}{1-f(\frac{1}{n})}}$.

$$\begin{aligned} \text{原式} & = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{1-f\left(\frac{1}{n}\right)} \ln \left(n \sin \frac{1}{n} \right) = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{1-f\left(\frac{1}{n}\right)} \left(n \sin \frac{1}{n} - 1 \right) \\ & = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{1-f\left(\frac{1}{n}\right)} \left[n \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{6n^3} + o\left(\frac{1}{n^3}\right) \right) - 1 \right] = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{-\frac{1}{6n}}{1-f\left(\frac{1}{n}\right)} \\ & = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{n}}{f\left(0 + \frac{1}{n}\right) - f(0)} = e^{\frac{1}{6f'(0)}} = e^{\frac{1}{12}} \end{aligned}$$

例 1.3.40 (2020 北京化工大学). 计算极限 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \left\{ \frac{e}{2}x + x^2 \left[\left(1 + \frac{1}{x} \right)^x - e \right] \right\}$.

令 $\frac{1}{x}=t, (t \rightarrow 0^+, x \rightarrow +\infty)$, 于是

$$\text{原式} = \lim_{t \rightarrow 0^+} \left\{ \frac{e}{2t} + \frac{1}{t^2} \left[(1+t)^{\frac{1}{t}} - e \right] \right\} = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{et + 2 \left[(1+t)^{\frac{1}{t}} - e \right]}{2t^2}$$

其中 $(1+t)^{\frac{1}{t}} = e^{\frac{1}{t} \ln(1+t)}$, 并且需要将 $\ln(1+t)$ 展开到三阶, 即 $\ln(1+t) = t - \frac{t^2}{2} + \frac{t^3}{3} + o(x^3)$, 那么

$$\frac{\ln(1+t)}{t} = 1 - \frac{t}{2} + \frac{t^2}{3} + o(x^2)$$

于是 $e^{\frac{1}{t} \ln(1+t)} = e \cdot e^{-\frac{t}{2} + \frac{t^2}{3} + o(x^2)}$, 并且需要将 e^x 展开到二阶, 这是因为对 $-\frac{t}{2} + \frac{t^2}{3}$ 平方后依旧存在 t 的二阶项, 但无需展开到三阶, 故

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

因此

$$\text{原式} = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{et + 2 \left[e \left(1 - \frac{t}{2} + \frac{11t^2}{24} + o(t^2) \right) - e \right]}{2t^2} = \frac{11}{24}e.$$

例 1.3.41. 设 p 是某正整数, $I_n = \frac{1}{n^p} \sum_{k=1}^n k^p - \frac{n}{p+1}$, 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} I_n$.

由带 Peano 余项的 Taylor 展开式 $f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x-x_0) + \frac{1}{2!}f''(x_0)(x-x_0)^2 + o((x-x_0)^2)$ 记 $h = x - x_0$ 可得

$$f(x) - f(x-h) = f'(x)h + \frac{1}{2}f''(x)h^2 + o\left(\frac{1}{h^2}\right)$$

那么令 $f(x) = \frac{x^{1+p}}{1+p}$, 则 $f'(x) = x^p$, $f''(x) = px^{p-1}$, 于是当 $n \rightarrow \infty$ 时

$$f\left(\frac{k}{n}\right) - f\left(\frac{k-1}{n}\right) = \frac{1}{n} \left(\frac{k}{n}\right)^p + \frac{1}{2n^2} p \left(\frac{k}{n}\right)^{p-1} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)$$

即

$$\left(\frac{k}{n}\right)^p = n \left[f\left(\frac{k}{n}\right) - f\left(\frac{k-1}{n}\right) \right] - \frac{1}{2n} p \left(\frac{k}{n}\right)^{p-1} + o\left(\frac{1}{n}\right)$$

累加得

$$\frac{1}{n^p} \sum_{k=1}^n k^p = n(f(1) - f(0)) + \frac{p}{2n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n}\right)^{p-1} + o(1)$$

又因为 $\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{k}{n}\right)^{p-1} = p$, 所以 $\lim_{n \rightarrow \infty} I_n = \frac{1}{2}$.

例 1.3.42. 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \sin(2\pi n!e)$.

用 Taylor 公式, $\exists \theta_n \in (0, 1)$, 使得

$$e = e^x|_{x=1} = \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} + \frac{1}{(n+1)!} + \frac{e^{\theta_n}}{(n+2)!}$$

$$\text{原式} = \lim_{n \rightarrow \infty} n \sin \left\{ 2\pi n! \left[\sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} + \frac{1}{(n+1)!} + \frac{e^{\theta_n}}{(n+2)!} \right] \right\} = \lim_{n \rightarrow \infty} n \sin \left[\frac{2\pi}{n+1} + \frac{2\pi e^{\theta_n}}{(n+1)(n+2)} \right]$$

其中 $\alpha_n \stackrel{\text{记}}{=} \frac{2\pi}{n+1} + \frac{2\pi e^{\theta_n}}{(n+1)(n+2)} \rightarrow 0$ ($n \rightarrow \infty$), 于是

$$\text{原式} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(n \cdot \frac{\sin \alpha_n}{\alpha_n} \cdot \alpha_n \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} n \cdot \alpha_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{2\pi n}{n+1} + \frac{n}{(n+1)(n+2)} \cdot 2\pi e^{\theta_n} \right] = 2\pi.$$

两个函数乘积的 Taylor 展开 若 f, g 展开第一个不为 0 的项次数分别为 m, n , 欲使 $f \cdot g$ 展开到 p 阶, 则 f, g 分别需要展开到 $p-n, p-m$ 阶.

例 1.3.43. 将下列函数展开到指定的阶数.

$$(1) \ln(1+x) \sin x, \text{ 展开到 4 阶. } \quad (2) e^x \sin x, \text{ 展开到 3 阶. } \quad (3) \frac{\ln(1+x)}{1-x}, \text{ 展开到 3 阶.}$$

$$\begin{array}{ccc} \ln(1+x) : x^1 & \nearrow x^3 & \\ \cancel{x^1} & & \cancel{x^3} \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} e^x : 1 & \nearrow x^2 & \\ \cancel{1} & & \cancel{x^2} \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} \ln(1+x) : x^1 & \nearrow x^3 & \\ \cancel{x^1} & & \cancel{x^3} \end{array}$$

$$(1) \ln(1+x) = x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 + o(x^3), \sin x = x - \frac{1}{6}x^3 + o(x^3), \text{ 所以}$$

$$\begin{aligned} \ln(1+x) \sin x &= \left(x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 + o_1(x^3) \right) \left(x - \frac{1}{6}x^3 + o_2(x^3) \right) \\ &= x^2 - \frac{1}{6}x^4 - \frac{1}{2}x^3 + \frac{1}{3}x^4 + o(x^4) = \frac{1}{6}x^4 - \frac{1}{2}x^3 + x^2 + o(x^4) \end{aligned}$$

$$(2) e^x = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 + o(x^2), \sin x = x - \frac{1}{6}x^3 + o(x^3), \text{ 所以}$$

$$\begin{aligned} e^x \sin x &= \left(1 + x + \frac{1}{2}x^2 + o(x^2) \right) \left(x - \frac{1}{6}x^3 + o(x^3) \right) \\ &= x - \frac{1}{6}x^3 + x^2 + \frac{1}{2}x^3 + o(x^3) = \frac{1}{3}x^3 + x^2 + x + o(x^3) \end{aligned}$$

$$(3) \ln(1+x) = x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 + o(x^3), \quad \frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + o(x^2), \text{ 所以}$$

$$\begin{aligned} \frac{\ln(1+x)}{1-x} &= \left(x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 + o(x^3) \right) (1 + x + x^2 + o(x^2)) \\ &= x + x^2 + x^3 - \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{2}x^3 + \frac{1}{3}x^3 + o(x^3) = \frac{5}{6}x^3 + \frac{1}{2}x^2 + x + o(x^3). \end{aligned}$$

推论 1.3.6. f_1, f_2, \dots, f_k 展开第一个不为 0 的项次数分别为 m_1, m_2, \dots, m_k , 欲使 $f_1 f_2 \cdots f_k$ 展开到 p 阶, 则 f_1, f_2, \dots, f_k 分别需要展开到 $p - (m_2 + m_3 + \dots + m_k), p - (m_1 + m_3 + \dots + m_k), \dots, p - (m_2 + m_3 + \dots + m_{k-1})$ 阶.

例 1.3.44. 试用推论 1.3.6, 计算例 1.3.2(12).

需要将 $\sin kx$ 展开到三阶, 故 $\sin kx = kx - \frac{1}{6}(kx)^3 + o(x^3)$, 那么

$$\prod_{k=1}^n \sin kx = \prod_{k=1}^n \left[kx - \frac{1}{6}(kx)^3 + o(x^3) \right] (x \rightarrow 0)$$

在上式中排列组合出 x 的阶数小于等于 $n+2$ 的项, 有

$$\prod_{k=1}^n \sin kx = n!x^n - \sum_{k=1}^n \frac{1}{6} n! k^2 x^{n+2} + o(x^{n+2}) = n!x^n - \frac{n!x^{n+2}}{6} \sum_{k=1}^n k^2 + o(x^{n+2}) (x \rightarrow 0)$$

$$\text{故原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{n!x^n - n!x^n + \frac{n!x^{n+2}}{6} \sum_{k=1}^n k^2 + o(x^{n+2})}{x^{n+2}} = \frac{n!}{6} \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(2n+1)}{36} (n+1)!.$$

复合函数的 Taylor 展开 先确定外函数的展开阶数, 再由各项阶数确定内函数的展开阶数.

例 1.3.45. 将下列函数展开到指定的阶数.

$$\begin{array}{ll} (1) \sin(\sin x), \text{ 展开到 3 阶.} & (2) e^{\tan x} - e^{\sin x}, \text{ 展开到 3 阶.} \\ (3) \ln \cos x, \text{ 展开到 6 阶.} & (4) \frac{1}{e}(1+x)^{\frac{1}{x}}, \text{ 展开到 3 阶.} \end{array}$$

(1) 先将外层函数展开到 3 阶,

$$\begin{aligned} \sin(\sin x) &= \sin x - \frac{1}{6} \sin^3 x + o(\sin^3 x) = x - \frac{1}{6}x^3 + o(x^3) - \frac{1}{6}(x+o(x))^3 + o(x^3) \\ &= x - \frac{1}{6}x^3 - \frac{1}{6}x^3 + o(x^3) = x - \frac{1}{3}x^3 + o(x^3). \end{aligned}$$

(2) $e^{\tan x} - e^{\sin x} = e^{\tan x} - 1 - (e^{\sin x} - 1)$, 先将外层函数展开到 3 阶,

$$\begin{aligned} e^{\tan x} - 1 &= \tan x + \frac{1}{2} \tan^2 x + \frac{1}{6} \tan^3 x + o(\tan^3 x) \\ &= \left(x + \frac{1}{3}x^3 + o(x^3) \right) + \frac{1}{2}(x+o(x))^2 + \frac{1}{6}(x+o(x))^3 + o(x^3) \\ &= \frac{1}{2}x^3 + \frac{1}{2}x^2 + x + o(x^3) \\ e^{\sin x} - 1 &= \sin x + \frac{1}{2} \sin^2 x + \frac{1}{6} \sin^3 x + o(\sin^3 x) \\ &= \left(x^3 - \frac{1}{6}x^3 + o(x^3) \right) + \frac{1}{2}(x+o(x))^2 + \frac{1}{6}(x+o(x))^3 + o(x^3) \\ &= \frac{1}{2}x^2 + x + o(x^3) \end{aligned}$$

$$\text{故 } e^{\tan x} - e^{\sin x} = \frac{1}{2}x^3 + o(x^3).$$

(3) 先将外层函数展开到 6 阶,

$$\begin{aligned}\ln \cos x &= \frac{1}{2} \ln(1 - \sin^2 x) = -\frac{1}{2} \left(\sin^2 x + \frac{\sin^4 x}{2} + \frac{\sin^6 x}{3} + o(\sin^3 x) \right) \\ &= -\frac{1}{2} \left[\left(x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + o(x^5) \right)^2 + \frac{1}{2} \left(x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + o(x^5) \right)^4 + \frac{1}{3} (x + o(x))^6 \right] + o(x^6) \\ &= -\frac{1}{45} x^6 - \frac{1}{12} x^4 - \frac{1}{2} x^2 + o(x^6).\end{aligned}$$

(4) 原式 $= e^{\frac{1}{x} \ln(1+x)-1}$, 注意到 $\ln(1+x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{n+1}}{n+1}$, 于是

$$\begin{aligned}\text{原式} &= e^{-\frac{x}{2} + \frac{x^2}{3} - \frac{x^3}{4} + o(x^3)} = 1 + \left(-\frac{x}{2} + \frac{x^2}{3} - \frac{x^3}{4} + o(x^3) \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \left(-\frac{x}{2} + \frac{x^2}{3} - \frac{x^3}{4} + o(x^3) \right)^2 + \frac{1}{6} \left(-\frac{x}{2} + \frac{x^2}{3} - \frac{x^3}{4} + o(x^3) \right)^3 \\ &= 1 - \frac{1}{2} x + \frac{11}{24} x^2 - \frac{7}{16} x^3 + o(x^3).\end{aligned}$$

例 1.3.46. 计算下列极限值.

$$\left| \begin{array}{ll} (1) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\tan(e^x - 1) - e^{\tan x} + 1}{x^4}. & (2) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos(\sin x) - e^{\cos x - 1}}{\tan^2 x - \sin^2 x}. \\ (3) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1 + \sin^2 x) - 6(\sqrt[3]{2} - \cos x - 1)}{x^4}. & (4) \lim_{x \rightarrow \infty} \left[\left(x - \frac{1}{2} \right)^2 - x^4 \ln^2 \left(1 + \frac{1}{x} \right) \right]. \end{array} \right.$$

(1) 注意到

$$e^x = 1 + x + \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{6} x^3 + \frac{1}{24} x^4 + o(x^4), \tan x = x + \frac{1}{3} x^3 + o(x^4)$$

于是

$$\begin{aligned}\tan(e^x - 1) &= e^x - 1 + \frac{1}{3}(e^x - 1)^3 + o(x^4) \\ &= x + \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{6} x^3 + \frac{1}{24} x^4 + \frac{1}{3} \left(x + \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{6} x^3 + \frac{1}{24} x^4 + o(x^4) \right)^3 + o(x^4) \\ &= x + \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{6} x^3 + \frac{1}{24} x^4 + \frac{1}{3} x^3 \left(1 + \frac{1}{2} x + \frac{1}{6} x^2 + \frac{1}{24} x^3 + o(x^3) \right)^3 + o(x^4) \\ &= x + \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{6} x^3 + \frac{1}{24} x^4 + \frac{1}{3} x^3 + \frac{1}{2} x^4 + o(x^4) \\ &= x + \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{2} x^3 + \frac{13}{24} x^4 + o(x^4)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}e^{\tan x} - 1 &= \tan x + \frac{1}{2} \tan^2 x + \frac{1}{6} \tan^3 x + \frac{1}{24} \tan^4 x + o(x^4) \\ &= x + \frac{x^3}{3} + \frac{1}{2} \left(x + \frac{x^3}{3} + o(x^4) \right)^2 + \frac{1}{6} \left(x + \frac{x^3}{3} + o(x^4) \right)^3 + \frac{1}{24} \left(x + \frac{x^3}{3} + o(x^4) \right)^4 + o(x^4) \\ &= x + \frac{1}{3} x^3 + \frac{1}{2} \left(x^2 + \frac{2}{3} x^4 + o(x^4) \right) + \frac{1}{6} (x^3 + o(x^4)) + \frac{1}{24} (x^4 + o(x^4)) + o(x^4) \\ &= x + \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{2} x^3 + \frac{9}{24} x^4 + o(x^4)\end{aligned}$$

$$\text{因此原式} = \frac{\frac{1}{6} x^4 + o(x^4)}{x^4} = \frac{1}{6}.$$

(2) 与上题同理, 注意到

$$\begin{aligned}\cos x &= 1 - \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{24} x^4 + o(x^4), \sin x = x - \frac{1}{6} x^3 + o(x^4) \\ \tan x &= x + \frac{1}{3} x^3 + o(x^4), e^x = 1 + x + \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{6} x^3 + \frac{1}{24} x^4 + o(x^4)\end{aligned}$$

于是

$$\begin{aligned}
 \cos(\sin x) &= 1 - \frac{1}{2} \sin^2 x + \frac{1}{24} \sin^4 x + o(x^4) \\
 &= 1 - \frac{1}{2} \left(x - \frac{1}{6} x^3 + o(x^4) \right)^2 + \frac{1}{24} \left(x - \frac{1}{6} x^3 + o(x^4) \right)^4 + o(x^4) \\
 &= 1 - \frac{1}{2} \left(x^2 - \frac{1}{3} x^4 + o(x^4) \right) + \frac{1}{24} x^4 + o(x^4) \\
 &= 1 - \frac{1}{2} x^2 + \frac{5}{24} x^4 + o(x^4) \\
 e^{\cos x - 1} &= e^{-\frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{24} x^4 + o(x^4)} \\
 &= 1 + \left(-\frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{24} x^4 + o(x^4) \right) + \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{24} x^4 + o(x^4) \right)^2 + o(x^4) \\
 &= 1 - \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{24} x^4 + o(x^4) + \frac{1}{2} x^4 \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{24} x^2 + o(x^2) \right)^2 + o(x^4) \\
 &= 1 - \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{24} x^4 + \frac{1}{8} x^4 + o(x^4) = 1 - \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{6} x^4 + o(x^4) \\
 \tan^2 x - \sin^2 x &= \left(x + \frac{1}{3} x^3 + o(x^4) \right)^2 - \left(x - \frac{1}{6} x^3 + o(x^4) \right)^2 \\
 &= x^2 + \frac{2}{3} x^4 + o(x^4) - \left(x^2 - \frac{1}{3} x^4 + o(x^4) \right) = x^4 + o(x^4) \\
 \text{于是原式} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \frac{1}{2} x^2 + \frac{5}{24} x^4 + o(x^4) - \left(1 - \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{6} x^4 + o(x^4) \right)}{x^4 + o(x^4)} = \frac{1}{24}.
 \end{aligned}$$

$$(3) \ln(1 + \sin^2 x) = \sin^2 x - \frac{1}{2} \sin^4 x + o(x^4), \text{ 且 } \sin x = x - \frac{1}{6} x^3 + o(x^4), \text{ 于是}$$

$$\begin{aligned}
 \ln(1 + \sin^2 x) &= \left(x - \frac{1}{6} x^3 \right)^2 - \frac{1}{2} \left(x - \frac{1}{6} x^3 \right)^4 + o(x^4) \\
 &= x^2 \left(1 - \frac{1}{6} x^2 \right)^2 - \frac{1}{2} x^4 \left(1 - \frac{1}{6} x^2 \right)^4 + o(x^4) = x^2 - \frac{5}{6} x^4 + o(x^4)
 \end{aligned}$$

另一方面,

$$\begin{aligned}
 \sqrt[3]{2 - \cos x} - 1 &= \sqrt[3]{1 + (1 - \cos x)} - 1 = \frac{1}{3}(1 - \cos x) + \frac{\frac{1}{3} \cdot \left(-\frac{2}{3} \right)}{2!} (1 - \cos x)^2 \\
 &= \frac{1}{3} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{x^4}{24} + o(x^4) \right) - \frac{1}{9} \left(\frac{x^2}{2} + o(x^4) \right)^2 + o(x^4) = \frac{1}{6} x^2 - \frac{x^4}{24} + o(x^4) \\
 \text{于是原式} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-\frac{7}{12} x^4 + o(x^4)}{x^4} = -\frac{7}{12}.
 \end{aligned}$$

(4) 法一: 利用 L'Hospital 法则计算极限

$$\begin{aligned}
 I &= \lim_{x \rightarrow \infty} x^2 \left[1 - \frac{1}{2x} + \ln \left(1 + \frac{1}{x} \right) \right] \left[1 - \frac{1}{2x} - \ln \left(1 + \frac{1}{x} \right) \right] \xrightarrow{\frac{1}{x}=t} \lim_{t \rightarrow 0} \left[1 - \frac{t}{2} + \frac{\ln(1+t)}{t} \right] \cdot \frac{t - \frac{t^2}{2}}{t^3} \\
 &\xrightarrow{L'} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{2 - 2t + \frac{2}{1+t}}{2} \cdot \frac{1-t - \frac{1}{1+t}}{3t^2} = 2 \times \left(-\frac{1}{3} \right) = -\frac{2}{3}.
 \end{aligned}$$

法二: 对 $\ln \left(1 + \frac{1}{x} \right)$, $x \rightarrow \infty$ 进行 Taylor 展开, 有

$$\begin{aligned}
 I &= \lim_{x \rightarrow \infty} \left[\left(x - \frac{1}{2} \right)^2 - x^4 \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{2x^2} + \frac{1}{3x^3} + o(x^{-4}) \right)^2 \right] = \lim_{x \rightarrow \infty} \left[\left(x - \frac{1}{2} \right)^2 - x^2 \left(1 - \frac{1}{2x} + \frac{1}{3x^2} + o(x^{-3}) \right)^2 \right] \\
 &= \lim_{x \rightarrow \infty} \left[\left(x - \frac{1}{2} \right)^2 - \left(x - \frac{1}{2} + \frac{1}{3x} \right)^2 \right] = \lim_{x \rightarrow \infty} \left(x - \frac{1}{2} + x - \frac{1}{2} + \frac{1}{3x} \right) \left(x - \frac{1}{2} - x + \frac{1}{2} - \frac{1}{3x} \right) \\
 &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{-6x^2 + 3x - 1}{9x^2} = -\frac{2}{3}.
 \end{aligned}$$

例 1.3.47. 计算极限 $\lim_{x \rightarrow 0} \left[\frac{1}{x \ln(1+x)} - \frac{2+x}{2x^2} \right]$.

对 $\ln(1+x)$ 进行 Taylor 展开, 有 $\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + o(x^4)$, 于是

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \lim_{x \rightarrow 0} \left[\frac{1}{x \left(x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} \right)} - \frac{2+x}{2x^2} \right] = \lim_{x \rightarrow 0} \left[\frac{12}{2x^2(6-3x+2x^2)} - \frac{2+x}{2x^2} \right] \\ &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{12 - (2+x)(6-3x+2x^2)}{2x^2(6-3x+2x^2)} = -\lim_{x \rightarrow 0} \frac{2x+1}{2(6-3x+2x^2)} = -\frac{1}{12}. \end{aligned}$$

例 1.3.48. 设函数 $f(x)$ 在区间 $(0, +\infty)$ 上三阶可导, 满足

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f'(x)f'''(x)}{[f''(x)]^2} = a \neq 1, f^{(k)}(x) > 0, k = 0, 1, 2$$

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

注意到

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

于是 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{d}{dx} \left(\frac{f'(x)}{f''(x)} \right) = 1 - a$, 并且

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

利用 L'Hospital 法则, 得

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f'(x)}{xf''(x)} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{f''(x)}{x}}{\frac{f''(x)}{x}} \stackrel{L'}{=} \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{d}{dx} \left(\frac{f'(x)}{f''(x)} \right) = 1 - a$$

注意到 $\frac{f'(x)}{xf''(x)} > 0 (0 < x < +\infty)$, 故由极限的保号性知, $1 - a \geq 0$, 但 $a \neq 1$, 所以 $a < 1$; 另一方面, 对 $\forall x \in (0, +\infty)$ 及 $\forall h > 0$, 由 Taylor 公式, 得

$$f(x+h) = f(x) + f'(x)h + \frac{1}{2!}f''(\xi)h^2 > f(x) + f'(x)h \quad \xi \in (x, x+h)$$

所以 $\lim_{h \rightarrow \infty} f(x+h) = +\infty$, 即 $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = +\infty$, 于是利用 L'Hospital 法则, 得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{xf'(x)}{f(x)} \stackrel{L'}{=} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f'(x) + xf''(x)}{f'(x)} = 1 + \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{xf''(x)}{f'(x)} = 1 + \frac{1}{1-a} = \frac{2-a}{1-a}$$

因此

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

Lagrange 中值定理

定理 1.3.14 (Lagrange 中值定理). 若 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 则 $\forall x_1, x_2 \in [a, b], \exists \xi \in (x_1, x_2)$, 使得

$$f(x_2) - f(x_1) = f'(\xi) \cdot (x_2 - x_1).$$

例 1.3.49. 计算 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos x - \cos[2 \ln(1+x)]}{x^2}$.

错解. 由 Lagrange 中值定理, $\cos x - \cos[2 \ln(1+x)] = [2 \ln(1+x) - x] \sin \xi$, 其中 ξ 介于 x 与 $2 \ln(1+x)$ 之间, 因此

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos x - \cos[2 \ln(1+x)]}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{[2 \ln(1+x) - x] \sin \xi}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{[2x + o(x) - x]}{x} = 1$$

错因: 当 $x \rightarrow 0^+$, $x < \xi < 2 \ln(1+x) \Rightarrow 1 - \frac{x}{x} < \frac{\xi}{x} < \frac{2 \ln(1+x)}{x} \rightarrow 2$, 左右极限值不相等, 故不能由夹逼准则得 $\sin \xi \sim \xi$,

同理可得 $x \rightarrow 0^-$ 情况相同.

当 $x \rightarrow 0$ 时, $\cos[2 \ln(1+x)] \rightarrow 1$, 于是原式可改写为

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left[\frac{\cos x - 1}{x^2} + \frac{1 - \cos(2 \ln(1+x))}{x^2} \right] = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos x - 1}{x^2} + \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos(2 \ln(1+x))}{x^2} = -\frac{1}{2} + 2 = \frac{3}{2}.$$

例 1.3.50. 已知 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^\alpha}{n^\beta - (n-1)^\beta} = 2023$, 求 α, β 的值.

A. $\alpha = -\frac{2022}{2023}, \beta = \frac{1}{2023}$.

B. $\alpha = -\frac{2023}{2022}, \beta = \frac{1}{2022}$.

C. $\alpha = -\frac{2022}{2023}, \beta = \frac{1}{2022}$.

D. $\alpha = -\frac{2023}{2022}, \beta = \frac{1}{2023}$.

设 $f(x) = x^\beta$, 那么由 Lagrange 中值定理, 有

$$f(n) - f(n-1) = \beta \xi_n^{\beta-1}$$

那么极限式改写为 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^\alpha}{\beta \xi_n^{\beta-1}} = 2023$, 且 $\frac{n}{\xi_n} \rightarrow 1 (n \rightarrow \infty)$, 于是 $\begin{cases} \frac{1}{\beta} = 2023 \\ \alpha = \beta - 1 \end{cases}$ 解得选 A.

例 1.3.51. 用 Lagrange 中值定理求下列极限值.

$$\left| \begin{array}{l} (1) \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\sqrt[6]{x^6 + x^5} - \sqrt[6]{x^6 - x^5} \right). \\ (4) \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{1}{x^2} - \cot^2 x \right). \end{array} \quad \begin{array}{l} (2) \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\cos \frac{\theta}{n} \right)^n. \\ (5) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt{1-x^2} - \sqrt{1-4x^2}}{x^2}. \end{array} \quad \begin{array}{l} (3) \lim_{n \rightarrow \infty} \tan^n \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{n} \right). \\ (6) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^{x^2} - e^{2-2 \cos x}}{x^4}. \end{array} \right.$$

(1) 原式 = $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{6} \xi^{-\frac{5}{6}} \cdot (2x^5) = \frac{1}{3}, \xi \rightarrow x^6$.

(2) 原式 = $\exp \lim_{n \rightarrow \infty} n \ln \cos \frac{\theta}{n} = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\cos \frac{\theta}{n} - 1 \right) = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} n \cdot \frac{\theta}{n} \cdot (-\sin \xi) = e^0 = 1, \xi \rightarrow 0$.

(3) 原式 = $e^{\lim_{n \rightarrow \infty} n \ln \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{n} \right)} = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} n \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{n} \right) - 1 \right] = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \sec^2 \xi = e^2, \xi \rightarrow \frac{\pi}{4}$.

(4) 先用 Lagrange 中值定理, 再用 Taylor 展开.

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin^2 x - x^2 \cos^2 x}{x^2 \sin^2 x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2 \ln \sin x - 2 \ln(x \cos x)}{x^2} = 2 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x - x \cos x}{x^2 \cdot \xi} \\ &= 2 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \frac{x^3}{6} - x \left(1 - \frac{x^2}{2} \right) + o(x^3)}{x^2 \cdot \xi} = \frac{2}{3}, \xi \rightarrow x. \end{aligned}$$

(5) 原式 = $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{3x^2 \frac{1}{2\sqrt{\xi}}}{x^2} = \frac{3}{2}, \xi \rightarrow 1$.

(6) 原式 = $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x (x^2 - 2 + 2 \cos x)}{x^4} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 - 2 + 2 \left(1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + o(x^4) \right)}{x^4} = \frac{1}{12}, \xi \rightarrow 0$.

例 1.3.52. 设 $f(x)$ 在 $x = 0$ 二阶可微且 $f'(0) = 0, f''(0) = 1$, 计算极限 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(\ln(1+x))}{x^3}$.

显然 f 在 $x=0$ 邻域内一阶可微, 因此由 Lagrange 中值定理,

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(\ln(1+x))}{x^3} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{[x - \ln(1+x)]f'(\xi_x)}{x^3} = \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f'(\xi_x)}{x} = \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f'(\xi_x) - f'(0)}{\xi_x} \cdot \frac{\xi_x}{x} = \frac{1}{2} f''(0) = \frac{1}{2}$$

其中

$$\begin{aligned} 1 &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln(1+x)}{x} \leqslant \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\xi_x}{x} \leqslant \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x}{x} = 1 \\ 1 &= \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{x}{x} \leqslant \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{\xi_x}{x} \leqslant \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{\ln(1+x)}{x} = 1. \end{aligned}$$

例 1.3.53 (2011 数一). 求极限 $\lim_{x \rightarrow 0} \left[\frac{\ln(1+x)}{x} \right]^{\frac{1}{e^x-1}}$.

令 $y = \left[\frac{\ln(1+x)}{x} \right]^{\frac{1}{e^x-1}}$, 则 $\ln y = \frac{\ln(\ln(x+1)) - \ln x}{e^x - 1}$, 而

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \ln y = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln(\ln(x+1)) - \ln x}{e^x - 1} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln(\ln(x+1)) - \ln x}{x}$$

由 Lagrange 中值定理, 令 $f(x) = \ln x$ 那么 $f(1 + \ln x) - f(x) = \frac{\ln(1+x) - x}{\xi_x}$, 其中 ξ_x 介于 x 与 $\ln(1+x)$ 之间, 于是

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \ln y = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln(1+x) - x}{x \cdot \xi_x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{-\frac{1}{2}x^2}{x^2} = -\frac{1}{2}$$

当 $x < 0$ 时, $\ln y = \frac{\ln[-\ln(1+x)] - \ln(-x)}{e^x - 1}$ 同样可得 $\lim_{x \rightarrow 0^-} \ln y = -\frac{1}{2}$, 于是原极限为 $e^{-\frac{1}{2}}$.

例 1.3.54 (第三届数学竞赛决赛). 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^1 \frac{n}{n^2 x^2 + 1} e^{x^2} dx = \frac{\pi}{2}$.

对函数 $f(x) = e^{x^2}$ 在区间 $[0, x]$ ($0 \leqslant x \leqslant 1$) 上应用拉格朗日中值定理, $\exists \xi \in (0, x)$, 使得 $f(x) - f(0) = f'(\xi)x$, 即

$$e^{x^2} - 1 = 2\xi e^{\xi^2} x \Rightarrow 1 \leqslant e^{x^2} = 1 + 2\xi e^{\xi^2} x \leqslant 1 + 2ex$$

于是

$$\frac{n}{n^2 x^2 + 1} \leqslant \frac{n}{n^2 x^2 + 1} e^{x^2} \leqslant \frac{n}{n^2 x^2 + 1} + \frac{2ex}{n^2 x^2 + 1}$$

应用定积分的保号性, 有

$$\int_0^1 \frac{n}{n^2 x^2 + 1} e^{x^2} dx \geqslant \int_0^1 \frac{n}{n^2 x^2 + 1} dx = \arctan nx \Big|_0^1 = \arctan n$$

$$\int_0^1 \frac{n}{n^2 x^2 + 1} e^{x^2} dx \leqslant \int_0^1 \left(\frac{n}{n^2 x^2 + 1} + \frac{2ex}{n^2 x^2 + 1} \right) dx = \arctan nx \Big|_0^1 + \frac{e}{n} \ln(1 + n^2) \Big|_0^1 = \arctan n + \frac{e}{n} \ln(1 + n^2)$$

又因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} \arctan n = \frac{\pi}{2}$, $\lim_{n \rightarrow \infty} \left[\arctan n + \frac{e}{n} \ln(1 + n^2) \right] = \frac{\pi}{2}$, 故由夹逼准则, 等式成立.

例 1.3.55. 计算极限 $\lim_{x \rightarrow +\infty} (x+1)[\ln(x^2+x) - 2\ln(1+x)]$.

法一: 利用重要极限 $\lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x = e$, 改写极限式, 有

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

法二: 利用 Lagrange 中值定理: 设 $f(x) = \ln x$, 则 $\exists \xi$ 介于 x^2+x 与 x^2+2x+1 , 使得

$$\frac{f(x^2+x) - f(x^2+2x+1)}{(x^2+x) - (x^2+2x+1)} = f'(\xi) = \frac{1}{\xi}, \xi \rightarrow \infty$$

即 $\ln(x^2 + x) - \ln(x^2 + 2x + 1) = -\frac{1}{\xi}(x + 1)$, 所以

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

因为 ξ 介于 $x^2 + x$ 与 $x^2 + 2x + 1$, 由夹逼准则可知:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} (x + 1) [\ln(x^2 + x) - 2 \ln(1 + x)] = -1$$

法三: 由 L'Hospital 法则可知: 注意到

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} [\ln(x^2 + x) - 2 \ln(1 + x)] = 0, \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x + 1} = 0$$

记 $I = \lim_{x \rightarrow +\infty} (x + 1) [\ln(x^2 + x) - 2 \ln(1 + x)]$, 则

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

所以 $\lim_{x \rightarrow +\infty} (x + 1) [\ln(x^2 + x) - 2 \ln(1 + x)] = -1$.

法四: $\ln(x^2 + x)$ 和 $\ln(1 + x)$ 在 $x \rightarrow +\infty$ 的渐近展开式. 注意到:

$$\ln(x^2 + x) = 2 \ln x + \frac{1}{x} + o\left(\frac{1}{x}\right), \ln(1 + x) = \ln x + \frac{1}{x} + o\left(\frac{1}{x}\right)$$

所以

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

例 1.3.56. 求极限 $I = \lim_{x \rightarrow \infty} x^2 \left[e^{(1+\frac{1}{x})^x} - \left(1 + \frac{1}{x} \right)^{ex} \right]$.

作变量代换: $t = \frac{1}{x}$, 则有

$$I = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{e^{(1+t)^{t^{-1}}} - (1+t)^{\frac{e}{t}}}{t^2} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{e^{(1+t)^{t^{-1}}} - e^{\frac{e \ln(1+t)}{t}}}{t^2}$$

令 $f(t) = (1+t)^{t^{-1}}$, $g(t) = \frac{e \ln(1+t)}{t}$, 则 $\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{t \rightarrow 0} g(t) = 0$, 由 Lagrange 中值定理, 得

$$e^{f(t)} - e^{g(t)} = e^\xi (f(t) - g(t))$$

其中 ξ 介于 $f(t)$ 与 $g(t)$ 之间, 当 $t \rightarrow 0$ 时, $\xi \rightarrow e$, 所以 $e^{f(t)} - e^{g(t)} \sim e^e [f(t) - g(t)]$, 故

$$I = e^e \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(t) - g(t)}{t^2} = e^{e+1} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\frac{e^{\frac{\ln(1+t)}{t}-1}}{t} - \frac{\ln(1+t)}{t}}{t^2}$$

记 $\alpha(t) = \frac{\ln(1+t)}{t} - 1$ ($t \rightarrow 0, \alpha(t) \rightarrow 0$), 由 $e^{\alpha(t)}$ 的 Taylor 展开, 得

$$e^{\alpha(t)} = 1 + \alpha(t) + \frac{1}{2!} \alpha^2(t) + o(\alpha^2(t)) = \frac{\ln(1+t)}{t} + \frac{1}{2} \left[\frac{\ln(1+t) - t}{t} \right]^2 + o(\alpha^2(t))$$

因此

$$I = e^{e+1} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{2} \cdot \frac{[\ln(1+t) - t]^2}{t^4} = \frac{1}{2} e^{e+1} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\left[-\frac{t^2}{2} + o(t^2) \right]^2}{t^4} = \frac{1}{8} e^{e+1}.$$

例 1.3.57. 求极限 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{(\sin x + e^{\tan x})^{\frac{1}{x}} - (\tan x + e^{\sin x})^{\frac{1}{x}}}{x^3}$

改写极限式, 有

$$\begin{aligned} I &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(\sin x + e^{\tan x})^{\frac{1}{x}} \cdot \frac{1}{x} [\ln(\sin x + e^{\tan x}) - \ln(\tan x + e^{\sin x})]}{x^3} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0} (\sin x + e^{\tan x})^{\frac{1}{x}} \cdot \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^{\tan x} - \tan x - (e^{\sin x} - \sin x)}{x^4} \\ &= \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \ln(\sin x + e^{\tan x}) \cdot \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(\tan x - \sin x) f'(\xi_x)}{x^4} \end{aligned}$$

其中

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \ln(\sin x + e^{\tan x}) = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} (\sin x + e^{\tan x} - 1) = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x + \tan x}{x} = e^2$$

ξ_x 介于 $\sin x$ 与 $\tan x$ 之间, 并且

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{(\tan x - \sin x) f'(\xi_x)}{x^4} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{2} x^3 f'(\xi_x)}{x^4} = \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f'(\xi_x)}{x} = \frac{1}{2}$$

这是因为 $f'(x) = e^x - 1 \rightarrow x$ ($x \rightarrow 0$), 以及当 $x \rightarrow 0^+$ 时,

$$0 \leftarrow \sin x < \xi_x < \tan x \rightarrow 0$$

当 $x \rightarrow 0^-$ 时,

$$0 \leftarrow \tan x < \xi_x < \sin x \rightarrow 0$$

于是 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f'(\xi_x)}{x} = 1$, 综上原式 = $\frac{e^2}{2}$.

例 1.3.58. 设 $f(x)$ 在 $x = a$ 的某邻域内有三阶连续导数, 且 $f'(a) \neq 0$, 令

$$\varphi(x) = \left[\frac{f'(x) + f'(a)}{2f(x) - 2f(a)} \right]^2 - \left(\frac{1}{x-a} \right)^2$$

计算极限 $\lim_{x \rightarrow a} \varphi(x)$.

考虑 $f(x)$ 在 $x = a$ 处的 Taylor 展开,

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{1}{2!} f''(a)(x-a)^2 + \frac{1}{3!} f'''(\xi)(x-a)^3$$

于是

$$2f(x) - 2f(a) = 2f'(a)(x-a) + f''(a)(x-a)^2 + \frac{1}{3} f'''(\xi)(x-a)^3$$

其中 ξ 介于 x 与 a 之间, 同理, 考虑 $f'(x)$ 在 $x = a$ 处的 Taylor 展开,

$$f'(x) = f'(a) + f''(a)(x-a) + \frac{1}{2!} f'''(\eta)(x-a)^2$$

于是

$$f'(x) + f'(a) = 2f'(a) + f''(a)(x-a) + \frac{1}{2} f'''(\eta)(x-a)^2$$

其中 η 介于 x 与 a 之间, 将两式代入极限式, 并通分, 于是分子为

$$\begin{aligned} &(x-a)^2 \left[2f'(a) + f''(a)(x-a) + \frac{f'''(\eta)}{2}(x-a)^2 \right]^2 - \left[2f'(a)(x-a) + f''(a)(x-a)^2 + \frac{f'''(\xi)}{3}(x-a)^3 \right]^2 \\ &= f'(a) \left[2f'''(\eta) - \frac{4}{3} f'''(\xi) \right] (x-a)^4 + o((x-a)^4) \end{aligned}$$

分母为

$$\left[2f'(a) + f''(a)(x-a) + \frac{f'''(\xi)}{3}(x-a)^2 \right]^2 (x-a)^4 = 4[f'(a)]^2 (x-a)^4 + o((x-a)^4)$$

分式求 $x \rightarrow a$ 的极限, 都只考虑分子、分母中的最低次幂, 并且都为 $(x-a)^4$, 所以

$$\lim_{x \rightarrow a} \varphi(x) = \lim_{x \rightarrow a} \frac{2f'''(\eta) - \frac{4}{3} f'''(\xi)}{4f'(a)}$$

由于 $f(x)$ 在 $x = a$ 的某个邻域内有三阶连续导数, 故 $f'''(\eta) = f'''(\xi) = f'''(a)$, 于是原极限为 $\frac{f'''(a)}{6f'(a)}$.

利用积分等价求极限

定理 1.3.15 (等价积分). 设 f 与 g 连续, 当 $x \rightarrow 0$ 时, $\alpha(x), \beta(x)$ 均为无穷小, $\alpha(x) \sim \beta(x)$ 且 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f}{g} = 1$, 则

$$\int_0^{\alpha(x)} f dt \sim \int_0^{\beta(x)} g dt.$$

例 1.3.59. 把 $x \rightarrow 0^+$ 时的无穷小量

$$\alpha = \int_0^x \cos t^2 dt, \beta = \int_0^{x^2} \tan \sqrt{t} dt, \gamma = \int_0^{\sqrt{x}} \sin t^3 dt$$

排列起来, 使排列在后的是前一项的高阶无穷小量, 则正确的排列次序为

- A. α, β, γ B. α, γ, β C. β, α, γ D. β, γ, α

由定理 1.3.15 可知, 当 $x \rightarrow 0^+$ 时, 有

$$\alpha \sim \int_0^x dt = x, \beta \sim \int_0^{x^2} \sqrt{t} dt = \frac{2}{3} x^3, \gamma \sim \int_0^{x^{\frac{1}{2}}} t^3 dt = \frac{1}{4} x^2$$

因此 γ 是 α 的高阶无穷小量, β 是 γ, α 的高阶无穷小量, 所以有排列 α, γ, β , 选 B.

例 1.3.60. 求下列极限值.

$$(1) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos(\sin x) - \cos x}{[x - \ln(x + \sqrt{1+x^2})] \int_0^{\ln(1+x)} \cos t^2 dt}. \quad (2) \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\sqrt{2(\sec x - 1)} - \sqrt[3]{6(x - \sin x)}}{\int_0^{x^2} \arctan(e^{\sqrt{t}} - 1) dt}$$

(1) 分子: $\cos(\sin x) - \cos x = (x - \sin x) \sin \xi$, 其中 ξ 介于 $\sin x$ 与 x 之间, 当 $x \rightarrow 0^+$ 时, 有 $\sin x < \xi < x$, 那么

$$1 \leftarrow \frac{\sin x}{x} < \frac{\xi}{x} < \frac{x}{x} \rightarrow 1 (x \rightarrow 0)$$

即 $\xi \sim x$; 当 $x \rightarrow 0^-$, 同理可得 $\xi \sim x$, 于是 $\xi \sim x (x \rightarrow 0)$, 则

$$(x - \sin x) \sin \xi \sim (x - \sin x)x \sim \frac{1}{6}x^4$$

分母: $\int_0^{\ln(1+x)} \cos t^2 dt \sim \int_0^x dt = x (x \rightarrow 0)$, 并且

$$x - \ln(x + \sqrt{1+x^2}) \sim e^x [\ln e^x - \ln(x + \sqrt{1+x^2})] \sim e^x - x - \sqrt{1+x^2}$$

又

$$e^x = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{6}x^3 + o(x^4), (1+x^2)^{\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2}x^2 + o(x^3)$$

那么 $e^x - x - \sqrt{1+x^2} = \frac{1}{6}x^3 + o(x^4)$, 因此原式 = $\frac{\frac{1}{6}x^4}{\frac{1}{6}x^3 \cdot x} = 1$.

(2) 分母: $\int_0^{x^2} \arctan(e^{\sqrt{t}} - 1) dt \sim \int_0^{x^2} (e^{\sqrt{t}} - 1) dt \sim \int_0^{x^2} \sqrt{t} dt \rightarrow \frac{2}{3}x^3 (x \rightarrow 0^+)$, 则考虑将分子展开到 x^3 阶, 故

$$\sqrt{2(\sec x - 1)} - \sqrt[3]{6(x - \sin x)} \sim \sqrt{2(\sec x - 1)} \left[\frac{1}{2} \ln 2(\sec x - 1) - \frac{1}{3} \ln 6(x - \sin x) \right]$$

$$\sim x \left[\frac{1}{2} \ln 2(\sec x - 1) - \frac{1}{3} \ln 6(x - \sin x) \right] (x \rightarrow 0^+)$$

那么中括号中须展开到 x^2 阶, 不妨先减去 $\frac{1}{2} \ln x^2$, 再加 $\frac{1}{2} \ln x^2$ 即 $\left(\frac{1}{6} \ln x^6 \right)$, 则前项

$$\frac{1}{2} \ln 2(\sec x - 1) - \frac{1}{2} \ln x^2 = \frac{1}{2} \ln \frac{2(\sec x - 1)}{x^2} \sim \frac{1}{2} \left[\frac{2(\sec x - 1)}{x^2} - 1 \right]$$

又因为

$$\sec x = 1 + \frac{1}{2!} x^2 + \frac{5}{4!} x^4 + o(x^5)$$

则上式化为 $\frac{5}{4!} x^2 (x \rightarrow 0^+)$, 后项有

$$\frac{1}{6} \ln x^6 - \frac{1}{3} \ln 6(x - \sin x) = \frac{1}{6} \ln x^6 - \frac{1}{6} \ln 36(x - \sin x)^2 = -\frac{1}{6} \ln \frac{36(x - \sin x)^2}{x^6}$$

其中

$$\ln \frac{36(x - \sin x)^2}{x^6} \sim \frac{36(x - \sin x)^2 - x^6}{x^6} = \frac{[6(x - \sin x) + x^3][6(x - \sin x) - x^3]}{x^6} (x \rightarrow 0^+)$$

那么上式分子则要展开到 x^8 阶, 于是

$$6(x - \sin x) + x^3 = 6 \left(\frac{1}{3!} x^3 + o(x^4) + x^3 \right) = 2x^3$$

$$6(x - \sin x) - x^3 = 6 \left(\frac{1}{3!} x^3 - \frac{1}{5!} x^5 + o(x^6) \right) - x^3 = -\frac{6}{5!} x^5 (x \rightarrow 0^+)$$

故 $-\frac{1}{6} \ln \frac{36(x - \sin x)^2}{x^6} \sim -\frac{1}{6} \cdot \frac{2x^3 \cdot \left(-\frac{6}{5!} x^5 \right)}{x^6} \sim \frac{2}{5!} x^2 (x \rightarrow 0^+)$, 综上原极限

$$I = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x \left(\frac{5}{4!} x^2 + \frac{2}{5!} x^2 \right)}{\frac{2}{3} x^3} = \left(\frac{5}{4!} + \frac{2}{5!} \right) \cdot \frac{3}{2} = \frac{27}{80}.$$

利用积分定义求极限

定理 1.3.16 (定积分与极限式). 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上可积, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f \left(a + \frac{b-a}{n} i \right) \cdot \frac{b-a}{n} = \int_a^b f(x) dx.$$

引理 1.3.2. $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n]{n!}}{n} = \frac{1}{e}$.

证 原式 $= \exp \lim_{n \rightarrow \infty} (\ln \sqrt[n]{n!} - \ln n) = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \ln \frac{k}{n} = e^{\int_0^1 \ln x dx} = e^{-1}$.

例 1.3.61. 求下列极限值.

$(1) \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \left(\sqrt[3]{1 + \frac{i}{n^2}} - 1 \right).$	$(2) \lim_{n \rightarrow \infty} \sin \frac{\pi}{2n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + \cos \frac{i\pi}{2n}}.$	$(3) \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{i \cos \frac{i}{n}}{n^2 + i}.$
$(4) \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\frac{(2n)!}{(n!)^2}}.$	$(5) \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\sqrt[n+1]{(n+1)!} - \sqrt[n]{n!} \right].$	$(6) \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{2^{\frac{k}{n}}}{n + \frac{k}{n}}.$

$$(1) \text{ 原式} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{1}{3} \frac{i}{n^2} = \frac{1}{3} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{i}{n} = \frac{1}{3} \int_0^1 x dx = \frac{1}{6}.$$

$$(2) \text{ 原式} = \frac{\pi}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + \cos \frac{\pi}{2} \cdot \frac{i}{n}} = \frac{\pi}{2} \int_0^1 \frac{dx}{1 + \cos \frac{\pi}{2} x} \xrightarrow{\frac{\pi}{2} x=t} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dt}{1 + \cos t} = \frac{1}{2}.$$

$$(3) \text{ 原式} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\frac{i}{n} \cos \frac{i}{n}}{1 + \frac{i}{n^2}} := \lim_{n \rightarrow \infty} f$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\frac{i}{n} \cos \frac{i}{n}}{1 + \frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2}{n^2 + 1} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{i}{n} \cos \frac{i}{n} = \int_0^1 x \cos x dx = \sin 1 + \cos 1 - 1$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\frac{i}{n} \cos \frac{i}{n}}{1 + \frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+1} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{i}{n} \cos \frac{i}{n} = \sin 1 + \cos 1 - 1$$

由夹逼准则得, 原式 $=\sin 1 + \cos 1 - 1$.

$$(4) \text{ 原式} = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \ln \frac{(2n)!}{(n!)^2}, \text{ 其中}$$

$$\ln \frac{(2n)!}{(n!)^2} = \ln(2n)! - 2 \ln(n!) = \sum_{i=1}^{2n} \ln i - 2 \sum_{i=1}^n \ln i = \sum_{i=1}^n \ln \frac{n+i}{i} = \sum_{i=1}^n \ln \frac{1 + \frac{i}{n}}{\frac{i}{n}}$$

$$\text{故, 原式化为 } \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{1 + \frac{i}{n}}{\frac{i}{n}} = \exp \int_0^1 \ln \frac{1+x}{x} dx = 4, \text{ 其中}$$

$$\int_0^1 \ln \frac{1+x}{x} dx = \int_0^1 \left(1 + \frac{1}{x}\right) dx = x \ln \left(1 + \frac{1}{x}\right) + \int_0^1 \frac{dx}{1+x} = 2 \ln 2.$$

$$(5) \text{ 注意到 } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n]{n!}}{n} = \frac{1}{e}, \text{ 则有}$$

$$\begin{aligned} I &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n+1]{(n+1)!}}{n+1} \left[\frac{\ln(n+1)!}{n+1} - \frac{\ln n!}{n} \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n+1]{(n+1)!}}{n+1} \left(\sum_{k=1}^{n+1} \ln k - \frac{n+1}{n} \sum_{k=1}^n \ln k \right) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n+1]{(n+1)!}}{n+1} \left[\ln(n+1) - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \ln k \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n+1]{(n+1)!}}{n+1} \left(-\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \ln \frac{k}{n+1} \right) \end{aligned}$$

$$\text{其中, } \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sqrt[n+1]{(n+1)!}}{n+1} = \frac{1}{e}, \lim_{n \rightarrow +\infty} -\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \ln \frac{k}{n+1} = -\int_0^1 \ln x dx = 1, \text{ 综上, 原式} = \frac{1}{e}.$$

$$(6) \text{ 注意到有 } \frac{\frac{k}{n}}{n+1} < \frac{\frac{2}{n}}{n+\frac{1}{k}} < \frac{\frac{2}{n}}{n}, \text{ 于是}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{\frac{2}{n}}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n 2^{\frac{k}{n}} = \int_0^1 2^x dx = \frac{1}{\ln 2}$$

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

由夹逼准则得原极限为 $\frac{1}{\ln 2}$.

$$\text{例 1.3.62. 求 } \lim_{x \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n k \ln(n+k) - \frac{n+1}{2n} \ln n \right].$$

$$\text{原式} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \left[\sum_{k=1}^n \frac{k}{n} \ln(n+k) - \sum_{k=1}^n \frac{k}{n} \ln n \right] = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{k}{n} \ln \left(1 + \frac{k}{n} \right) = \int_0^1 x \ln(1+x) dx, \text{ 其中}$$

$$\int_0^1 x \ln(1+x) dx = \frac{1}{2} \int_0^1 \ln(1+x) dx^2 = \frac{1}{2} \left[x^2 \ln(1+x) \Big|_0^1 - \int_0^1 \frac{x^2}{1+x} dx \right] = \frac{1}{4}.$$

例 1.3.63. 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^4} \prod_{i=1}^{2n} (n^2 + i^2)^{\frac{1}{n}}$.

令 $I_n = \frac{1}{n^4} \prod_{i=1}^{2n} (n^2 + i^2)^{\frac{1}{n}}$, 则

$$\ln I_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{2n} \ln(n^2 + i^2) - \ln n^4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{2n} \left[\ln \left(1 + \left(\frac{i}{n} \right)^2 \right) + 2 \ln n \right] - 4 \ln n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{2n} \ln \left(1 + \left(\frac{i}{n} \right)^2 \right)$$

$$\text{原式} = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} I_n = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{2n} \ln \left(1 + \left(\frac{i}{n} \right)^2 \right) = \exp \int_0^2 \ln(1+x^2) dx$$

$$= \exp [x \ln(1+x^2) - 2x + 2 \arctan x]_0^2 = 25 \exp(2 \arctan 2 - 4).$$

例 1.3.64. 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ n \frac{\left(\sum_{k=1}^n \sqrt{k} \right)^2}{\left(\sum_{k=1}^n \sqrt[3]{k} \right)^3} + \sum_{k=1}^{n-1} \left[\ln \left(1 + \frac{1}{n+k} \right) \sin \ln \left(1 + \frac{k}{n} \right) \right] \right\}.$

将待求极限分为两部分,

$$I_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} n \frac{\left(\sum_{k=1}^n \sqrt{k} \right)^2}{\left(\sum_{k=1}^n \sqrt[3]{k} \right)^3} = \lim_{n \rightarrow \infty} n \frac{\left(\frac{1}{n \cdot \sqrt[3]{n}} \right)^3 \left(\frac{1}{n \sqrt{n}} \sum_{k=1}^n \sqrt{k} \right)^2}{\left(\frac{1}{n \sqrt{n}} \right)^2 \left(\frac{1}{n \sqrt[3]{n}} \sum_{k=1}^n \sqrt[3]{k} \right)^3} = \lim_{n \rightarrow \infty} n \frac{\frac{1}{n^3 n} \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt{\frac{k}{n}} \right)^2}{\frac{1}{n^2 n} \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt[3]{\frac{k}{n}} \right)^3}$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt{\frac{k}{n}} \right)^2}{\left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt[3]{\frac{k}{n}} \right)^3} = \frac{\left(\int_0^1 \sqrt{x} dx \right)^2}{\left(\int_0^1 \sqrt[3]{x} dx \right)^3} = \frac{\left(\frac{2}{3} \right)^2}{\left(\frac{3}{4} \right)^3} = \frac{256}{243}$$

$$I_2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \left[\ln \left(1 + \frac{1}{n+k} \right) \sin \ln \left(1 + \frac{k}{n} \right) - \ln \left(1 + \frac{1}{2n} \right) \sin \ln 2 \right]$$

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

$$= - \int_0^1 d(\cos \ln(1+x)) = 1 - \cos \ln 2$$

故原极限为 $\frac{499}{243} - \cos \ln 2$.

推论 1.3.7. $\lim_{n \rightarrow \infty} n^{j-i} \frac{\left(\sum_{k=1}^n \sqrt[i]{k} \right)^i}{\left(\sum_{k=1}^n \sqrt[j]{k} \right)^j} = \lim_{n \rightarrow \infty} n^{j-i} \frac{\left(\sum_{k=1}^n \sqrt[i]{\frac{k}{n} \cdot \sqrt[j]{n}} \right)^i}{\left(\sum_{k=1}^n \sqrt[j]{\frac{k}{n} \cdot \sqrt[i]{n}} \right)^j} = \frac{\left(\frac{i}{i+1} \right)^i}{\left(\frac{j}{j+1} \right)^j}.$

例 1.3.65. 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n]{2}-1}{\sqrt[2n]{2n+1}} \left(\int_1^{\frac{1}{2n}} e^{-y^2} dy + \int_1^{\frac{3}{2n}} e^{-y^2} dy + \cdots + \int_1^{\frac{2n-1}{2n}} e^{-y^2} dy \right).$

$$\sqrt[n]{2} - 1 = 2^{\frac{1}{n}} - 1 = e^{\frac{1}{n} \ln 2} - 1 \sim \frac{1}{n} \ln 2 \quad (n \rightarrow \infty), \text{ 且 } \sqrt[n]{2n+1} \rightarrow 1 \quad (n \rightarrow \infty),$$

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \ln 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \int_1^{2k-1} e^{-y^2} dy = \ln 2 \int_0^1 dx \int_0^x e^{-y^2} dy \\ &= -\ln 2 \int_0^1 dy \int_0^y e^{-y^2} dx = \frac{\ln 2}{2} \int_0^1 e^{-y^2} d(-y^2) = \frac{\ln 2}{2} (e^{-1} - 1). \end{aligned}$$

定理 1.3.17 (不等分积分与极限式). 对于 $\int_0^1 f(x)dx = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(\xi_i)(x_i - x_{i-1})$, 当 $i = 1$ 时, x_{i-1} 值为区间左端点; 当 $i = n$ 时, x_i 值为区间右端点.

例 1.3.66. 计算极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(2^{\frac{1}{n}} - 1\right) \sum_{i=0}^{n-1} 2^{\frac{i}{n}} \sin 2^{\frac{2i+1}{2n}}$.

原式等于 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^{n-1} \left(2^{\frac{i+1}{n}} - 2^{\frac{i}{n}}\right) \sin 2^{\frac{2i+1}{2n}}$, 可以看出函数 $\sin x$ 在 $[1, 2]$ 上按照下列方式划分

$$1 = 2^{\frac{0}{n}} < 2^{\frac{1}{n}} < 2^{\frac{2}{n}} < \cdots < 2^{\frac{n}{n}} = 2$$

其中 $\Delta x_i = 2^{\frac{i+1}{n}} - 2^{\frac{i}{n}}$, $\xi_i = 2^{\frac{2i+1}{2n}} \in \left[2^{\frac{i}{n}}, 2^{\frac{i+1}{n}}\right]$, 故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(2^{\frac{1}{n}} - 1\right) \sum_{i=0}^{n-1} 2^{\frac{i}{n}} \sin 2^{\frac{2i+1}{2n}} = \int_1^2 \sin x dx = \cos 2 - \cos 1.$$

利用收敛级数通项趋向零求极限

利用级数收敛的必要条件是求极限为 0 的数列极限的方法之一.

例 1.3.67. 求下列极限值

$$(1) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{5^n \cdot n!}{(2n)^n}. \quad (2) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 \cdot 3 \cdots (2n-1)}{3 \cdot 6 \cdots (3n)}. \quad (3) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{11 \cdot 12 \cdots (n+10)}{2 \cdot 5 \cdots (3n-1)}.$$

$$(1) x_n = \frac{5^n \cdot n!}{(2n)^n}, \frac{x_{n+1}}{x_n} = \frac{5^{n+1}(n+1)!}{(2n+2)^{n+1}} \cdot \frac{(2n)^n}{5^n n!} = \frac{5}{2} \left(\frac{n}{n+1}\right)^n = \frac{5}{2} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n} \rightarrow \frac{5}{2e} < 1, n \rightarrow \infty, \text{ 故正项级数}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{5^n n!}{(2n)^n} \text{ 收敛, 从而通项 } x_n \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty).$$

$$(2) x_n = \frac{1 \cdot 3 \cdots (2n-1)}{3 \cdot 6 \cdots (3n)}, \frac{x_{n+1}}{x_n} = \frac{2n+1}{3n+3} \rightarrow \frac{2}{3} < 1 \quad (n \rightarrow \infty), \text{ 故正项级数 } \frac{1 \cdot 3 \cdots (2n-1)}{3 \cdot 6 \cdots (3n)} \text{ 收敛, 从而通项 } x_n \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty).$$

$$(3) x_n = \frac{11 \cdot 12 \cdots (n+10)}{2 \cdot 5 \cdots (3n-1)}, \frac{x_{n+1}}{x_n} = \frac{n+11}{3n+2} \rightarrow \frac{1}{3} < 1 \quad (n \rightarrow \infty), \text{ 故正项级数 } \frac{11 \cdot 12 \cdots (n+10)}{2 \cdot 5 \cdots (3n-1)} \text{ 收敛, 从而通项 } x_n \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty).$$

利用导数的定义

如果所求极限可凑成某个可导函数的增量, 那么可利用导数的定义来求得该极限, 这种方法多用于求抽象函数的不定式极限.

例 1.3.68. 若 $f(1) = 0$, $f'(1)$ 存在, 求极限 $I = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(\sin^2 x + \cos x) \cdot \tan 3x}{(e^{x^2} - 1) \cdot \sin x}$.

考虑导数的定义，有

$$\begin{aligned} I &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{3f(\sin^2 x + \cos x)}{x^2} = 3 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(\sin^2 x + \cos x) - f(1)}{\sin^2 x + \cos x - 1} \cdot \frac{\sin^2 x + \cos x - 1}{x^2} \\ &= 3f'(1) \cdot \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\sin^2 x}{x^2} - \frac{\frac{1}{2}x^2}{x^2} \right) = \frac{3}{2}f'(1). \end{aligned}$$

例 1.3.69. 求极限 $I = \lim_{x \rightarrow 3} \frac{\sqrt{x^3 + 9} \cdot \sqrt[3]{2x^2 - 17} - 16}{4 - \sqrt{x^3 - 23} \cdot \sqrt[3]{3x^2 - 19}}.$

记 $f(x) = \sqrt{x^3 + 9} \cdot \sqrt[3]{2x^2 - 17}$, $g(x) = \sqrt{x^3 - 23} \cdot \sqrt[3]{3x^2 - 19}$, 则 $f(3) = 6$, $g(3) = 4$, 于是

$$I = - \lim_{x \rightarrow 3} \frac{\frac{f(x) - f(3)}{x - 3}}{\frac{g(x) - g(3)}{x - 3}} = - \lim_{x \rightarrow 3} \frac{f'(x)}{g'(x)}$$

对 $f(x)$ 取对数并求导, 有

$$\frac{d}{dx}(\ln f(x)) = \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{2} \ln(x^3 + 9) + \frac{1}{3} \ln(2x^2 - 17) \right] = \frac{1}{2} \frac{3x^2}{x^3 + 9} + \frac{1}{3} \frac{4x}{2x^2 - 17}$$

所以 $f'(3) = \frac{105}{4}$, 同理可得 $g'(3) = \frac{33}{2}$, 于是 $I = -\frac{35}{22}$.

利用高等变形求极限

例 1.3.70. 证明: $\lim_{x \rightarrow +\infty} \left[\sqrt[n]{(x + \alpha_1)(x + \alpha_2) + \dots + (x + \alpha_n)} - x \right] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i$.

证 先证: $A^n - B^n = (A - B) \sum_{i=1}^n A^{i-1} B^{n-i}$, 过程如下:

引理 1.3.3. $A^n - 1 = (A - 1) \sum_{i=1}^n A^{i-1}$. (证明略)

$$\begin{aligned} A^n - B^n &= B^n \left[\left(\frac{A}{B} \right)^n - 1 \right] = B^n \left(\frac{A}{B} - 1 \right) \sum_{i=1}^n \left(\frac{A}{B} \right)^{i-1} \\ &= (A - B) B^{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{A}{B} \right)^{i-1} = (A - B) \sum_{i=1}^n A^{i-1} B^{n-i} \end{aligned}$$

则有 $\prod_{i=1}^n (x + \alpha_i) - x^n = \left[\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (x + \alpha_i)} - x \right] \sum_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^n (x + \alpha_i)^{\frac{n-j}{n}} \right] x^{j-1}$, 故

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\prod_{i=1}^n (x + \alpha_i) - x}{\sum_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^n (x + \alpha_i)^{\frac{n-j}{n}} \right] x^{j-1}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^{n-1} \sum_{i=1}^n \alpha_i + \dots + \prod_{i=1}^n \alpha_i}{\sum_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^n (x + \alpha_i)^{\frac{n-j}{n}} \right] \cdot x^{j-1}} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i + o\left(\frac{1}{x}\right)}{\sum_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^n \left(1 + \frac{\alpha_i}{x}\right)^{\frac{n-j}{n}} \right]} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i. \end{aligned}$$

例 1.3.71. 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \prod_{m=1}^n \left(1 - \frac{1}{m} + \frac{5}{4m^2}\right)$.

由 Euler 乘积公式:

$$\sin \pi z = \pi z \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 - \frac{z^2}{n^2}\right), z \in \mathbb{C}$$

将 z 替换为 iz , 并且有 $\sin \alpha = \frac{e^{i\alpha} - e^{-i\alpha}}{2i}$, 得

$$\frac{\sin i\pi z}{i\pi z} = \frac{e^{\pi z} - e^{-\pi z}}{2\pi z} = \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 - \frac{z^2}{n^2}\right), z \in \mathbb{C} \quad (1)$$

取 $z = 1, 2$, 代入式 (1) 中, 得

$$\frac{e^\pi - e^{-\pi}}{2\pi} = \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{n^2}\right), \frac{e^{2\pi} - e^{-2\pi}}{4\pi} = \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{4}{n^2}\right) \quad (2)$$

记 $x_n = \prod_{m=1}^n \left(1 - \frac{1}{m} + \frac{5}{4m^2}\right) = \prod_{m=1}^n \frac{(2m-1)^2 + 4}{4m^2}$, 式 (2) 取极限得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{k=1}^{2n} \left(1 + \frac{4}{k^2}\right) = \frac{e^{2\pi} - e^{-2\pi}}{4\pi}, \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{k=1}^n \left(1 + \frac{1}{k^2}\right) = \frac{e^\pi - e^{-\pi}}{2\pi} \quad (3)$$

并且

$$\begin{aligned} \prod_{k=1}^{2n} \left(1 + \frac{4}{k^2}\right) &= \prod_{m=1}^n \left(1 + \frac{4}{4m^2}\right) \cdot \prod_{m=1}^n \left[1 + \frac{4}{(2m-1)^2}\right] \\ &= \prod_{m=1}^n \frac{4m^2 + 4}{4m^2} \cdot \prod_{m=1}^n \frac{(2m-1)^2 + 4}{(2m-1)^2} = \prod_{m=1}^n \frac{4(m^2+1)}{(2m-1)^2} \cdot \prod_{m=1}^n \frac{(2m-1)^2 + 4}{4m^2} \\ &= 4^n \prod_{m=1}^n \frac{m^2+1}{m^2} \cdot \prod_{m=1}^n \frac{m^2}{(2m-1)^2} \cdot x_n = \left(\prod_{m=1}^n \frac{m^2+1}{m^2}\right) \cdot \frac{4^{2n} (n!)^4}{((2n)!)^2} \cdot x_n \end{aligned}$$

由 Stirling 公式 $n! = \sqrt{2\pi n} n^n e^{-n} \left(1 + O\left(\frac{1}{n}\right)\right)$, 得

$$\frac{4^{2n} (n!)^4}{((2n)!)^2} = \pi n \left(1 + O\left(\frac{1}{n}\right)\right)$$

因此

$$\prod_{k=1}^{2n} \left(1 + \frac{4}{k^2}\right) = \left(\prod_{m=1}^n \frac{m^2+1}{m^2}\right) \cdot \pi (nx_n) \left(1 + O\left(\frac{1}{n}\right)\right)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, 由式 (3) 得

$$\frac{e^{2\pi} - e^{-2\pi}}{4\pi} = \frac{e^\pi - e^{-\pi}}{2\pi} \cdot \pi \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} nx_n \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} nx_n = \frac{e^\pi + e^{-\pi}}{2\pi}.$$

1.3.6 Stolz 定理及其应用

Stolz 定理是求解和证明数列极限的一种重要方法, 它有 $\frac{0}{0}$ 型和 $\frac{*}{\infty}$ 型两种形式.

数列的情况

定理 1.3.18 (*/ ∞ 型). 设数列 $\{a_n\}$ 是严格递增的无穷大量, 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_{n+1} - b_n}{a_{n+1} - a_n} = l$, (l 为有限或 $\pm\infty$), 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n}{a_n} = \frac{b_{n+1} - b_n}{a_{n+1} - a_n} = l.$$

定理 1.3.19 (0/0 型). 设数列 $\{a_n\}, \{b_n\}$ 都是无穷小量, 且 $\{a_n\}$ 严格单调递减, 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_{n+1} - b_n}{a_{n+1} - a_n} = l$ (l 为有限或 $\pm\infty$), 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n}{a_n} = \frac{b_{n+1} - b_n}{a_{n+1} - a_n} = l.$$

定理 1.3.18 其实只要求分母 x_n 严格单调递增趋向无穷大, 至于分子 y_n 是否趋向无穷大, 无关紧要; 定理 1.3.19 则是名副其实的 $\frac{0}{0}$ 型.

例 1.3.72. 计算极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt[3]{k^3 + k^2}$.

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

例 1.3.73. 设 $\alpha > 1$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{n+k^\alpha}$.

当 $\alpha > 1$ 时, 由基本不等式 $\frac{a+b}{2} \geq \sqrt{ab}$, 得

$$n+k^\alpha \geq 2\sqrt{nk^\alpha}$$

所以有

$$\begin{aligned} 0 &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{n+k^\alpha} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{2\sqrt{nk^\alpha}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2\sqrt{n}} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{k^\alpha}} \\ &\stackrel{\text{Stolz}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(\sum_{k=1}^n - \sum_{k=1}^{n-1} \right) \frac{1}{\sqrt{k^\alpha}}}{2\sqrt{n} - 2\sqrt{n-1}} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n} - \sqrt{n-1}}{\sqrt{n^\alpha}} = 0 \end{aligned}$$

故由夹逼准则得原极限等于 0.

推论 1.3.8. 当 α 为正数时, $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{n+k^\alpha} = \begin{cases} 1, & 0 < \alpha < 1 \\ \ln 2, & \alpha = 1 \\ 0, & \alpha > 1 \end{cases}$.

证 当 $\alpha = 1$ 时,

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

当 $\alpha \in (0, 1)$ 时, 注意到不等式 $1 \leq k \leq n$ 时,

$$\frac{1}{n+n^\alpha} < \frac{1}{n+k^\alpha} < \frac{1}{n+1}$$

所以 $\sum_{k=1}^n \frac{1}{n+n^\alpha} < \sum_{k=1}^n \frac{1}{n+k^\alpha} < \sum_{k=1}^n \frac{1}{n+1}$,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{n+n^\alpha} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+n^\alpha} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{1+n^{\alpha-1}} = 1$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{1+n^{-1}} = 1$$

由夹逼准则可知, $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{n+k^\alpha} = 1$, 又知当 $\alpha > 1$ 时, $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{n+k^\alpha} = 0$, 故综上所述, 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{n+k^\alpha} = \begin{cases} 1, & 0 < \alpha < 1 \\ \ln 2, & \alpha = 1 \\ 0, & \alpha > 1 \end{cases}.$$

例 1.3.74. 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1^p + 2^p + \cdots + n^p}{n^{p+1}} = \frac{1}{p+1}$ (p 为自然数).

证法一 原式 $\stackrel{Stolz}{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)^p}{(n+1)^{p+1} - n^{p+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(1+n)^p}{(p+1)n^p + \frac{(p+1)p}{2}n^{p-1} + \dots + 1} = \frac{1}{p+1}.$

证法二 原式 $= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{i}{n}\right)^p = \int_0^1 x^p dx = \frac{1}{p+1}.$

例 1.3.75. 已知数列 $\{x_n\}$ 满足条件 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n - x_{n-2}) = 0$, 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n - x_{n-1}}{n} = 0$.

证 令 $|x_n - x_{n-1}| := y_n = \left| \sum_{k=3}^n (y_k - y_{k-1}) + y_1 \right| \leq \sum_{k=3}^n |y_k - y_{k-1}| + y_2 \leq \sum_{k=3}^n |x_k - x_{k-2}| + |x_2 - x_1|$, 于是

$$0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|x_n - x_{n-1}|}{n} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=3}^n |x_k - x_{k-2}| + |x_2 - x_1|}{n} \stackrel{Stolz}{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{|x_n - x_{n-2}|}{n - (n-1)} = 0$$

由夹逼准则, $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n - x_{n-1}}{n} = 0$.

例 1.3.76. 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n!}$.

法一: (积分放缩 + 夹逼准则) 原式 $= \lim_{n \rightarrow \infty} (n!)^{\frac{1}{n \ln n}} = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n \ln n}$, 又因为

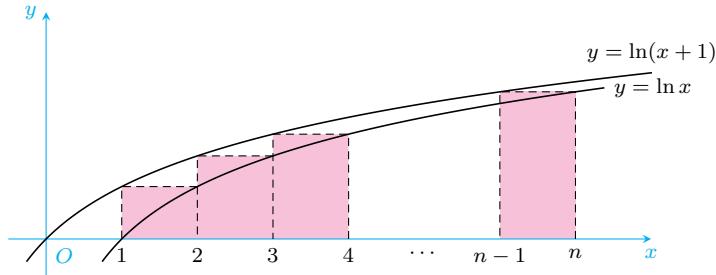


图 1.3.3

由图可知: $\int_1^n \ln x dx \leq \sum_{k=1}^n \ln k \leq \int_1^n \ln(1+x) dx$ 则有

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

又因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \ln n - n + 1}{n \ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1) \ln(n+1) - n}{n \ln n} = 1$, 因此有夹逼准则, 原式=e.

法二: (Stolz 定理+L'Hospital 法则) 同上得到和式: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n \ln n} \stackrel{Stolz}{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{n \ln n - (n-1) \ln(n-1)}$ 下面考虑该极限值 $I = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \ln n - (n-1) \ln(n-1)}{\ln n}$, 由 Heine 定理将其连续化为函数极限:

$$I' = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x \ln x - (x-1) \ln(x-1)}{x \ln x}$$

$$I' \stackrel{L'}{=} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln x + 1 - \ln(x-1) - 1}{\frac{1}{x}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} x \ln \frac{x}{x-1} = \lim_{x \rightarrow +\infty} x \left(\frac{x}{x-1} - 1 \right) = 1 \Rightarrow \text{原式}=e.$$

例 1.3.77. 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{k=1}^{n-1} \left(\frac{2^k}{2^{k+1}-1} \right)^{\frac{1}{2^{n-k}}}$.

取对数降低运算等级, 故

$$\begin{aligned}
 I &= \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{k=1}^{n-1} \left(\frac{2^k}{2^{k+1}-1} \right)^{\frac{1}{2^{n-k}}} = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{2^{n-k}} \ln \frac{2^k}{2^{k+1}-1} \\
 &= \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{k=1}^{n-1} 2^{k-1} \ln \frac{2^k}{2^{k+1}-1} \stackrel{\text{Stolz}}{\Rightarrow} \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(\sum_{k=1}^{n-1} - \sum_{k=1}^{n-2} \right) 2^{k-1} \ln \frac{2^k}{2^{k+1}} - 1}{2^{n-1} - 2^{n-2}} \\
 &= \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^{n-2} \ln \frac{2^{n-1}}{2^n-1}}{2^{n-1} - 2^{n-2}} = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \ln \frac{1}{2 - \frac{1}{2^{n-1}}} = \frac{1}{2}.
 \end{aligned}$$

例 1.3.78. 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^2} \sum_{k=0}^n \ln C_n^k$.

Stolz 公式可重复使用,

$$\begin{aligned}
 \lim_{n \rightarrow \infty} S_n &\stackrel{\text{Stolz}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=0}^{n+1} \ln C_{n+1}^k - \sum_{k=0}^n \ln C_n^k}{(n+1)^2 - n^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=0}^n \ln \frac{C_{n+1}^k}{C_n^k} + \ln C_{n+1}^{n+1}}{2n+1} \\
 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=0}^n \ln \frac{n+1}{n-k+1}}{2n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1) \ln(n+1) - \sum_{k=1}^{n+1} \ln k}{2n+1} \\
 &\stackrel{\text{Stolz}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1) \ln(n+1) - n \ln n - \ln(n+1)}{(2n+1) - (2n-1)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \left(\frac{n+1}{n} \right)^n}{2} = \frac{1}{2}.
 \end{aligned}$$

例 1.3.79. 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\prod_{k=0}^n C_n^k \right)^{\frac{2}{n(n+1)}}$.

取对数, 降低运算等级, 有

$$\begin{aligned}
 I &= \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2}{n(n+1)} \ln \prod_{k=0}^{\infty} C_n^k = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2 \sum_{k=0}^n \ln C_n^k}{n(n+1)} \stackrel{\text{Stolz}}{\Rightarrow} \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2 \sum_{k=0}^{n+1} \ln C_{n+1}^k - 2 \sum_{k=0}^n \ln C_n^k}{(n+1)(n+2) - n(n+1)} \\
 &= \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=0}^n \ln \frac{n+1}{n-k+1}}{n+1} = \dots = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \ln \left(\frac{n+1}{n} \right)^n = e.
 \end{aligned}$$

例 1.3.80. 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \sqrt[n]{\frac{n! (n-1)! \cdots 2!}{n^n (n-1)^{n-1} \cdots 2^2}}$.

由例题 1.3.10 可知, $n! = \sqrt{2\pi n} n e^{-n + \frac{\theta_n}{12n}}$, $0 < \theta_n < 1$, 那么

$$\text{原式} = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=2}^n \ln k! - \sum_{k=2}^n \ln k^k}{n^2} \stackrel{\text{Stolz}}{\Rightarrow} \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n! - \ln n^n}{2n-1} \stackrel{\text{Stirling}}{\Rightarrow} \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln \left(\sqrt{2\pi n} e^{-n} + \frac{\theta_n}{12n} \right)}{2n-1} = e^{-\frac{1}{2}}.$$

例 1.3.81. 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left(\frac{\pi^2}{6} - \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n} \right)$.

记 $m = \frac{\pi^2}{6} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2}$,

$$\text{原式} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m - \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n}}{\frac{1}{n^2}} \stackrel{\text{Stolz}}{\Rightarrow} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m - \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n} - \left(m - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n-1} \right)}{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n-1)^2}}$$

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

例 1.3.82. $\{C_n^k\}_{k=0}^n$ 为二项式系数, A_n, G_n 分别表示它们的算术平均值和几何平均值, 试证:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{A_n} = 2, \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{G_n} = \sqrt{e}.$$

$$\begin{aligned} \text{证 因为 } A_n &= \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n C_n^k = \frac{2^n}{n+1}, \quad G_n = \left(\prod_{k=0}^n C_n^k \right)^{\frac{1}{n+1}} = e^{\frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n \ln C_n^k}, \text{ 所以 } \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{A_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\frac{2^n}{n+1}} = 2 \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{G_n} &= \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=0}^n \ln C_n^k}{n(n+1)} \stackrel{\text{Stolz}}{=} \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=0}^n \ln C_n^k - \sum_{k=0}^{n-1} \ln C_{n-1}^k}{2n} \\ &= \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{n-1} \ln C_n^k - \sum_{k=1}^{n-2} \ln C_{n-1}^k}{2n} = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{n-2} \ln \frac{C_n^k}{C_{n-1}^k} + \ln C_n^{n-1}}{2n} \\ &= \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{n-2} \ln \frac{n}{n-k} + \ln n}{2n} = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \ln \frac{n-k}{n} \right) \\ &= \exp \left[-\frac{1}{2} \int_0^1 \ln(1-x) dx \right] = \sqrt{e}. \end{aligned}$$

函数极限的情况

Stolz 定理可推广到函数极限的情况.

定理 1.3.20 (∞/∞ 型). 若 $T > 0$ 为常数, 且满足

$$(1) \ g(x+T) > g(x), \forall x \geq a;$$

$$(2) \ g(x) \rightarrow +\infty (x \rightarrow +\infty), \text{ 且 } f, g \text{ 在 } [a, +\infty) \text{ 内闭有界};$$

$$(3) \ \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x+T) - f(x)}{g(x+T) - g(x)} = l.$$

则 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = l$, (其中 l 为有限数, $+\infty$ 或 $-\infty$).

定理 1.3.21 (0/0 型). 若 $T > 0$ 为常数, 且

$$(1) \ 0 < g(x+T) < g(x), \forall x \geq a;$$

$$(2) \ \lim_{x \rightarrow +\infty} f = \lim_{x \rightarrow +\infty} g = 0;$$

$$(3) \ \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x+T) - f(x)}{g(x+T) - g(x)} = l.$$

则 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = l$, (其中 l 为有限数, $+\infty$ 或 $-\infty$).

例 1.3.83. 设 f 在 $[a, +\infty)$ 上有定义, 且内闭有界 (即 $\forall [\alpha, \beta] \subset (a, +\infty)$, f 在 $[\alpha, \beta]$ 上有界),

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(x+1) - f(x)}{x^n} = l$$

其中 l 为有限数, $+\infty$ 或 $-\infty$, 证明: $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x^{n+1}} = \frac{l}{n+1}$.

运用函数的 Stolz 定理, 得

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x^{n+1}} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x+1) - f(x)}{(x+1)^{n+1} - x^{n+1}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x+1) - f(x)}{(n+1)x^n + \frac{n(n+1)}{1 \cdot 2}x^{n-1} + \dots + 1} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\frac{f(x+1) - f(x)}{x^n}}{(n+1) + \frac{n(n+1)}{1 \cdot 2} \frac{1}{x} + \dots + \frac{1}{x^n}} = \frac{l}{n+1} \quad (l \text{ 为 } +\infty, -\infty \text{ 也成立}). \end{aligned}$$

Stolz 的应用

例 1.3.84. 对于数列 $x_0 = a, 0 < a < \frac{\pi}{2}, x_n = \sin x_{n-1} (n = 1, 2, \dots)$, 证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{n}{3}} x_n = 1.$$

证

(1) 因为 $0 < a < \frac{\pi}{2}, x_0 = a$, 递推可知

$$0 < x_n = \sin x_{n-1} < x_{n-1} < \frac{\pi}{2} \quad (n = 1, 2, \dots)$$

$\{x_n\}$ 单调递减且有下界 0, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 存在. 记 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = A$, 知 $A = \sin A \Rightarrow A = 0, \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$.

(2) 要证 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{n}{3}} x_n = 1$, 即证 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\frac{x_n^2}{3}} = 3$

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\frac{x_n^2}{3}} &\stackrel{\text{Stolz}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n - (n-1)}{\frac{x_n^2}{3} - \frac{x_{n-1}^2}{3}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{\sin^2 x_n - 1}{\sin^2 x_{n-1} - \sin^2 x_{n-1}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n-1}^2 \sin^2 x_n - 1}{x_{n-1}^2 - \sin^2 x_{n-1}} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 \sin^2 x}{x^2 - \sin^2 x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^4}{(x + \sin x)(x - \sin x)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^4}{(2x + o(x)) \left(\frac{x^3}{6} + o(x^3) \right)} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{(2 + o(1)) \left(\frac{1}{6} + o(1) \right)} = 3. \end{aligned}$$

得证 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{n}{3}} x_n = 1$.

例 1.3.85. 设 $0 < a_1 < 1, a_{n+1} = a_n(1 - a_n) (\forall n \in \mathbb{N})$, 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} n a_n = 1$.

证 由 $0 < x_1 < 1$ 及 $x_2 = x_1(1 - x_1)$ 知, $0 < x_2 < 1$, 用数学归纳法可证: $\forall n \in \mathbb{N}^*: 0 < x_n < 1$, 于是 $0 < \frac{x_{n+1}}{x_n} = 1 - x_n < 1 (n = 1, 2, \dots)$, 从而 $\{x_n\} \searrow 0$, 不妨设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = A$, 递推关系式两边取极限, 得 $A = A(1 - A)$, 解得 $A = 0$. 令 $b_n = \frac{1}{x_n}$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = +\infty$, 且数列 $\{b_n\}$ 是严格单调递增, 故由 Stolz 定理

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\frac{1}{x_n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{b_{n+1} - b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} (1 - x_n) = 1.$$

例 1.3.86. 设 $x_1 > 0, x_{n+1} = \ln(1 + x_n) (n = 1, 2, \dots)$, 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} n x_n$.

$x_2 = \ln(1 + x_1) > 0$, 用数学归纳法可证 $\forall n \in \mathbb{N}^*: x_n > 0$, 又 $x_1 > 0, x_{n+1} = \ln(1 + x_n) < x_n$, 故数列 $\{x_n\} \searrow 0$, 那么

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} n x_n &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\frac{1}{x_n}} \stackrel{\text{Stolz}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{x_n} - \frac{1}{x_{n-1}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{\ln(1 + x_{n-1})} - \frac{1}{x_{n-1}}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n-1} \ln(1 + x_{n-1})}{x_{n-1} - \ln(1 + x_{n-1})} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{x_{n-1}^2}{2}}{\frac{x_{n-1}}{2}} = 2. \end{aligned}$$

例 1.3.87. 序列 $a_{ij} = \frac{i+j}{i^2+j^2}$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}$.

由 Stolz (*/* 型) 得²

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{i+j}{i^2+j^2} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \right) \frac{i+j}{i^2+j^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[2 \left(\sum_{k=1}^n \frac{(n+1)+k}{(n+1)^2+k^2} \right) + \frac{1}{n+1} \right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{2}{n+1} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1+\frac{k}{n+1}}{1+\left(\frac{k}{n+1}\right)^2} \right) + \frac{1}{n+1} \right] = 2 \int_0^1 \frac{1+x}{1+x^2} dx = \frac{\pi}{2} + \ln 2. \end{aligned}$$

例 1.3.88. 序列 $a_{ij} = \frac{ij}{\sqrt{i^2+j^2+ai+bj+c}}$, a, b, c 为非负实数, 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}$.

令 $y_n = \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{ij}{\sqrt{i^2+j^2}}$, 那么

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} y_n &\stackrel{\text{Stolz}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \right) \frac{ij}{\sqrt{i^2+j^2}}}{3n^2+3n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left[2 \left(\sum_{k=1}^n \frac{k(n+1)}{\sqrt{k^2+(n+1)^2}} \right) + \frac{n+1}{\sqrt{2}} \right]}{3n^2+3n+1} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2(n+1)^2}{3n^2+3n+1} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n+1} \sum_{k=1}^n \frac{k/(n+1)}{\sqrt{1+(k/(n+1))^2}} = \frac{2}{3} \int_0^1 \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} dx = \frac{2}{3} (\sqrt{2}-1). \end{aligned}$$

考虑 $\delta > 0$ 的情况, 令 $z_n = \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{ij}{\sqrt{(i+\delta)^2+(j+\delta)^2}}$, 下证 $\lim_{n \rightarrow \infty} (z_n - y_n) = 0$,

$$d_n = z_n - y_n = \frac{-1}{n^3} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{(2\delta^2 + 2\delta i + 2\delta j) ij}{\sqrt{(i+\delta)^2+(j+\delta)^2} \sqrt{i^2+j^2} \left(\sqrt{(i+\delta)^2+(j+\delta)^2} + \sqrt{i^2+j^2} \right)}$$

由 $\sqrt{i^2+j^2} \geq \sqrt{2ij}$, 因此

$$\begin{aligned} |d_n| &\leq \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{(2\delta^2 + 2\delta i + 2\delta j) ij}{(i^2+j^2)^{\frac{3}{2}}} \leq \frac{1}{\sqrt{2}n^3} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\delta^2 + \delta i + \delta j}{\sqrt{i}\sqrt{j}} \\ &= \frac{\delta^2}{\sqrt{2}n^3} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{i}} \right) \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{j}} \right) + \frac{\delta}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{j}} \right) \left(\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sqrt{i} \right) + \frac{\delta}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{i}} \right) \left(\frac{1}{n^2} \sum_{j=1}^n \sqrt{j} \right) \end{aligned}$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{j}} = 0, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^2} \sum_{j=1}^n \sqrt{j} = 0$$

²以下的括号不为矩阵符号,

$$\begin{aligned} &\left(\begin{array}{ccccc} \frac{1+1}{1^2+1^2} & + & \frac{1+2}{1^2+2^2} & + & \cdots + & \frac{1+n}{1^2+n^2} & + & \frac{1+n+1}{1^2+(n+1)^2} \\ \frac{2+1}{2^2+1^2} & + & \frac{2+2}{2^2+2^2} & + & \cdots + & \frac{2+n}{2^2+n^2} & + & \frac{2+n+1}{2^2+(n+1)^2} \\ \vdots & & \vdots & & & \vdots & & \vdots \\ \frac{n+1}{n^2+1^2} & + & \frac{n+2}{n^2+2^2} & + & \cdots + & \frac{n+n}{n^2+n^2} & + & \frac{n+n+1}{n^2+(n+1)^2} \\ \frac{n+1+n+1}{(n+1)^2+1^2} & + & \frac{n+1+n+2}{(n+1)^2+2^2} & + & \cdots + & \frac{n+1+n+n}{(n+1)^2+n^2} & + & \frac{n+1+n+n+1}{(n+1)^2+(n+1)^2} \end{array} \right) \\ &- \left(\begin{array}{ccccc} \frac{1+1}{1^2+1^2} & + & \frac{1+2}{1^2+2^2} & + & \cdots + & \frac{1+n}{1^2+n^2} \\ \frac{2+1}{2^2+1^2} & + & \frac{2+2}{2^2+2^2} & + & \cdots + & \frac{2+n}{2^2+n^2} \\ \vdots & & \vdots & & & \vdots \\ \frac{n+1}{n^2+1^2} & + & \frac{n+2}{n^2+2^2} & + & \cdots + & \frac{n+n}{n^2+n^2} \end{array} \right) = 2 \left[\sum_{k=1}^n \frac{(n+1)+k}{(n+1)^2+k^2} \right] + \frac{1}{n+1}. \end{aligned}$$

于是 $\lim_{n \rightarrow \infty} d_n = 0$, 令 $x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}$, 且 $\xi = \max \left\{ \frac{a}{2}, \frac{b}{2}, \sqrt{\frac{c}{2}} \right\}$, 得

$$i^2 + j^2 \leq i^2 + j^2 + ai + bj + c \leq (i + \xi)^2 + (j + \xi)^2$$

因此 $z_n \leq x_n \leq y_n$, 两边取极限, 由夹逼准则得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} = \frac{2}{3} (\sqrt{2} - 1)$.

1.4 极限典型问题

这一节讨论与极限相关联的三类典型问题, 即极限的存在性问题、极限的局部逆问题和无穷小量及其阶的比较.

1.4.1 极限的存在性问题

讨论极限的存在性, 是高等数学中既十分典型又经常遇到的问题, 在研究非初等函数的连续性与可导性, 往往归结为这类问题.

例 1.4.1. 设函数

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\int_0^{x^2} \sqrt{1 + \tan^2 t} dt}{2x^2} & , x < 0 \\ \frac{\sqrt{1 + x^2} - 1}{\ln(1 + x^2)} & , x > 0 \end{cases}$$

求极限 $\lim_{x \rightarrow 0} f(x)$.

利用 L'Hospital 法则易求得在 $x = 0$ 处的左右极限值,

$$\lim_{x \rightarrow 0^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{\int_0^{x^2} \sqrt{1 + \tan^2 t} dt}{2x^2} \xrightarrow[L']{} \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{2x \cdot \sqrt{1 + \tan^2 x^2}}{4x} = \frac{1}{2}$$

并且

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\sqrt{1 + x^2} - 1}{\ln(1 + x^2)} = \frac{1}{2}$$

由 $f(0^-) = f(0^+) = \frac{1}{2}$, 故 $\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = \frac{1}{2}$.

1.4.2 极限的局部逆问题

如果已知函数的极限存在, 但是在函数的表达式中含有一个(或多个)待定的参数, 要求确定待定参数的值, 这就是所谓的函数极限的局部逆问题.

例 1.4.2 (2018 数二). 若 $\lim_{x \rightarrow 0} (e^x + ax^2 + bx)^{x^{-2}} = 1$, 则

- A. $a = \frac{1}{2}, b = -1$ B. $a = -\frac{1}{2}, b = -1$ C. $a = \frac{1}{2}, b = 1$ D. $a = -\frac{1}{2}, b = 1$

由题设条件 $\lim_{x \rightarrow 0} (e^x + ax^2 + bx)^{x^{-2}} = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^2} \ln (e^x + ax^2 + bx) = 1$, 于是有 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln (e^x + ax^2 + bx)}{x^2} = 0$, 即

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln (e^x + ax^2 + bx)}{x^2} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x + ax^2 + bx + 1}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1+x+\frac{1}{2}x^2+ax^2+bx+1+o(x^2)}{x^2} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0} \left[\left(\frac{1}{2} + a \right) + \frac{b+1}{x} + \frac{2}{x^2} \right] = 0 \Rightarrow \begin{cases} \frac{1}{2} + a = 0 \\ 1 + b = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

故解得选 B.

例 1.4.3 (2018 数一). 若 $\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{1 - \tan x}{1 + \tan x} \right)^{\frac{1}{\sin kx}} = e$, 求 k .

$$\begin{aligned} \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{\sin kx} \ln \left(\frac{1 - \tan x}{1 + \tan x} \right) &= \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1 - \tan x) - \ln(1 + \tan x)}{\sin kx} = \exp \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-2 \tan x}{\xi_x \cdot \sin kx} = e, \text{ 于是} \\ \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-2 \tan x}{\xi_x \cdot \sin kx} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-2x}{\xi_x k} = 1 \Rightarrow k = -2 \end{aligned}$$

其中 $\xi_x \rightarrow 1 (x \rightarrow 0)$.

例 1.4.4. 试确定常数 A, B, C , 使下式当 $x \rightarrow 0$ 时成立:

$$\frac{e^{\sin x}}{\sin x} = \frac{1 + Bx + Cx^2}{x + Ax^2} + o(x^2).$$

将所给等式两边同时乘以 $(1 + Ax) \sin x$, 并注意到 $x \rightarrow 0$ 时, $(1 + Ax) \sin x \cdot o(x^2) = o(x^3)$, 得

$$(1 + Ax)e^{\sin x} = \frac{\sin x}{x}(1 + Bx + Cx^2) + o(x^3)$$

将 $e^{\sin x}, \frac{\sin x}{x}$ 分别展开到 x 的三阶, 于是有

$$e^{\sin x} = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 + o(x^2), \quad \frac{\sin x}{x} = 1 - \frac{1}{6}x^2 + o(x^2)$$

代入上式, 得

$$\begin{aligned} \left(1 + x + \frac{1}{2}x^2 \right)(1 + Ax) &= \left(1 - \frac{1}{6}x^2 \right)(1 + Bx + Cx^2) + o(x^3) \\ (A + 1 - B)x + \left(A - C + \frac{2}{3} \right)x^2 + \left(\frac{A}{2} + \frac{B}{6} \right)x^3 &= o(x^3) \end{aligned}$$

欲使上式成立, 必须有 $\begin{cases} A + 1 - B = 0 \\ A - C + \frac{1}{3} = 0 \\ \frac{A}{2} + \frac{B}{6} = 0 \end{cases}$, 联立解得 $A = -\frac{1}{4}$, $B = \frac{3}{4}$, $C = \frac{5}{12}$.

1.4.3 无穷小量及其阶的比较

有关无穷小量的概念可参考定义 1.3.1.

例 1.4.5 (2019 数一). 当 $x \rightarrow 0$ 时, 若 $x - \tan x$ 与 x^k 是同阶无穷小, 则 k 等于

A. 1

B. 2

C. 3

D. 4

由于当 $x \rightarrow 0$ 时, $x - \tan x \sim -\frac{1}{3}x^3$, 则 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \tan x}{x^3} = -\frac{1}{3}$, 所以 $k = 3$, 选 C.

例 1.4.6. 设 $x \rightarrow 0$ 时, $e^{x \cos x^2} - e^x$ 与 x^n 是同阶无穷小, 则 n 为

- A. 5 B. 4 C. 3 D. 2

因为 $e^{x \cos x^2} - e^x = e^x [e^{x(\cos x^2 - 1)} - 1] \sim x(\cos x^2 - 1) \sim -\frac{1}{2}x^5$, 所以 $n = 5$, 故选 A

例 1.4.7 (2001 数二). 设当 $x \rightarrow 0$ 时, $(1 - \cos x) \ln(1 + x^2)$ 是比 $x \sin x^n$ 高阶的无穷小, 而 $x \sin x^n$ 是比 $e^{x^2} - 1$ 高阶的无穷小, 则正整数 n

- A. 1 B. 2 C. 3 D. 4

因为 $(1 - \cos x) \ln(1 + x^2) \sim \frac{1}{2}x^4$, $x \sin x^n \sim x^{n+1}$, $e^{x^2} - 1 \sim x^2$, 由题意知 $4 > n + 1 > 2$, 解得 $n = 2$, 故选 B.

1.5 递推形式的极限

有些数列, 常常是利用递推的形式给出的, 如何计算这类数列的极限, 是本节的重点. 此类问题在各类考试中比较常见, 需多加注意.

1.5.1 利用存在性求极限

假若用某种方法证明了递推数列的极限存在, 则在递推公式里取极限, 便可得到极限值 A 应满足的方程, 解此方程, 可求得极限值 A .

定理 1.5.1 (单调有界准则). 若 $x_n \nearrow$ 有上界, 或 $x_n \searrow$ 有下界, 则 $\{x_n\}$ 收敛.

判断单调性的通常方法有:

$$(1) \forall n \in \mathbb{N} : x_{n+1} - x_n \begin{cases} \geq 0, & x_n \nearrow, \\ \leq 0, & x_n \searrow. \end{cases}$$

$$(2) \forall n \in \mathbb{N} : \frac{x_{n+1}}{x_n} \begin{cases} \geq 1, & x_n \nearrow, \\ \leq 1, & x_n \searrow. \end{cases}$$

$$(3) \text{若 } x_{n+1} = f(x_n), f'(x) \geq 0, \text{则 } \begin{cases} x_1 \leq x_2, & x_n \nearrow, \\ x_1 \geq x_2, & x_n \searrow. \end{cases}$$

定理 1.5.2 (压缩映射). 对于任一数列 $\{x_n\}$ 而言, 若存在常数 r , 使得 $\forall n \in \mathbb{N}$, 恒有

$$|x_{n+1} - x_n| \leq r|x_n - x_{n-1}|, 0 < r < 1$$

则数列 $\{x_n\}$ 收敛; 特别地, 若数列 $\{x_n\}$ 利用递推公式给出: $x_{n+1} = f(x_n)$ ($n = 1, 2, \dots$), 其中 f 为某一可微函数, 且 $\exists r \in \mathbb{R}$, 使得

$$|f'(x)| \leq r < 1$$

则数列 $\{x_n\}$ 收敛. 若上式只在某区间 D 上成立, 则必须验证数列 $\{x_n\}$ 是否保持在区间 D 内.

定理 1.5.3 (不动点迭代). 求解非线性方程 (组) 的一类常见的数值解法. 例如, 单个方程的求根问题 $f(x) = 0$ 总可以等价地写成 $x = \phi(x)$, 其中 $\phi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 是一个辅助函数, 满足该式的点 x 称为不动点. 如果给定初始点 $x(0)$, 就可以考虑如下的不动点迭代法:

$$x^{(k+1)} = \phi(x^{(k)}) \quad (k = 0, 1, \dots)$$

函数 ϕ 亦称为迭代函数.

如果迭代函数 ϕ 是一个闭区间上的压缩映射 (或者迭代函数连续可微, 且导数的绝对值在该闭区间上严格小于 1), 则不动点迭代法产生的序列 $\{x^{(k)}\}$ 收敛到 ϕ 在区间上的不动点.

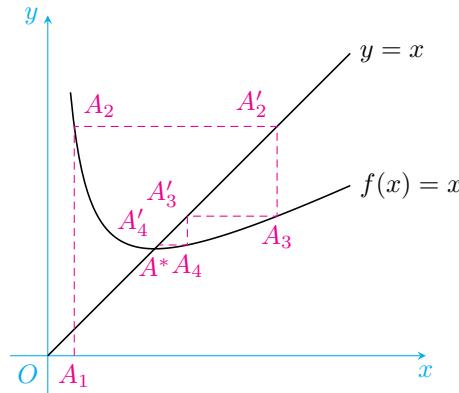


图 1.5.1

例 1.5.1. 设数列 $\{x_n\}$ 满足: $x_0 = 1$, $x_{n+1} = \sqrt{2x_n}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), 证明 $\{x_n\}$ 收敛, 并求极限值.

证法一 $x_n = \sqrt{2x_{n-1}} = \sqrt{2\sqrt{2x_{n-2}}} = \sqrt{2\sqrt{2\sqrt{\dots\sqrt{2}}}} = 2^{\frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \dots + \frac{1}{2^n}} = 2^{1 - \frac{1}{2^n}} \rightarrow 2$ ($n \rightarrow \infty$).

证法二 显然 $1 \leq x_0 < 2$, 假设 $1 \leq x_k < 2$, 则 $1 \leq x_{k+1} = \sqrt{2x_k} < \sqrt{2 \cdot 2} = 2$, 故由数学归纳法知, $\forall n \in \mathbb{N}: 1 \leq x_n < 2$, 又由 $\frac{x_{n+1}}{x_n} = \frac{\sqrt{2x_n}}{x_n} = \sqrt{\frac{2}{x_n}} > 1$, 知 $\{x_n\} \nearrow$, 所以由单调有界原理得 $\{x_n\}$ 收敛, 不妨记 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = A$, 则在递推公式里取极限, 有 $A = \sqrt{2A} \Rightarrow A = 0, 2$, 而由 $x_n \geq 1$, 知 $A \geq 1$, 故取 $A = 2$, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = A$.

证法三 令 $f(x) = \sqrt{2x}$ ($x > 0$), 则 $f'(x) = \frac{1}{\sqrt{2x}} > 0$ ($x > 0$), 于是当 $x > 0$ 时, $f(x) \nearrow$, 从而有 $x_n > x_{n-1}$, 可得

$x_{n+1} = f(x_n) > f(x_{n-1}) = x_n$, 而 $x_1 = \sqrt{2} > x_0 = 1$, 故有 $x_1 < x_2 < \dots$, 即 $\{x_n\} \nearrow$, 其余证法同证法 2.

证法四 如证法 2, 已有 $1 \leq x_n < 2$, 对 $f(x) = \sqrt{2x}$, 有

$$|f'(x)| = \frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{x}} \leq \frac{\sqrt{2}}{2} < 1$$

满足压缩映射条件, 其余证法同证法 2.

证法五 由递推关系式两边取对数, 得 $\ln x_{n+1} = \frac{1}{2} \ln x_n + \frac{1}{2} \ln 2$, 令 $b_n = \ln x_n$, 则

$$b_{n+1} = \frac{1}{2} b_n + \frac{1}{2} \ln 2, \quad b_0 = 0$$

记 $f(x) = \frac{1}{2}x + \frac{1}{2}\ln 2$, 则 $b_{n+1} = f(b_n)$, 又由特征方程 $x = f(x)$, 解得特征根 $x = \ln 2$, 所以

$$b_n - \ln 2 = \left(\frac{1}{2}b_{n-1} + \frac{1}{2}\ln 2\right) - \left(\frac{1}{2}\ln 2 + \frac{1}{2}\ln 2\right) = \frac{1}{2}(b_{n-1} - \ln 2) = \left(\frac{1}{2}\right)^n \cdot (b_0 - \ln 2) = -\ln 2 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

于是 $\lim_{n \rightarrow \infty} (b_n - \ln 2) = 0$, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 2$.

推论 1.5.1. 一般地, 设 $a, x_0 > 0, x_{n+1} = \sqrt{ax}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), 则数列 $\{x_n\}$ 收敛, 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$.

例 1.5.2. 已知 $x_1 = \sqrt{6}$, $x_n = \sqrt{6 + x_{n-1}}$ ($n = 2, 3, \dots$), 证明数列 $\{x_n\}$ 有极限, 并求其值.

证法一 用数学归纳法可证: $0 < x_n < 3$ ($n = 1, 2, \dots$),

因为 $x_{n+1} - n = \sqrt{6 + x_n} - \sqrt{6 + x_{n-1}} = \frac{x_n - x_{n-1}}{\sqrt{6 + x_n} + \sqrt{6 + x_{n-1}}}$, 所以 $x_{n+1} - x_n$ 与 $x_n - x_{n-1}$ 同号, 又 $x_2 = \sqrt{6 + \sqrt{6}} > \sqrt{6} = x_1$, 所以 $x_{n+1} > x_n$, 即 $\{x_n\} \nearrow 3$, 由单调有界准则知, $\{x_n\}$ 收敛.

证法二 先假设数列 $\{x_n\}$ 收敛, 不妨设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = A$, 则由递推关系式两边取极限, 得 $A = \sqrt{6 + A}$, 解得 $A = 3, -2$, 因为 $x_n > 0$ ($n = 1, 2, \dots$), 所以 $A = 3$, 下证数列 $\{x_n\}$ 收敛于 3.

记 $q = \frac{1}{\sqrt{6} + 3}$, 则有

$$|x_n - 3| = \left| \sqrt{6 + x_{n-1}} - 3 \right| = \frac{|x_{n-1} - 3|}{\sqrt{6 + x_{n-1}} + 3} < q \cdot |x_{n-1} - 3| < \dots < q^{n-1} \cdot |x_1 - 3|$$

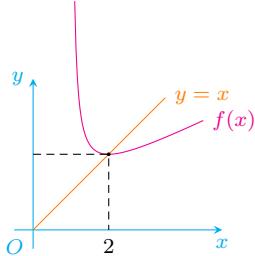
而由 $\lim_{n \rightarrow \infty} q^n = 0$, 故由极限的定义或者夹逼准则, 可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 3$.

例 1.5.3. 已知数列 $\{x_n\}$ 满足 $x_{n+1} = \frac{x_n^2}{2(x_n - 1)}$, ($n = 0, 1, 2, \dots$), 且 $x_0 > 1$, 证明: 数列 $\{x_n\}$ 收敛, 并求其极限.

因为 $x_{n+1} = \frac{x_n^2}{2(x_n - 1)} = \frac{x_n^2 - 1 + 1}{2(x_n - 1)} = \frac{(x_n - 1)(x_n + 1) + 1}{2(x_n - 1)} = 1 + \frac{x_n - 1}{2} + \frac{1}{2(x_n - 1)} \geq 2$ ($n = 1, 2, \dots$),

法一: 令 $f(x) = \frac{x^2}{2(x - 1)}$, 则

$$f'(x) = \frac{x(x - 2)}{2(x - 1)^2} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{(x - 1)^2} \right]$$



所以 $|f'(x)| = \left| \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{(x - 1)^2} \right] \right| < \frac{1}{2} < 1$, 表明 $x_{n+1} = f(x_n)$ 是一压缩映像, 所

以 $\{x_n\}$ 收敛, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 存在, 不妨记为 A , 对 $x_{n+1} = \frac{x_n^2}{2(x_n - 1)}$ 两边取极限, 有

$A = \frac{A^2}{2(A - 1)} \Rightarrow A = 2$, 由极限的保序性可得 $A = 2$, 即原数列极限为 2.

法二: $x_{n+1} - x_n = \frac{x_n^2}{2(x_n - 1)} - x_n = -\frac{x_n(x_n - 2)}{2(x_n - 1)} < 0$, 则 $\{x_n\} \searrow$, 同法一可得数列极限为 2.

法三: 取³ $A = 2$, 则 $A = \frac{A^2}{2(A - 1)}$, 作

$$\begin{aligned} |x_{n+1} - A| &= \left| \frac{x_n^2}{2(x_n - 1)} - \frac{A^2}{2(A - 1)} \right| = \frac{1}{2} \left| \frac{x_n^2 - 1 + 1}{x_n - 1} - \frac{A^2 - 1 + 1}{A - 1} \right| = \frac{1}{2} \left| x_n + 1 + \frac{1}{x_n - 1} - (A + 1) - \frac{1}{A - 1} \right| \\ &= \frac{1}{2} \left| x_n - A + \frac{1}{x_n - 1} - \frac{1}{A - 1} \right| < |x_n - A| \end{aligned}$$

因此

$$|x_{n+1} - A| < \frac{1}{2} |x_n - A| < \dots < \frac{1}{2^{n+1}} |x_0 - A| \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty)$$

故由夹逼准则 (或数列极限的定义) 可知 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 2$.

例 1.5.4. (试用三种方法求) 设 $x_1 > 0$, $x_{n+1} = \frac{c(1 + x_n)}{c + x_n}$ (c 为常数), 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.

法一: (用单调有界准则) 若 $x_1 = \sqrt{c}$, 则 $x_n = \sqrt{c}$ ($\forall n \in \mathbb{N}$), $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \sqrt{c}$, 若 $x_1 > \sqrt{c}$, 因 $f(x) := \frac{c(1 + x)}{c + x} = c - \frac{c(c - 1)}{c + x}$ 严格 \nearrow , 故 $\forall n \in \mathbb{N}: x_n > \sqrt{c} \Rightarrow x_{n+1} = \frac{c(1 + x_n)}{c + x_n} = f(x_n) > f(\sqrt{c}) = \sqrt{c}$, 由 $x_1 > \sqrt{c}$ 可递推出 $x_n > \sqrt{c}$,

又因为 $x_{n+1} - x_n = \frac{c - x_n^2}{c + x_n} < 0$, 知 x_n 严格 \nearrow , 故 $\{x_n\}$ 收敛, 同理可证, 当 $0 < x_1 < \sqrt{c}$ 时, $x_n \nearrow \sqrt{c}$, 综上, $\{x_n\}$ 单调

³由图 1.5.2 可知在 $x > 1$ 处有一个不动点 $x = 2$.

有界, 极限存在, 令递推式 $\frac{c(1+x_n)}{c+x_n}$ 两边取极限, 得极限为 \sqrt{c} .

法二: (用压缩映射) 因为 $x_n > 0$, 且 $x > 0$ 时, $f'(x) = \left[\frac{c(1+x)}{c+x} \right]' = \frac{c(c-1)}{(c+x)^2} > 0$, 又 $c > 1$ 知

$$0 < f'(x) = \frac{c(c-1)}{(c+x)^2} \leq \frac{c(c-1)}{c^2} = 1 - \frac{1}{c} < 1 (\forall x > 0)$$

故 $x_{n+1} = f(x_n)$ 为压缩映射, $\{x_n\}$ 收敛, 同上由 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \sqrt{c}$.

法三: 显然对一切 $x_n > 0$, 令 $f(x) = \frac{c(1+x)}{c+x} = x$, 知不动点 $x^* = \sqrt{c}$, 而 $f' \nearrow$ 保证了 x_n 位于不动点 x^* 的同一侧, 且

$$\left[x - \frac{c(1+x)}{c+x} \right] (x - \sqrt{c}) = \frac{cx + x^2 - c - cx}{c+x} (x - \sqrt{c}) = \frac{x + \sqrt{c}}{c+x} (x + \sqrt{c})^2 > 0$$

意味着 x_n 向 x^* 步步靠近, 根据不动点迭代法知, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \sqrt{c}$.

例 1.5.5. 设 $a, x_0 > 0$, $x_{n+1} = \frac{1}{2} \left(x_n + \frac{a}{x_n} \right)$ ($n = 0, 1, \dots$), 证明数列 $\{x_n\}$ 收敛, 并求其值.

证法一 由算术平均数大于几何平均数得 $x_{n+1} = \frac{1}{2} \left(x_n + \frac{a}{x_n} \right) \geq \sqrt{a}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), 于是 $\frac{x_{n+1}}{x_n} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{a}{x_n^2} \right) \leq 1$, 即 $x_{n+1} \leq x_n$, 从而数列 $\{x_n\} \searrow \sqrt{a}$, 故数列收敛, 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = A$, 则由递推关系式两边取极限解得 $A = \pm \sqrt{a}$, 因为 $x_n \geq \sqrt{a}$, 所以极限为 \sqrt{a} .

证法二 由已知 $x_n > 0$, 且

$$\begin{aligned} x_{n+1} - x_n &= \frac{1}{2} \left(x_n + \frac{a}{x_n} \right) - x_n = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{x_n} - x_n \right) = \frac{1}{2} \left[\frac{a}{\frac{1}{2} \left(x_{n-1} + \frac{a}{x_{n-1}} \right)} - \frac{1}{2} \left(x_{n-1} + \frac{a}{x_{n-1}} \right) \right] \\ &= \frac{1}{4} \cdot \frac{-(x_{n-1}^2 - a)^a}{x_{n-1} \cdot (x_{n-1}^2 + a)} < 0 (n \geq 2) \end{aligned}$$

所以 $\{x_n\} \searrow 0$, 同解法 1, 可求得极限值为 \sqrt{a} .

证法三 由 $x_{n+1} = \frac{1}{2} \left(x_n + \frac{a}{x_n} \right) \geq \sqrt{a}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), 所以 $x_{n+1} - \sqrt{a} = (x_n - \sqrt{a}) \cdot \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{a}}{x_n} \right)$, 反复利用该递推公式, 得

$$x_{n+1} - \sqrt{a} = (x_1 - \sqrt{a}) \cdot \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{a}}{x_1} \right) \left(1 - \frac{\sqrt{a}}{x_2} \right) \cdots \left(1 - \frac{\sqrt{a}}{x_n} \right)$$

于是 $|x_{n+1} - \sqrt{a}| \leq \frac{1}{2^n} \cdot |x_1 - \sqrt{a}|$, 因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2^n} = 0$, 由夹逼准则得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1} - \sqrt{a} = 0$, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \sqrt{a}$.

推论 1.5.2. 一般地, 设 $a, x_1 > 0, m \in \mathbf{N}^*$, $x_{n+1} = \frac{1}{m} \left[(m-1)x_n + \frac{a}{x_n^{m-1}} \right]$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \sqrt[m]{a}$.

例 1.5.6. 设 $a, x_0 > 0$, $x_{n+1} = \frac{x_n(x_n^2 + 3a)}{3x_n^2 + a}$ ($n = 0, 1, \dots$), 证明数列 $\{x_n\}$ 收敛, 并求极限值.

令 $f(x) = \frac{x(x^2 + 3a)}{3x^2 + a}$, 则 $f'(x) = \frac{3(x^2 - a^2)^2}{(3x^2 + a)^2} \geq 0$, $x_{n+1} = f(x_n)$,

若 $x_0 \geq \sqrt{a}$, 则 $x_1 = f(x_0) \geq f(\sqrt{a}) = \sqrt{a}$, 由 $x_n \geq \sqrt{a}$ 可得 $x_{n+1} = f(x_n) \geq f(\sqrt{a}) = \sqrt{a}$, 于是由数学归纳法得 $\forall n \in \mathbf{N}, x_n \geq \sqrt{a}$, 又 $x_1 = \frac{x_0(x_0^2 + 3a)}{3x_0^2 + a} \leq x_0$, 由 $f'(x) \geq 0$ 得 $x_2 = f(x_1) \leq f(x_0) = x_1$, 反复利用此关系, 即得 $x_{n+1} \leq x_n$, 于是数列 $\{x_n\} \searrow \sqrt{a}$, 故数列 $\{x_n\}$ 收敛,

若 $0 < x_0 < \sqrt{a}$, 则类似上面可证得 $\forall n \in \mathbf{N}, 0 < x_n < \sqrt{a}$ 且 $x_{n+1} \geq x_n$, 于是数列 $\{x_n\} \nearrow \sqrt{a}$, 故数列 $\{x_n\}$ 收敛, 不妨设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = A$, 易得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \sqrt{a}$.

$$x_n^k + \sum_{i=0}^{[k/2]} C_k^{2i} \cdot x_n^{k-2i} \cdot a^i$$

推论 1.5.3. 一般地, 设 $k \geq 2, k \in \mathbf{N}^*, x_0 > 0$, 令 $x_{n+1} = \frac{\sum_{i=0}^{[(k-1)/2]} C_k^{2i+1} \cdot x_n^{k-2i-1} \cdot a^i}{\sum_{i=0}^{[k/2]} C_k^{2i+1} \cdot x_n^{k-2i-1} \cdot a^i}$ ($n = 0, 1, \dots$), 则

数列 $\{x_n\}$ k 阶收敛于 \sqrt{a} .

事实上, 因为 $\frac{x_{n+1} - \sqrt{a}}{x_{n+1} + \sqrt{a}} = \left(\frac{x_n - \sqrt{a}}{x_n + \sqrt{a}} \right)^k = \cdots = \left(\frac{x_1 - \sqrt{a}}{x_1 + \sqrt{a}} \right)^{k^n}$, 所以有

$$x_{n+1} - \sqrt{a} = 2\sqrt{a} \frac{\gamma^{k^n}}{1 - \gamma^{k^n}} \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty)$$

且有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1} - \sqrt{a}}{(x_n - \sqrt{a})^k} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1} + \sqrt{a}}{(x_n + \sqrt{a})^k} = \frac{1}{(2\sqrt{a})^{k-1}}.$$

1.5.2 写出通项求极限

利用不动点求通项

在前小节介绍了不动点迭代法, 下文将介绍如何运用不动点解决两种类型的数列通项问题.

例 1.5.7. 已知 $a_{n+1} = \frac{a \cdot a_n + b}{c \cdot a_n + d}$ ($c \neq 0$), 且 $ad - bc \neq 0$, a, b, c, d 都是常数, 求通项 a_n .

设 $f(x) = \frac{ax + b}{cx + d}$ ($c, ad - bc \neq 0$), $\{a_n\}$ 满足递归关系 $a_{n+1} = f(a_n)$, 且初始值 $a_1 \neq f(a_1)$.

(1) 若 f 有两相异的不动点 p, q , 则 $\frac{a_{n+1} - p}{a_{n+1} - q} = k \cdot \frac{a_n - p}{a_n - q}$, 其中 $k = \frac{a - pc}{b - qc}$, 即 $\left\{ \frac{a_n - p}{a_n - q} \right\}$ 是以 k 为公比的等比数列, 由此解得

$$a_n = \frac{(a_1 q - pq) k^{n-1} - (a_1 p - pq)}{(a_1 - p) k^{n-1} - (a_1 - q)}.$$

(2) 若 f 只有一个不动点 p , 则 $\frac{1}{a_{n+1} - p} = \frac{1}{a_n - p} + k$, 其中 $k = \frac{2c}{a + d}$, 即 $\left\{ \frac{1}{a_n - p} \right\}$ 是以 k 为公差的等差数列, 由此解得

$$a_n = \frac{a_1 - p}{(ka_1 - pk)n + 1 - ka_1 + pk} + k.$$

例 1.5.8. 已知 $a_{n+1} = \frac{a \cdot a_n^2 + b}{2a \cdot a_n + c}$ ($a \neq 0$), a, b, c 都是常数, 求通项 a_n .

设递归函数为 $f(x) = \frac{ax^2 + b}{2ax + c}$, 那么

1. 若 f 有两相异的不动点 p, q , 即 $p = \frac{ap^2 + b}{2ap + c}, q = \frac{aq^2 + b}{2aq + c}$, 则

$$a_{n+1} - p = \frac{a \cdot a_n^2 + b}{2a \cdot a_n + c} - p = \frac{a \cdot a_n^2 + b - 2apa_n - pc}{2a \cdot a_n + c} = \frac{a \cdot a_n^2 - 2apa_n + ap^2}{2a \cdot a_n + c} = \frac{a(a-p)^2}{2a \cdot a_n + c}$$

同理 $a_{n+1} - q = \frac{a(a_n - q)^2}{2a \cdot a_n + c}$, 两式相除, 得

$$\frac{a_{n+1} - p}{a_{n+1} - q} = \left(\frac{a_n - p}{a_n - q} \right)^2 = \left(\frac{a_{n-1} - p}{a_{n-1} - q} \right)^2 = \cdots = \left(\frac{a_1 - p}{a_1 - q} \right)^{2^{n-1}}$$

由此解得, $a_n = \frac{q(a_1 - p)^{2^{n-1}} - p(a_1 - q)^{2^{n-1}}}{(a_1 - p)^{2^{n-1}} - (a_1 - q)^{2^{n-1}}}$.

2. 若 f 有两相同的不动点 p , 易得 $p = -\frac{c}{2a}$, 由 $a_{n+1} - p = a_{n+1} + \frac{c}{2a} = \frac{a \cdot a_n^2 + b}{2a \cdot a_n + c} + \frac{c}{2a}$, 令 $b_n = a_n + \frac{c}{2a_n}$, 化简可得 $b_{n+1} = \frac{1}{2}b_n$, 即 $b_n = \left(a_1 + \frac{c}{2a} \right)^{2^{n-1}}$, 由此解得

$$a_n = \left(a_1 + \frac{c}{2a} \right) \left(\frac{1}{2} \right)^{n-1} - \frac{c}{2a}.$$

例 1.5.9. 设数列 $\{x_n\}$ 满足 $x_1 = 2, x_{n+1} = 2 + \frac{1}{x_n}$ ($n = 1, 2, \dots$), 证明数列 $\{x_n\}$ 收敛, 并求 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.

证法一 记 $f(x) = 2 + \frac{1}{x}$, 则 $x_{n+1} = f(x_n)$, 由 $f(x) = x$ 解得不动点为 $p = 1 + \sqrt{2}, q = 1 - \sqrt{2}$, 于是

$$\frac{x_n - p}{x_n - q} = \frac{q}{p} \cdot \frac{x_{n-1} - p}{x_{n-1} - q} = \dots = \left(\frac{q}{p}\right)^{n-1} \cdot \frac{x_1 - p}{x_2 - q}$$

而 $\left|\frac{q}{p}\right| = \left|\frac{1 - \sqrt{2}}{1 + \sqrt{2}}\right| < 1$, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n - p}{x_n - q} = 0 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 1 + \sqrt{2}$.

证法二 假设数列 $\{x_n\}$ 的极限存在, 不妨设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, 则由递推关系式两边取极限解得 $a = 1 \pm \sqrt{2}$, 又因为

$$x_{n+1} = \frac{1}{x_n} + 2 > 2$$

所以 $a \geq 2$, 故取 $a = 1 + \sqrt{2}$, 下证数列 $\{x_n\}$ 的极限存在,

$$\begin{aligned} |x_n - a| &= \left| \left(2 + \frac{1}{x_{n-1}}\right) - \left(2 + \frac{1}{a}\right) \right| = \left| \frac{1}{x_{n-1}} - \frac{1}{a} \right| = \frac{|x_{n-1} - a|}{ax_{n-1}} < \frac{|x_{n-1} - a|}{4} \\ &< \frac{1}{4^2} |x_{n-2} - a| < \dots < \left(\frac{1}{4}\right)^{n-1} \cdot |x_1 - a| = \left(\frac{1}{4}\right)^{n-1} \cdot |1 - \sqrt{2}| = \frac{\sqrt{2} - 1}{4^{n-1}} \end{aligned}$$

所以由夹逼准则或极限的定义得 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n - a) = 0$, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 1 + \sqrt{2}$.

推论 1.5.4. 一般地, 设 $a, b, x_1 > 0, x_n = a + \frac{b}{x_{n-1}}$ ($n = 2, 3, \dots$), 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \frac{a + \sqrt{4b + a^2}}{2}$.

例 1.5.10. 设数列 $\{x_n\}$ 满足 $x_1 > 0, x_{n+1} = \frac{C(1+x_n)}{C+x_n}$, $n = 1, 2, \dots$, $C > 1$ 为常数, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.

法一: 由递推关系式 $x_n = \frac{C(1+x_{n-1})}{C+x_{n-1}}$ 得

$$\begin{aligned} x_n + \sqrt{C} &= \sqrt{C} \cdot (1 + \sqrt{C}) \cdot \frac{x_{n-1} + \sqrt{C}}{x_{n-1} + C}, \\ \frac{1}{x_n + \sqrt{C}} &= \frac{1}{C + \sqrt{C}} \cdot \frac{x_{n-1} + C}{x_{n-1} + \sqrt{C}} = \frac{1}{C + \sqrt{C}} + \frac{C - \sqrt{C}}{C + \sqrt{C}} \cdot \frac{1}{x_{n-1} + \sqrt{C}} \end{aligned}$$

所以

$$\frac{1}{x_n + \sqrt{C}} - \frac{1}{2\sqrt{C}} = \frac{C - \sqrt{C}}{C + \sqrt{C}} \cdot \left(\frac{1}{x_{n-1} + \sqrt{C}} - \frac{1}{2\sqrt{C}} \right) = \dots = \left(\frac{C - \sqrt{C}}{C + \sqrt{C}} \right)^{n-1} \cdot \left(\frac{1}{x_1 + \sqrt{C}} - \frac{1}{2\sqrt{C}} \right)$$

因为 $\left| \frac{C - \sqrt{C}}{C + \sqrt{C}} \right| < 1$, 所以 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{C - \sqrt{C}}{C + \sqrt{C}} \right)^{n-1} = 0$, 从而 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{x_n + \sqrt{C}} = \frac{1}{2\sqrt{C}}$,

故 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n + \sqrt{C}) = 2\sqrt{C}$, 即得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \sqrt{C}$.

法二: 因为 $x_n > 0$ ($n = 1, 2, \dots$), $C > 1$, 且

$$x_{n+2} - x_{n+1} = \frac{C(1+x_{n+1})}{C+x_{n+1}} - x_{n+1} = \frac{C - x_{n+1}^2}{C+x_{n+1}} = \frac{C - \left(\frac{C(1+x_n)}{C+x_n}\right)^2}{C + \frac{C(1+x_n)}{C+x_n}} = \frac{(C-1)(C-x_n^2)}{(C+2x_n+1)(C+x_n)}$$

所以 $\frac{x_{n+2} - x_{n+1}}{x_{n+1} - x_n} = \frac{(C-1)(C-x_n^2)}{(C+2x_n+1)(C+x_n)} = \frac{C-1}{C+2x_n+1} > 0$, 于是 $x_{n+2} - x_{n+1}$ 与 $x_{n+1} - x_n$ 同号, 从而知 $\{x_n\}$

为单调递增数列, 又由 $0 < x_{n+1} = \frac{C(1+x_n)}{C+x_n} < \frac{C(1+x_n)}{1+x_n} = C$, 可知数列 $\{x_n\}$ 有界, 从而由单调有界原理知数列 $\{x_n\}$

收敛, 不妨记 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = l$, 则由递推关系式两边取极限得 $l = \frac{C(1+l)}{C+l}$, 解得 $l = \pm\sqrt{C}$, 而由 $x_n > 0$, 知 $l \geq 0$, 故取 $l = \sqrt{C}$, 即得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \sqrt{C}$.

法三：假设数列 $\{x_n\}$ 收敛，不妨设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = A$ ，则由递推关系式两边取极限，得 $A = \frac{C(1+A)}{C+A}$ ，解得 $A = \pm\sqrt{C}$ ，又因为 $x_n > 0$ ，所以 $A \geq 0$ ，故 $A = \sqrt{C}$ ，以下证明数列 $\{x_n\}$ 收敛且以 \sqrt{C} 为极限，因为

$$\begin{aligned} |x_n - \sqrt{C}| &= \left| \frac{C(1+x_{n-1})}{C+x_{n-1}} - \sqrt{C} \right| = \left| \frac{(C-\sqrt{C}) \cdot (x_{n-1} - \sqrt{C})}{C+x_{n-1}} \right| < \frac{C-\sqrt{C}}{C} \cdot |x_{n-1} - \sqrt{C}| \\ &< \left(\frac{C-\sqrt{C}}{C} \right)^{n-1} \cdot |x_1 - \sqrt{C}| \end{aligned}$$

且 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{C-\sqrt{C}}{C} \right)^{n-1} = 0$ ，所以由夹逼准则得 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_n - \sqrt{C}| = 0$ ，即得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \sqrt{C}$ 。

法四：令 $f(x) = \frac{C(1+x)}{C+x}$ ，则由 $f(x) = x$ 求得 $f(x)$ 的不动点 $x_1 = \sqrt{C}, x_2 = -\sqrt{C}$ ，于是

$$x_n - \sqrt{C} = \frac{(C-\sqrt{C}) \cdot (x_{n-1} - \sqrt{C})}{C+x_{n-1}}, \quad x_n + \sqrt{C} = \frac{(C+\sqrt{C}) \cdot (x_{n-1} + \sqrt{C})}{C+x_{n-1}}$$

从而

$$\frac{x_n - \sqrt{C}}{x_n + \sqrt{C}} = \frac{C-\sqrt{C}}{C+\sqrt{C}} \cdot \frac{x_{n-1} - \sqrt{C}}{x_{n-1} + \sqrt{C}} = \cdots = \left(\frac{C-\sqrt{C}}{C+\sqrt{C}} \right)^{n-1} \cdot \frac{x_1 - \sqrt{C}}{x_1 + \sqrt{C}}$$

故由 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{C-\sqrt{C}}{C+\sqrt{C}} \right)^{n-1} = 0$ 得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n - \sqrt{C}}{x_n + \sqrt{C}} = 0$ ，即得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \sqrt{C}$ 。

利用生成函数求通项

生成函数又称为“母函数”，当想要了解某数列 $\{a_n\}_0^\infty$ 时，通常设为 $f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n$ ，即只通过一个参数 t 表示整个数列。

定理 1.5.4 (加法性质). 若 $f(t)$ 是 $\{a_n\}_0^\infty$ 的生成函数， $g(t)$ 是 $\{b_n\}_0^\infty$ 的生成函数，则 $\alpha f(t) + \beta g(t)$ 是 $\{\alpha a_n + \beta b_n\}_0^\infty$ 的生成函数。

$$\alpha \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n + \beta \sum_{n=0}^{\infty} b_n t^n = \sum_{n=0}^{\infty} (\alpha a_n + \beta b_n) t^n.$$

定理 1.5.5 (移位性质). 若 $f(t)$ 是 $\{a_n\}_0^\infty$ 的生成函数，则 $t^m f(t)$ 是 $\{a_{n-m}\}_m^\infty$ 的生成函数。

$$t^m \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n = \sum_{n=m}^{\infty} a_{n-m} t^n.$$

定理 1.5.6 (变换性质). 显然 $f(ct)$ 是序列 $a_0, ca_1, c^2 a_2, \dots$ 的生成函数，特别地 $1, c, c^2, c^3, \dots$ 的生成函数是 $\frac{1}{1-ct}$ ，在数列里每隔一项取项时，有以下常用的技巧：

$$\begin{aligned} \frac{f(t) + f(-t)}{2} &= a_0 + a_2 t^2 + a_4 t^4 + \dots \\ \frac{f(t) - f(-t)}{2} &= a_1 t + a_3 t^3 + a_5 t^5 + \dots \end{aligned}$$

利用单位复根, 可以推广到每隔 $m - 1$ 取第 m 项: 令 $\omega = e^{2\pi i/m} = \cos\left(\frac{2\pi}{m}\right) + i \sin\left(\frac{2\pi}{m}\right)$, 有

$$\sum_{n \leq 0, n \bmod m=r} a_n t^n = \frac{1}{m} \sum_{0 \leq k \leq m} \omega^{-kr} f(\omega^k t) \quad (0 \leq r < m).$$

例 1.5.11. 设数列 $\{x_n\}$ 满足: $x_0 = a, x_1 = b, x_{n+1} = \frac{x_n + x_{n-1}}{2}, n = 1, 2, 3, \dots$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.

令 $f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x_n t^n$, 则

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} x_n t^n = a + bt + \sum_{n=2}^{\infty} x_n t^n = a + bt + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{x_{n-1} + x_{n-2}}{2} t^n \\ &= a + bt + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}t \sum_{n=2}^{\infty} x_{n-1} t^{n-1} + \frac{1}{2}t^2 \sum_{n=2}^{\infty} x_{n-2} t^{n-2} = a + bt + \frac{1}{2}t \sum_{n=0}^{\infty} x_{n+1} t^{n+1} + \frac{1}{2}t^2 \sum_{n=0}^{\infty} x_n t^n \\ &= a + bt + \frac{1}{2}t(f(t) - a) + \frac{1}{2}t^2 f(t) \end{aligned}$$

$$\text{即 } f(t) = \frac{a + bt - \frac{1}{2}at}{1 - \frac{1}{2}t^2 - \frac{1}{2}t} = \frac{2a + 2bt - at}{2 - t - t^2} = \frac{2a + 2bt - at}{(2+t)(1-t)} = \frac{A}{2+t} + \frac{B}{1-t}, \text{ 比较系数,}$$

$$\text{解得 } A = \frac{4a - 3b}{3}, B = \frac{2b + a}{3}, \text{ 那么}$$

$$f(t) = \frac{4a - 3b}{3} \cdot \frac{1}{2+t} + \frac{2b + a}{3} \cdot \frac{1}{1-t} = \frac{4a - 3b}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \left(-\frac{1}{2}\right)^n t^n + \frac{2b + a}{3} \sum_{n=0}^{\infty} t^n$$

$$\text{从而 } x_n = \frac{4a - 3b}{6} \left(-\frac{1}{2}\right)^n + \frac{2b + a}{3} \rightarrow \frac{2b + a}{3} \quad (n \rightarrow \infty).$$

推论 1.5.5. 一般地, 设 $x_0, x_1 > 0, x_{n+1} = kx_n + lx_{n-1} (n = 1, 2, \dots)$, 其中 $k, l > 0$ 且 $k + l = 1$, 则数列 $\{x_n\}$ 收敛, 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \frac{x_1 + lx_0}{1 + l}$.

1.5.3 求解线性递推关系

定义 1.5.1. 一个常系数的 k 阶线性齐次递推关系是形如

$$a_n = c_1 a_{n-1} + c_2 a_{n-2} + \dots + c_k a_{n-k}$$

的递推关系, 其中 c_1, c_2, \dots, c_k 是实数, $c_k \neq 0$.

这个定义中的递推关系是线性的, 因为它的右边是数列前项的倍数之和; 这个递推关系是齐次的, 因为所出现的各项都是 a_j 的倍数.

求解常系数线性齐次递推关系

求解常系数线性齐次递推关系的基本方法是寻找形如 $a_n = r^n$ 的解, 其中 r 是常数, 注意 $a_n = r^n$ 是递推关系 $a_n = c_1 a_{n-1} + c_2 a_{n-2} + \dots + c_k a_{n-k}$ 的解, 当且仅当

$$r^n = c_1 r^{n-1} + c_2 r^{n-2} + \dots + c_k r^{n-k}$$

当等式的两边除以 r^{n-k} 并且从左边减去右边时, 可得到等价的方程

$$r^k - c_1 r^{k-1} - c_2 r^{k-2} - \cdots - c_{k-1} r - c_k = 0.$$

因此, 数列 $\{x_n\}$ 以 $a_n = r^n$ 作为解, 当且仅当 r 是这后一个方程的解. 这个方程叫做该递推关系的特征方程, 方程的解叫做这个递推关系的特征根.

定理 1.5.7 (常系数线性齐次递推定理). 设 c_1 和 c_2 是实数, 假设 $r^2 - c_1 r - c_2 = 0$ 有两个不相等的根 r_1 和 r_2 , 那么数列 $\{x_n\}$ 是递推关系 $a_n = c_1 a_{n-1} + c_2 a_{n-2}$ 的解, 当且仅当 $a_n = \alpha_1 r_1^n + \alpha_2 r_2^n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), 其中 α_1 和 α_2 是常数.

例 1.5.12. 设 $a_0 = 2, a_1 = 7$, 且数列 $\{a_n\}$ 满足 $a_n = a_{n-1} + 2a_{n-2}$, 求数列 $\{a_n\}$ 的通项.

由递推关系得特征方程为 $r^2 - r - 2 = 0$, 解得根为 $r_1 = 2, r_2 = -1$, 因此数列 $\{a_n\}$ 是递推关系解当且仅当

$$\begin{aligned} a_n &= \alpha_1 \cdot 2^n + \alpha_2 \cdot (-1)^n \\ \alpha_{1,2} \text{ 均是常数, 由初始条件得 } \begin{cases} a_0 = 2 = \alpha_1 + \alpha_2 \\ a_1 = 7 = \alpha_1 \cdot 2 + \alpha_2 \cdot (-1) \end{cases} &\Rightarrow \begin{cases} \alpha_1 = 3 \\ \alpha_2 = -1 \end{cases}, \text{ 所以} \\ a_n &= 3 \cdot 2^n - (-1)^n. \end{aligned}$$

定理 1.5.8. 设 c_1 和 c_2 是实数, $c_2 \neq 0$, 假设 $r^2 - c_1 r - c_2 = 0$ 只有一个根 r_0 , 数列 $\{a_n\}$ 是递推关系 $a_n = c_1 a_{n-1} + c_2 a_{n-2}$ 的解, 当且仅当 $a_n = \alpha_1 r_0^n + \alpha_2 n r_0^n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), 其中 α_1 和 α_2 是常数.

例 1.5.13. 求具有初始条件 $a_0 = 1$ 和 $a_1 = 6$ 的递推关系 $a_n = 6a_{n-1} - 9a_{n-2}$ 的解.

$r^2 - 6r + 9 = 0 \Rightarrow r = 3$, 因此递推关系的解为 $a_n = \alpha_1 3^n + \alpha_2 n 3^n$, 又由初始条件可解得 $\alpha_1 = 1 = \alpha_2$, 因此解为 $a_n = 3^n + n \cdot 3^n$.

定理 1.5.9. 设 c_1, c_2, \dots, c_k 是实数, 假设特征方程

$$r^k - c_1 r^{k-1} - \cdots - c_k = 0$$

有 k 个不相等的根 r_1, r_2, \dots, r_k , 那么数列 $\{a_n\}$ 是递推关系

$$a_n = c_1 a_{n-1} + c_2 a_{n-2} + \cdots + c_k a_{n-k}$$

的解, 当且仅当

$$a_n = \alpha_1 r_1^n + \alpha_2 r_2^n + \cdots + \alpha_k r_k^n$$

$n = 0, 1, 2, \dots, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ 是常数.

某些具有非线性递推关系的数列可化为线性形式处理.

例 1.5.14. 设 $x_0 = 1, x_1 = e, x_{n+1} = \sqrt{x_n x_{n-1}}$ ($n = 1, 2, \dots$), 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.

由已知可得出 $x_n > 0$ ($n = 1, 2, \dots$), 且 $\ln x_{n+1} = \frac{1}{2}(\ln x_n - \ln x_{n-1})$, 令 $a_n = \ln x_n$, 则

$$a_0 = 0, a_1 = 1, a_{n+1} = \frac{a_n + a_{n-1}}{2} \quad (n = 1, 2, \dots)$$

即化为例 1.5.11, 最后解得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = e^{2/3}$.

第 2 章

一元函数微分学

“宇宙之大，粒子之微，火箭之速，化工之巧，地球之变，
生物之谜，日用之繁，无处不用数学。”

——华罗庚

在几何上函数的导数即为切线的斜率，在力学上路程函数的导数就是速度，导数还有更广泛的物理意义。一元函数微分学在高等数学中占有极其重要的位置，内容多且范围广，绝大多数章节均涉及到它，本章也是考研数学复习的重点章。

2.1 导数与微分

导数和微分都是描述函数变化率的概念，但是它们有一些不同之处。

导数是函数在某一点的变化率，表示函数在该点的斜率。导数可以用极限的概念来定义，即函数在某一点的导数等于该点的函数值的极限与该点的自变量取值的极限的比值。导数可以用符号表示为 $f'(x)$ ，表示函数 f 在点 x 处的导数。

微分是函数在某一点的线性近似，表示函数在该点的局部变化率。微分可以用导数来计算，即函数在某一点的微分等于函数在该点的导数与自变量的微小增量的乘积。微分可以用符号表示为 $df(x)$ ，表示函数 f 在点 x 处的微分。

2.1.1 导数的定义与可微性质

导数定义的运用

定义 2.1.1 (导数). 设函数 $y = f(x)$ 在点 x_0 的某邻域内有定义，当自变量 x 在点 x_0 处取得增量 Δx ($\Delta x \neq 0$) 时，相应地，函数 y 取得增量 $\Delta y = f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)$ ，如果极限

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$$

存在, 则称函数 $y = f(x)$ 在点 x_0 处可导, 并称整个极限值为函数 $y = f(x)$ 在点 x_0 处的导数, 记作 $f'(x_0)$, $y'(x_0)$, $\left.\frac{dy}{dx}\right|_{x=x_0}$, 如果记 $x = x_0 + \Delta x$, 则导数又可表示为 $f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$.

例 2.1.1 (2004 数一). 设函数 $f(x)$ 连续, 且 $f'(0) > 0$, 则存在 $\delta > 0$, 使得

- A. $f(x)$ 在 $(0, \delta)$ 内单调递增
- B. $f(x)$ 在 $(-\delta, 0)$ 内单调递增
- C. 对任意 $x \in (0, \delta)$ 有 $f(x) > f(0)$
- D. 对任意 $x \in (-\delta, 0)$ 有 $f(x) > f(0)$

由于 $f'(0) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(0)}{x} > 0$, 所以由函数极限的局部保号性知, 存在 $\delta > 0$, 使得当 $0 < |x| < \delta$ 时, $\frac{f(x) - f(0)}{x} > 0$, 则当 $x \in (-\delta, 0)$ 时, $f(x) - f(0) < 0$, 即有 $f(x) < f(0)$; 当 $x \in (0, \delta)$ 时, $f(x) - f(0) > 0$, 即有 $f(x) > f(0)$, 因此选 C.

推论 2.1.1. 若 $f'(x_0) > 0$, 则存在 $\delta > 0$, 当 $x \in (x_0 - \delta, x_0)$ 时, $f(x) < f(x_0)$; 当 $x \in (x_0, x_0 + \delta)$ 时, $f(x) > f(x_0)$, 同理 $f'(x_0) < 0$ 也有类似结论.

例 2.1.2. 下列 f 在 x_0 的某个邻域内均有定义, 哪项极限式能作为 f 在 x_0 处的导数定义?

- A. $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x}$
- B. $\lim_{n \rightarrow \infty} n \left[f\left(x_0 + \frac{1}{n}\right) - f(x_0) \right]$
- C. $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + x^2) - f(x_0)}{x^2}$
- D. $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x_0) - f(x_0 - x)}{x}$

按照定义 2.1.1, 不但要求 f 在 x_0 的某个邻域内有定义, 而且 f 在 x_0 处的导数 $f'(x_0)$ 是否存在以及 $f'(x_0)$ 的值的大小都与 f 在 x_0 处的值 $f(x_0)$ 有关, 由此可知 A 不能作为 f 在 x_0 处导数的定义, 实际上, 从 A 的分子结构易见, 该极限存在与否同 f 在 x_0 处的值无关, 即使 f 在点 x_0 处没有定义, 或者有定义但不连续, A 极限也可能存在, 例如,

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x^2}, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$$

在点 $x = 0$ 处不连续 ($x = 0$ 为第二类间断点), 因而在 $x = 0$ 处必不可导, 但极限却存在

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(0 + \Delta x) - f(0 - \Delta x)}{2\Delta x} = \frac{1}{2} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{(\Delta x)^2} - \frac{1}{(\Delta x)^2}}{\Delta x} = 0$$

因此, 用 A 极限来定义函数 f 在点 x_0 处的导数是不恰当的, 实际上, 对于任何偶函数 f , 在点 $x_0 = 0$ 处 A 极限总存在, 且

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(0 + \Delta x) - f(0 - \Delta x)}{2\Delta x} = 0$$

但根据定义 2.1.1 却不一定存在, 也就是说, 函数 f 在点 $x_0 = 0$ 处不一定可导;

B 极限也不能作为 f 在点 x_0 处的导数定义, 因为

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} n \left[f\left(x_0 + \frac{1}{n}\right) - f(x_0) \right] \not\Rightarrow \exists \lim_{x \rightarrow h} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

例如, 函数 $f(x) = \begin{cases} 1, & x \text{ 为无理数} \\ 0, & x \text{ 为有理数} \end{cases}$ 处处有定义, 处处不连续, 从而处处不可导, 但是,

$$\forall x \in \mathbb{R}, \lim_{n \rightarrow \infty} n \left[f\left(x_0 + \frac{1}{n}\right) - f(x_0) \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f\left(x_0 + \frac{1}{n}\right) - f(x_0)}{\frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{0}{\frac{1}{n}} = 0$$

C 极限也不能作为 f 在 x_0 处导数的定义, 实际上, 极限

$$\exists \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + x^2) - f(x_0)}{x^2} \Leftrightarrow \exists f'_+(x_0)$$

由此不能推出定义 2.1.1 存在, 例如函数 $f(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$ 虽然极限

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

但是由于 $f(x)$ 在 $x=0$ 处不连续, 所以它在点 $x=0$ 处不可导;
D 极限与导数定义等价, 因为

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x_0) - f(x_0 - x)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 - x) - f(x_0)}{-x} \xrightarrow{h=-x} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} = f'(x_0).$$

综上所述, 选 D.

例 2.1.3 (2011 数二). 已知 $f(x)$ 在 $x=0$ 处可导, 且 $f(0)=0$, 则 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 f(x) - 2f(x^3)}{x^3}$ 等于

A. $-2f'(0)$

B. $-f'(0)$

C. $f'(0)$

D. 0

法一: 凑导数定义,

$$\text{原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 f(x) - x^2 f(0) + 2f(0) - 2f(x^3)}{x^3} = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{f(x) - f(0)}{x} - 2 \frac{f(x^3) - f(0)}{x^3} \right) = f'(0) - 2f'(0) = -f'(0)$$

法二: 由于 $f(x)$ 在 $x=0$ 处可导, 则

$$f(x) = f(0) + f'(0)x + o(x) = f'(0)x + o(x), \quad f(x^3) = f'(0)x^3 + o(x^3)$$

于是

$$\text{原式} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2(f'(0)x + o(x)) - 2(f'(0)x^3 + o(x))}{x^3} = f'(0) - 2f'(0) = -f'(0).$$

例 2.1.4. 证明: $\left(\frac{ax+b}{cx+d} \right)' = \frac{1}{(cx+d)^2} \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix}$.

$$\text{证 } \left(\frac{ax+b}{cx+d} \right)' = \frac{a(cx+d) - c(ax+b)}{(cx+d)^2} = \frac{ad - bc}{(cx+d)^2} \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \quad (cx+d \neq 0).$$

例 2.1.5. 求下列一阶导数

$$(1) F(x) = \begin{vmatrix} x-1 & 1 & 2 \\ -3 & x & 3 \\ -2 & -3 & x+1 \end{vmatrix}. \quad (2) F(x) = \begin{vmatrix} x & x^2 & x^3 \\ 1 & 2x & 3x^2 \\ 0 & 2 & 6x \end{vmatrix}.$$

(1) 利用例 9.1.3 的结论, 有

$$\begin{aligned} F'(x) &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -3 & x & 3 \\ -2 & -3 & x+1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x-1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -2 & -3 & x+1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x-1 & 1 & 2 \\ -3 & x & 3 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \\ &= (x^2 + x + 9) + (x^2 - 1 + 4) + (x^2 - x + 3) = 3(x^2 + 5). \end{aligned}$$

$$(2) \text{ 同上, 有 } F'(x) = \begin{vmatrix} 1 & 2x & 3x^2 \\ 1 & 2x & 3x^2 \\ 0 & 2 & 6x \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x & x^2 & x^3 \\ 0 & 2 & 6x \\ 0 & 2 & 6x \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x & x^2 & x^3 \\ 1 & 2x & 3x^2 \\ 0 & 0 & 6 \end{vmatrix} = 0 + 0 + 6(2x^2 - x^2) = 6x^2.$$

例 2.1.6. 设 $f(x)$ 在 $x=0$ 处可导, $f(0) \neq 0$, $f'(0) \neq 0$, 且

$$af(h) + bf(2h) - f(0) = o(h) \quad h \rightarrow 0$$

求 a, b .

两边同时除以 h , 有

$$o(1) = \frac{af(h) + bf(2h) - f(0)}{h} = a \cdot \frac{f(h) - f(0)}{h} + 2b \cdot \frac{f(2h) - f(0)}{2h} + \frac{(a+b-1)f(0)}{h}$$

令 $h \rightarrow 0$ 得方程组 $\begin{cases} a+2b=0 \\ a+b-1=0 \end{cases} \Rightarrow a=2, b=-1.$

例 2.1.7. 设 $f(0)=0, f'(0)=A$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n f\left(\frac{k}{n^2}\right)$.

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left| \frac{f(x) - f(0)}{x} - f'(0) \right| = 0 \Rightarrow \frac{f(x) - f(0)}{x} - f'(0) = o(1) \Rightarrow f(x) = x \cdot o(1) + xf'(0) + f(0), \text{ 故}$$

$$f\left(\frac{k}{n^2}\right) = \frac{k}{n^2} \cdot o(1) + \frac{k}{n^2} f'(0) + f(0) = \frac{k}{n^2} (A + o(1)) \quad (n \rightarrow \infty)$$

因此

$$\sum_{k=1}^n f\left(\frac{k}{n^2}\right) = \sum_{k=1}^n \frac{k}{n^2} (A + o(1)) = \frac{n+1}{2n} (A + o(1)) \quad (n \rightarrow \infty)$$

取极限有 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n f\left(\frac{k}{n^2}\right) = \frac{A}{2}$.

例 2.1.8. 设 $f(x)$ 在 $x=x_0$ 处可微, $\alpha_n < x_0 < \beta_n$ ($n=1, 2, \dots$), $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \beta_n = x_0$, 证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(\beta_n) - f(\alpha_n)}{\beta_n - \alpha_n} = f'(x_0).$$

证 首先, 容易得到

$$\begin{aligned} \frac{f(\beta_n) - f(\alpha_n)}{\beta_n - \alpha_n} &= \frac{f(\beta_n) - f(x_0) + f(x_0) - f(\alpha_n)}{\beta_n - \alpha_n} \\ &= \frac{\beta_n - x_0}{\beta_n - \alpha_n} \frac{f(\beta_n) - f(x_0)}{\beta_n - x_0} - \frac{\alpha_n - x_0}{\beta_n - \alpha_n} \frac{f(\alpha_n) - f(x_0)}{\alpha_n - x_0} \end{aligned}$$

若记 $\lambda_n = \frac{\beta_n - x_0}{\beta_n - \alpha_n}$, 那么 $\frac{x_0 - \alpha_n}{\beta_n - \alpha_n} = 1 - \lambda_n$, 且 $0 < \lambda_n < 1, 0 < 1 - \lambda_n < 1$, 故上式可改写为

$$\frac{f(\beta_n) - f(\alpha_n)}{\beta_n - \alpha_n} = \lambda_n \frac{f(\beta_n) - f(x_0)}{\beta_n - x_0} + (1 - \lambda_n) \frac{f(\alpha_n) - f(x_0)}{\alpha_n - x_0}$$

即 $f'(x_0) = \lambda_n f'(x_0) + (1 - \lambda_n) f'(x_0)$, 故有 $\forall \varepsilon > 0, \exists N > 0$, 当 $n > N$ 时,

$$\begin{aligned} \left| \frac{f(\beta_n) - f(\alpha_n)}{\beta_n - \alpha_n} - f'(x_0) \right| &\leq \lambda_n \left| \frac{f(\beta_n) - f(x_0)}{\beta_n - x_0} - f'(x_0) \right| + (1 - \lambda_n) \left| \frac{f(\alpha_n) - f(x_0)}{\alpha_n - x_0} - f'(x_0) \right| \\ &< \lambda_n \varepsilon + (1 - \lambda_n) \varepsilon = \varepsilon \end{aligned}$$

原极限获证.

例 2.1.9. 设 $f(x)$ 在 $x=0$ 处连续, 且 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(2x) - f(x)}{x} = A$, 求证: $f'(0)$ 存在, 并且 $f'(0) = A$.

证 因已知 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(2x) - f(x)}{x} = A$, 即 $\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0$, 当 $|x| < \delta$ 时, 有

$$A - \frac{\varepsilon}{2} < \frac{f(2x) - f(x)}{x} < A + \frac{\varepsilon}{2}$$

特别地, 取 $x_n = \frac{x}{2^k}$ ($k \in \mathbb{N}$), 上式亦成立, 则有

$$\frac{1}{2^k} \left(A - \frac{\varepsilon}{2} \right) < \frac{f\left(\frac{x}{2^{k-1}}\right) - f\left(\frac{x}{2^k}\right)}{x} < \frac{1}{2^k} \left(A + \frac{\varepsilon}{2} \right)$$

将此 n 式相加, 得

$$\sum_{k=1}^n \left[f\left(\frac{x}{2^{k-1}}\right) - f\left(\frac{x}{2^k}\right) \right] = f(x) - f\left(\frac{x}{2^n}\right) = f(x) - f(x_n)$$

因为 $\sum_{k=1}^n \frac{1}{2^k} = 1 - \frac{1}{2^k}$, 于是

$$\left(1 - \frac{1}{2^n}\right) \left(A - \frac{\varepsilon}{2}\right) < \frac{f(x) - f(x_n)}{x} < \left(1 - \frac{1}{2^n}\right) \left(A + \frac{\varepsilon}{2}\right)$$

再令 $n \rightarrow \infty$, 取极限, 有 $x_n = \frac{x}{2^n} \rightarrow 0$, 而 f 在 $x = 0$ 处连续, $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = f(0)$, 故

$$A - \frac{\varepsilon}{2} \leq \frac{f(x) - f(0)}{x} \leq A + \frac{\varepsilon}{2}$$

即 $\left| \frac{f(x) - f(0)}{x} - A \right| \leq \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon$, $f'(0)$ 存在且 $f'(0) = A$.

两种符号的区别

定义 2.1.2 (左右导数). 若极限 $\lim_{\Delta x \rightarrow 0^-} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0^-} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$ 存在, 则该极限值称为 $f(x)$ 在点 x_0 处的左导数, 记作 $f'_-(x_0)$. 同理可得右导数的定义.

$f'_-(x_0)$ ($f'_+(x_0)$) 表示函数在点 x_0 处的左 (右) 导数, 而 $\lim_{x \rightarrow x_0^-} (\lim_{x \rightarrow x_0^+})$ 表示导函数在 x_0 处的左 (右) 极限, 一般情况下 $f'_\pm(x_0) \neq \lim_{x \rightarrow x_0^\pm} f'(x)$.

定理 2.1.1 (函数的可导性与连续性). 若函数 $y = f(x)$ 在点 x_0 可导, 则 $y = f(x)$ 在点 x_0 必连续, 但连续不一定可导.

函数在某一点可导不能保证它在该点的某一邻域内可导, 例如: $f(x) = \begin{cases} x^2, & x \text{ 为无理数} \\ 0, & x \text{ 为有理数} \end{cases}$

函数在某一点可导不能保证其导函数在该点连续, 例如: $f(x) = \begin{cases} x^2 \sin \frac{1}{x}, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$

两个函数至少有一个不可导, 那么复合后不一定不可导.

例 2.1.10. 设函数 $f(x) = \begin{cases} \frac{x}{1 + e^{\frac{1}{x}}}, & x < 0 \\ 0, & x = 0 \\ \frac{2x}{1 + e^x}, & x > 0 \end{cases}$ 求函数在点 $x = 0$ 处的导数.

$f(x)$ 是分段函数, 按定义分别求 $f(x)$ 在 $x = 0$ 处的左、右导数,

$$f'_-(0) = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{\frac{x}{1 + e^{\frac{1}{x}}} - 0}{x} = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{1}{1 + e^{\frac{1}{x}}} = 1, \quad f'_+(0) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\frac{2x}{1 + e^x} - 0}{x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{2}{1 + e^x} = 1$$

因为左右导数相等, 所以 $f'(0) = 1$.

例 2.1.11 (2018 数一). 下列函数中, 在 $x = 0$ 处不可导的是

- A. $f(x) = |x| \sin |x|$ B. $f(x) = |x| \sin \sqrt{|x|}$ C. $f(x) = \cos |x|$ D. $f(x) = \cos \sqrt{|x|}$

对选项 D, 有导数定义知

$$f'_-(0) = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{\cos \sqrt{|x|} - 1}{x} = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{-\frac{1}{2}|x|}{x} = \frac{1}{2}, \quad f'_+(0) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\cos \sqrt{|x|} - 1}{x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{-\frac{1}{2}|x|}{x} = -\frac{1}{2}$$

则 $f(x) = \cos \sqrt{|x|}$ 在 $x = 0$ 处不可导, 故选 D.

2.1.2 反函数、用参数方程确定的函数、隐函数的导数

定理 2.1.2 (反函数的导数). 导数 $f'(x) \neq 0$ 的可微函数 $y = f(x)$ ($a < x < b$) 具有单值连续的反函数 $x = f^{-1}(y)$, 此反函数可微, 那么

$$x'_y = \frac{1}{y'_x}$$

反函数的导数等于原函数的导数的倒数.

例 2.1.12. 设 $f(x)$ 为单调可微函数, $g(x)$ 与 $f(x)$ 互为反函数, 且 $f(2) = 4, f'(2) = \sqrt{5}, f'(4) = 6$, 则 $g'(4)$ 等于

- A. $\frac{1}{4}$ B. $\frac{1}{\sqrt{5}}$ C. $\frac{1}{6}$ D. 4

$$f(2) = 4 \Leftrightarrow g(4) = 2, \text{ 故 } g'(4) = \frac{1}{f'(2)} = \frac{1}{\sqrt{5}}, \text{ 选 B.}$$

定理 2.1.3 (用参数方程确定的函数的导数). 若方程组 $\begin{cases} x = \varphi(t) \\ y = \psi(t) \end{cases}$ ($\alpha < t < \beta$), 其中 $\varphi(t)$ 和 $\psi(t)$ 为可微函数, 且 $\varphi'(t) \neq 0$, 在某区域内确定 y 为 x 的单值连续函数: $y = \psi(\varphi^{-1}(x))$, 则此函数的导数为

$$y'_x = \frac{y'_t}{x'_t}.$$

例 2.1.13 (2017 数二). 设函数 $y = y(x)$ 由参数方程 $\begin{cases} x = t + e^t \\ y = \sin t \end{cases}$ 确定, 求 $\left. \frac{d^2y}{dx^2} \right|_{x=0}$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dt} \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)^{-1} = \frac{\cos t}{1 + e^t}, \text{ 那么}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{dy}{dx} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dx} \right) \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)^{-1} = \frac{-\sin t(1 + e^t) - e^t \cos t}{(1 + e^t)^3}$$

$$\text{因此 } \left. \frac{d^2y}{dx^2} \right|_{x=0} = -\frac{1}{8}.$$

定理 2.1.4 (隐函数的导数). 若可微函数 $y = y(x)$ 满足方程 $F(x, y) = 0$, 则此隐函数的导数为

$$\frac{d}{dx}[F(x, y)] = 0.$$

例 2.1.14. 设 $u = xy + y^2$, 其中 $y = y(x)$ 是由 $x^2 + y^2 = 5$ 确定的函数, 求 $\left. \frac{du}{dx} \right|_{\substack{x=2 \\ y=-1}}$.

等式两边同时对 x 求导, $\begin{cases} \frac{du}{dx} = y + \frac{dy}{dx} + 2y \frac{dy}{dx} \\ 2x + 2y \frac{dx}{dy} = 0 \end{cases}$, 并将 $x = 2, y = -1$ 代入, 得 $\left. \frac{du}{dx} \right|_{\substack{x=2 \\ y=-1}} = -1$.

例 2.1.15. 设 $y = y(x)$ 由方程 $x^3 + y^3 + xy = 1$ 确定, 求 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{3y + x - 3}{x^2}$.

当 $x = 0$ 时, $y(0) = 1$, 方程 $x^3 + y^3 + xy = 1$ 两边同时对 x 求导, 得

$$3x^2 + 3y^2 \cdot y' + y + xy' = 0 \Rightarrow y'(0) = -\frac{1}{3}$$

继续对 x 求导, 得

$$6x + 6y \cdot (y')^2 + 3y^2 \cdot y'' + 2y' + xy'' = 0 \Rightarrow y''(0) = 0$$

将 $y(x)$ 在 $x = 0$ 处 Taylor 展开, 得

$$y(x) = y(0) + y'(0)x + \frac{1}{2}y''(0)x^2 + o(x^2)$$

于是待求极限式等于 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{3 - x + o(x^2) + x - 3}{x^2} = 0$.

例 2.1.16 (2007 数二). 已知函数 $f(u)$ 具有二阶导数, 且 $f'(0) = 1$, 函数 $y = y(x)$ 由方程 $y - xe^{y-1} = 1$ 所确定, 设 $z = f(\ln y - \sin x)$, 求 $\left. \frac{dz}{dx} \right|_{x=0}, \left. \frac{d^2z}{dx^2} \right|_{x=0}$.

当 $x = 0$ 时, 由 $y - xe^{y-1} = 1$ 知 $y = 1$, 并且对方程 $y - xe^{y-1} = 1$ 两端的 x 求导, 得 $y' - (e^{y-1} + xe^{y-1} \cdot y') = 0$, 将 $x = 0, y = 1$, 代入该式求得 $y'(0) = 1$, 那么 $\left. \frac{dz}{dx} \right|_{x=0} = f'(\ln y - \sin x) \left(\frac{y'}{y} - \cos x \right) \Big|_{x=0} = 0$, 且

$$y'' - [2e^{y-1} \cdot y' + x(e^{y-1} \cdot y'^2 + e^{y-1} \cdot y'')] = 0$$

解得 $y''(0) = 0$, 那么

$$\left. \frac{d^2z}{dx^2} \right|_{x=0} = f''(\ln y - \sin x) \left(\frac{y'}{y} - \cos x \right)^2 + f'(\ln y - \sin x) \left(\frac{y'' \cdot y - y'^2}{y^2} + \sin x \right) \Big|_{x=0} = f'(0)(2 - 1) = f'(0) = 1.$$

例 2.1.17. 设函数 $y = y(x)$ 由方程组 $\begin{cases} x = 3t^2 + 2t + 3 \\ e^y \sin t - y + 1 = 0 \end{cases}$ 所确定, 试求 $\left. \frac{d^2y}{dx^2} \right|_{t=0}$.

对方程组每个方程两边分别取微分, 得 $\begin{cases} dx = 6tdt + 2dt \\ e^y \sin t dy + e^y \cos t dt - dy = 0 \end{cases}$ 则 $\frac{dx}{dt} = 6t + 2, \frac{dy}{dt} = \frac{e^y \cos t}{1 - e^y \sin t}$, 那么

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dt} \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)^{-1} = \frac{e^y \cos t}{(1 - e^y \sin t)(6t + 2)} = \frac{e^y \cos t}{(2 - y)(6t + 2)}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d}{dt} \left[\frac{e^y \cos t}{(2 - y)(6t + 2)} \right] \left(\frac{dt}{dx} \right) = \frac{(e^y y'_t \cos t - e^y \sin t)(2 - y)(6t + 2) - [(-y'_t)(6t + 2) + 6(2 - y)]e^y \cos t}{(2 - y)^2(6t + 2)^3}$$

由 $\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0}, \left. y \right|_{t=0} = 1$, 代入上式, 得 $\left. \frac{d^2y}{dx^2} \right|_{t=0} = \frac{e(2e - 3)}{4}$.

例 2.1.18. 求下列 y'_x (参数均为正实数, 且 $r = \sqrt{x^2 + y^2}, \varphi = \arctan \frac{y}{x}$).

(1) $x = \sin^2 t$ $y = \cos^2 t$. (4) $\sqrt{x} + \sqrt{y} = \sqrt{a}$. (7) $r = a\varphi$.	(2) $x = a \cos t$ $y = b \sin t$. (5) $x^{\frac{2}{3}} + y^{\frac{2}{3}} = a^{\frac{2}{3}}$. (8) $r = a(1 + \cos \varphi)$.	(3) $x = a \cos^3 t$ $y = a \sin^3 t$. (6) $\arctan \frac{y}{x} = \ln \sqrt{x^2 + y^2}$. (9) $r = ae^{m\varphi}$.
---	---	--

$$(1) \frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dy}{dt}}{\frac{dx}{dt}} = \frac{-2 \cos t \sin t}{2 \sin t \cos t} = -1 \quad (0 < x < 1).$$

$$(2) \frac{dy}{dx} = \frac{b \cos t}{-a \sin t} = -\cot x \quad (0 < |t| < \pi)$$

$$(3) \frac{dy}{dx} = \frac{3a \sin^2 t \cos t}{-3a \cos^2 t \sin t} = -\tan t \quad (t \neq \frac{2k+1}{2}\pi k \text{ 为正整数}).$$

$$(4) \text{两边对 } x \text{ 求导, 得 } \frac{1}{2\sqrt{x}} + \frac{1}{2\sqrt{y}} \cdot y'_x = 0 \Rightarrow y'_x = -\sqrt{\frac{y}{x}} \quad (x, y > 0).$$

$$(5) \text{两边对 } x \text{ 求导, 得 } \frac{2}{3}x^{-\frac{1}{3}} + \frac{2}{3}y^{-\frac{1}{3}}y'_x = 0 \Rightarrow y'_x = -\sqrt[3]{\frac{y}{x}} \quad (x \neq 0).$$

$$(6) \text{两边对 } x \text{ 求导, 得 } \frac{1}{1+\frac{y^2}{x^2}} \cdot \frac{xy'_x - y}{x^2} = \frac{x+yyx'}{x^2+y^2} \Rightarrow y'_x = \frac{x+y}{x-y} \quad (x \neq y, 0).$$

(7) $x = r \cos \varphi, y = r \sin \varphi, r = r(\varphi)$, 所以

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dy}{d\varphi}}{\frac{dx}{d\varphi}} = \frac{\frac{dr}{d\varphi} \sin \varphi + r \cos \varphi}{\frac{dr}{d\varphi} \cos \varphi - r \sin \varphi} \quad (*)$$

$$\text{所以 } \frac{dy}{dx} = \frac{\arcsin \varphi + a\varphi \cos \varphi}{\arccos \varphi - a\varphi \sin \varphi} = \tan(\varphi + \arctan \varphi).$$

$$(8) \frac{dr}{d\varphi} = -a \sin \varphi, \text{ 代入 (*) 式, 且 } (\varphi \neq 0, \pm \frac{2\pi}{3}),$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-a \sin^2 \varphi + a(1 + \cos \varphi) \cos \varphi}{-a \sin \varphi \cos \varphi - a(1 + \cos \varphi) \sin \varphi} = -\frac{\cos 2\varphi + \cos \varphi}{\sin 2\varphi + \sin \varphi} = -\frac{\cos \frac{3\varphi}{2} \cos \frac{\varphi}{2}}{2 \sin \frac{3\varphi}{2} \cos \frac{\varphi}{2}} = -\cot \frac{3\varphi}{2}.$$

$$(9) \frac{dr}{d\varphi} = mae^{m\varphi}, \text{ 代入 (*) 式得}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{mae^{m\varphi} \sin \varphi + ae^{m\varphi} \cos \varphi}{mae^{m\varphi} \cos \varphi - ae^{m\varphi} \sin \varphi} = \frac{m \sin \varphi + \cos \varphi}{m \cos \varphi - \sin \varphi} = \tan\left(\varphi + \arctan \frac{1}{m}\right).$$

2.1.3 高阶导数与 Leibniz 公式

先拆项再求导

基本形式主要有:

$$(1) (x^k)^{(n)} = k(k-1)\cdots(k-n+1)x^{k-n} \quad (n \leq k). \quad (2) \left(\frac{1}{ax+b}\right)^{(n)} = (-1)^n \frac{n!a^n}{(ax+b)^{n+1}}$$

$$(3) (e^x)^{(n)} = e^x. \quad (4) (a^x)^{(n)} = a^x \ln^n a.$$

$$(5) (\ln x)^{(n)} = (-1)^{n-1}(n-1)!x^{-n}. \quad (6) (\log_a x)^{(n)} = (-1)^{n-1} \frac{(n-1)!}{x^n \ln a}$$

$$(7) [\sin(kx+b)]^{(n)} = k^n \sin\left(kx+b+\frac{n\pi}{2}\right). \quad (8) [\cos(kx+b)]^{(n)} = k^n \cos\left(kx+b+\frac{n\pi}{2}\right).$$

并特别注意 $[f(ax+b)]^{(n)} = a^n f^{(n)}(ax+b)$, 因子 a^n 不要漏掉.

例 2.1.19. 求下列 $y^{(n)}$, n 足够的大.

$(1) y = \frac{1}{x(1-x)}.$	$(2) y = \frac{x^4}{x-1}.$	$(3) y = \frac{x^2+x+1}{x^2-5x+6}.$	$(4) y = \frac{1}{x^2-3x+2}$
$(5) y = \sin^2 x.$	$(6) y = \cos^3 x.$	$(7) y = \cos ax \cos bx.$	$(8) y = \sin ax \cos bx.$
$(9) y = \frac{1}{\sqrt{1-2x}}.$	$(10) y = \frac{1}{\sqrt{3x+2}}$	$(11) y = \frac{x}{\sqrt{1-x}}.$	$(12) y = \frac{x}{\sqrt[3]{1+x}}.$

$$(1) \text{ 因为 } y = \frac{1}{x} + \frac{1}{1-x}, \text{ 所以 } y^{(n)} = (-1)^n \frac{n!}{x^{n+1}} + \frac{n!}{(1-x)^{n+1}}, x \neq 0, 1.$$

$$(2) \text{ 因为 } y = (x^2 + 1)(x + 1) + \frac{1}{x - 1}, \text{ 所以 } y^{(n)} = (-1)^n \frac{n!}{(x - 1)^{n+1}}, n \geq 4.$$

$$(3) \text{ 因为 } y = 1 - \frac{7}{x - 2} + \frac{13}{x - 3}, \text{ 所以 } y^{(n)} = 7 \cdot \frac{n!}{(2 - x)^{n+1}} + (-1)^n \cdot 13 \cdot \frac{n!}{(x - 3)^{n+1}}, x \neq 2, 3.$$

$$(4) \text{ 因为 } y = \frac{1}{x - 2} - \frac{1}{x - 1}, \text{ 所以 } y^{(n)} = (-1)^n n! \left[\frac{1}{(x - 2)^{n+1}} - \frac{1}{(x - 1)^{n+1}} \right], x \neq 1, 2.$$

$$(5) \text{ 因为 } y = \frac{1 - \cos 2x}{2}, \text{ 所以 } y^{(n)} = -2^{n-1} \cos \left(2x + \frac{n\pi}{2} \right).$$

$$(6) \text{ 由三倍角公式 } \cos 3\alpha = 4\cos^3 \alpha - 3\cos \alpha, \text{ 所以 } y^{(n)} = \frac{3^n}{4} \cos \left(3x + \frac{n\pi}{2} \right) + \frac{3}{4} \cos \left(x + \frac{n\pi}{2} \right).$$

$$(7) \text{ 因为 } y = \frac{1}{2} \cos(a - b)x + \frac{1}{2} \cos(a + b)x, \text{ 所以}$$

$$y^{(n)} = \frac{(a - b)^n}{2} \cos \left[(a - b)x + \frac{n\pi}{2} \right] + \frac{1}{2}(a - b)^n \cos \left[(a + b)x + \frac{n\pi}{2} \right].$$

$$(8) \text{ 由积化和差公式得 } y = \frac{1}{2} \sin(a + b)x + \frac{1}{2} \sin(a - b)x, \text{ 所以}$$

$$y^{(n)} = \frac{(a + b)^n}{2} \sin \left[(a + b)x + \frac{n\pi}{2} \right] + \frac{(a - b)^n}{2} \sin \left[(a - b)x + \frac{n\pi}{2} \right].$$

$$(9) y^{(n)} = \left(-\frac{1}{2} \right) \left(-\frac{3}{2} \right) \cdots \left(-\frac{2n - 1}{2} \right) \cdot (-2)^n \cdot (1 - 2x)^{-\frac{2n+1}{2}} = \frac{(2n - 1)!!}{(1 - 2x)^{n+\frac{1}{2}}}.$$

$$(10) y^{(n)} = \left(-\frac{1}{2} \right) \left(-\frac{3}{2} \right) \cdots \left(-\frac{2n - 1}{2} \right) \cdot 3^n \cdot (3x + 2)^{-\frac{2n+1}{2}} = \left(-\frac{3}{2} \right)^n \cdot \frac{(2n - 1)!!}{(3x + 2)^{\frac{2n+1}{2}}}.$$

$$(11) \text{ 因为 } y = \frac{1}{\sqrt{1-x}} - \sqrt{1-x}, \text{ 所以 } y^{(n)} = \frac{(2n - 1)!!}{2^n} (1 - x)^{-\frac{2n+1}{2}} + \frac{(2n - 3)!!}{2^n} (1 - x)^{-\frac{2n-1}{2}}.$$

$$(12) \text{ 因为 } y = \frac{(x+1)-1}{\sqrt[3]{1+x}} = (1+x)^{\frac{2}{3}} - (1+x)^{-\frac{1}{3}}, \text{ 所以当 } n \geq 2, x \neq -1 \text{ 时,}$$

$$\begin{aligned} y^{(n)} &= \frac{2}{3} \left(-\frac{1}{3} \right) \left(-\frac{4}{3} \right) \cdots \left(-\frac{3n - 5}{3} \right) (1 + x)^{-\frac{3n-2}{3}} + \frac{1}{3} \left(-\frac{4}{3} \right) \cdots \left(-\frac{3n - 2}{3} \right) (1 + x)^{-\frac{3n+1}{3}} \\ &= \frac{(-1)^{n+1} \cdot 1 \cdot 4 \cdots (3n - 5)}{3^n (1 + x)^{n+\frac{1}{3}}} [2(1 + x) + (3n - 2)] = \frac{(-1)^{n+1} 1 \cdot 4 \cdot 7 \cdots (3n - 5)(3n + 2x)}{3^n (1 + x)^{n+\frac{1}{3}}}. \end{aligned}$$

Leibniz 公式

把要求导的函数写成两项相乘, 然后直接应用 Leibniz 公式:

$$(u \cdot v)^{(n)} = \sum_{k=0}^n C_n^k u^{(k)} v^{(n-k)}.$$

例 2.1.20. 求下列 $y^{(n)}$.

$$\left| \begin{array}{ll} (1) y = x \cos ax. & (2) y = x^2 \sin ax. \\ (5) y = (x^2 + 2x + 2)e^{-x}. & (6) y = \frac{e^x}{x}. \end{array} \right| \left| \begin{array}{ll} (3) y = \sin^2 ax \cos bx. & (4) y = \frac{\sin(2x + 1)}{4x - 3}. \\ (7) y = x^2 e^{ax}. & (8) y = x \ln x. \end{array} \right|$$

$$(1) y^{(n)} = x(\cos ax)^{(n)} + n(\cos ax)^{(n-1)} = a^n x \cos \left(ax + \frac{n\pi}{2} \right) + na^{n-1} \sin \left(ax + \frac{n\pi}{2} \right).$$

$$(2) y^{(n)} = a^n x^2 \sin \left(ax + \frac{n\pi}{2} \right) + 2na^{n-1} x \sin \left(ax + \frac{n-1}{2}\pi \right) + n(n-1)a^{n-1} \sin \left(ax + \frac{n-2}{2}\pi \right).$$

(3) 将 $\sin^2 ax$ 降幂, 再用积化和差公式, 得 $y = \frac{1}{2} \cos bx - \frac{1}{4} \cos(2a+b)x - \frac{1}{4} \cos(2a-b)x$, 于是

$$y^{(n)} = \frac{1}{2} b^2 \cos\left(bx + \frac{n\pi}{2}\right) - \frac{1}{4} (2a+b)^n \cos\left[(2a+b)x + \frac{n\pi}{2}\right] - \frac{1}{4} (2a-b)^n \cos\left[(2a-b)x + \frac{n\pi}{2}\right].$$

$$(4) \quad y^{(n)} = \sum_{k=0}^n C_n^k (-1)^{n-k} \frac{(n-k)! \cdot 2^{3n-2k}}{(4x-3)^{n-k+1}} \sin\left(2x + 1 + \frac{n\pi}{2}\right).$$

$$(5) \quad y^{(n)} = (-1)^n e^{-x} [x^2 - 2(n-1)x + (n-1)(n-2)].$$

$$(6) \quad y^{(n)} = \sum_{k=0}^n C_n^k e^x \left(\frac{1}{x}\right)^{(k)} = e^x \left[\frac{1}{x} + \sum_{k=1}^n (-1)^k \frac{n(n-1)\dots(n-k+1)}{x^{k+1}} \right].$$

$$(7) \quad y^{(n)} = a^n x^2 e^{ax} + 2na^{n-1} x e^{ax} + n(n-1)a^{n-2} e^{ax}.$$

$$(8) \quad y^{(n)} = \begin{cases} (-1)^{n-2}(n-2)!x^{1-n}, & n \geq 2 \\ \ln x + 1, & n = 1. \end{cases}$$

例 2.1.21. 设函数 $y = (x^2 - 11x + 30)^{2022} \cdot \cos \frac{\pi x}{18}$, 求 $y^{(2022)}(6)$.

$y = (x^2 - 11x + 30)^{2022} \cdot \cos \frac{\pi x}{18} = (x-6)^{2022} (x-5)^{2022} \cos \frac{\pi x}{18}$, 由 Leibniz 计算公式, 可知对 $x = 6$ 处, 仅仅有一项不为 0, 即

$$y^{(2022)}(6) = C_{2022}^{2022} \cdot 2022! \left[(x-5)^{2022} \cos \frac{\pi x}{18} \right]_{x=6} = \frac{2022!}{2}.$$

用数学归纳法求高阶导数

当高阶导数不能一次求出时, 可先求出前几阶导数, 归纳总结, 找出规律, 然后用数学归纳法加以证明.

例 2.1.22. 证明: $\left(x^{n-1} e^{\frac{1}{x}}\right)^{(n)} = \frac{(-1)^n}{x^{n+1}} e^{\frac{1}{x}}$.

证 当 $n = 1$ 时, 由于 $\left(e^{\frac{1}{x}}\right)' = -\frac{1}{x^2} e^{\frac{1}{x}}$, 故等式成立,

设当 $n = k$ 时等式成立, 即有 $\left(x^{k-1} e^{\frac{1}{x}}\right)^{(k)} = \frac{(-1)^k}{x^{k+1}} e^{\frac{1}{x}}$, 要证等式对 $n = k+1$ 时也成立,

$$\begin{aligned} \left(x^k e^{\frac{1}{x}}\right)^{(k+1)} &= \left[\left(x \cdot x^{k-1} e^{\frac{1}{x}}\right)^{(k)}\right]' = \left[x \left(x^{k-1} e^{\frac{1}{x}}\right)^{(k)} + k \left(x^{k-1} e^{\frac{1}{x}}\right)^{(k-1)}\right]' \\ &= x \left(x^{k-1} e^{\frac{1}{x}}\right)^{(k+1)} + \left(x^{k-1} e^{\frac{1}{x}}\right)^{(k)} + k \left(x^{k-1} e^{\frac{1}{x}}\right)^{(k)} \\ &= x \left[\frac{(-1)^k}{x^{k+1}} e^{\frac{1}{x}}\right]' + (k+1) \frac{(-1)^k}{x^{k+2}} e^{\frac{1}{x}} \\ &= \frac{(-1)^{k+1}(k+1)}{x^{k+2}} e^{\frac{1}{x}} + \frac{(-1)^{k+1}}{x^{k+2}} e^{\frac{1}{x}} + \frac{(-1)^k(k+1)}{x^{k+1}} e^{\frac{1}{x}} = \frac{(-1)^{k+1}}{x^{k+2}} e^{\frac{1}{x}} \end{aligned}$$

于是, 由数学归纳法得知, $\left(x^{n-1} e^{\frac{1}{x}}\right)^{(n)} = \frac{(-1)^n}{x^{n+1}} e^{\frac{1}{x}}$ 对于一切正整数 n 均成立.

用递推公式求导

例 2.1.23. 设 $f(x) = x^n \cdot \ln x$, 求 $f^{(n)}(x)$.

令 $f_n(x) = x^n \cdot \ln x$, 则

$$f'_n(x) = nx^{n-1} \cdot \ln x + x^{n-1} = n \cdot f_{n-1}(x) + x^{n-1}$$

对上式两边同时除以 $n!$, 则有 $\frac{f'_n(x)}{n!} = \frac{f_{n-1}(x)}{(n-1)!} + \frac{x^{n-1}}{n!}$, 再同时求 $(n-1)$ 阶导, 即

$$\frac{f_n^{(n)}(x)}{n!} = \frac{f_{n-1}^{(n-1)}(x)}{(n-1)!} + \frac{1}{n} := u_n - u_{n-1} = \frac{1}{n}$$

于是 $u_n = \ln x + \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$, 所以 $f_n^{(n)}(x) = n! \left(\ln x + 1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n} \right)$.

$$\begin{aligned} u_1 - u_0 &= \frac{1}{1} \\ u_2 - u_1 &= \frac{1}{2} \\ u_3 - u_2 &= \frac{1}{3} \\ u_4 - u_3 &= \frac{1}{4} \\ &\vdots \\ u_n - u_{n-1} &= \frac{1}{n} \\ \hline u_n - u_0 &= \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \end{aligned}$$

例 2.1.24 (2023 四川大学). 设 $y = \arcsin x$, 求 $\frac{y^{(7)}(0)}{7!}$.

直接求导, 有

$$y' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}, \quad y'' = \frac{x}{1-x^2} y'$$

则 $(1-x^2)y'' = xy'$, 对其两边求 n 阶导数, 利用 Leibniz 公式得

$$(1-x^2)y^{(n+2)} + n(-2x)y^{(n+1)} + \frac{n(n-1)}{2}(-2)y^{(n)} = xy^{(n+1)} + ny^{(n)}$$

整理得

$$(1-x^2)y^{(n+2)} - (2n+1)xy^{(n+1)} - n^2y^{(n)} = 0$$

令 $x=0$, 可得递推公式可知: $y^{(n+2)}(0) = n^2y^{(n)}(0)$, 又因为 $y'(0) = y''(0) = 0$, 则

$$y^{(n)}(0) = \begin{cases} 0, & x=2k \\ [(2k-1)!!]^2, & n=2k+1 \end{cases}, \quad k \in \mathbb{N}_+$$

所以 $\frac{y^{(7)}(0)}{7!} = \frac{(5!!)^2}{7!} = \frac{5}{112}$.

例 2.1.25. 设 $f(x) = (\arcsin x)^2$, 求 $f^{(n)}(0)$.

由 $f'(x) = 2 \frac{\arcsin x}{\sqrt{1-x^2}}$, 得

$$(1-x^2)[f'(x)]^2 = 4f(x)$$

再次求导, 整理得

$$-xf'(x) + (1-x^2)f''(x) = 2$$

由 Leibniz 公式得

$$-xf^{(n+1)}(x) - nf^{(n)}(x) + (1-x^2)f^{(n+2)}(x) - 2nx f^{(n+1)}(x) - n(n-1)f^{(n)}(x) = 0$$

令 $x=0$, 得

$$f'(0) = 0, f''(0) = 2, f^{(n+2)}(0) = n^2 f^{(n)}(0)$$

从而

$$f^{(2k+1)}(0) = 0, \quad k = 0, 1, \dots,$$

$$\begin{aligned} f^{(2k)}(0) &= (2k-2)^2 (2k-4)^2 \cdots 2^2 \cdot 2 = 2 \prod_{i=1}^{k-1} (2k-2i)^2 \\ &= 2^{2(k-1)} \cdot 2 \prod_{i=1}^{k-1} (k-i)^2 = 2^{2k-1} \left[\prod_{i=1}^{k-1} (k-i) \right]^2 \\ &= 2^{2k-1} [(k-1)!!]^2, \quad k = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

用 Taylor 展开式求导

定理 2.1.5 (Taylor 展开式). $f(x)$ 按 $(x - a)$ 的幂展开的幂级数必是 $f(x)$ 的 Taylor 展开式:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x - a)^n$$

因此, 若一旦得到展开式 $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - a)^n$, 则 $f^{(n)}(a) = a_n n!$ ($n = 0, 1, 2, \dots$).

例 2.1.26. 设 $f(x) = (x - 1)^n \cdot x^{2n} \cdot \sin \frac{\pi x}{2}$, 求 $f^{(n)}(1)$.

当 $x \rightarrow 1$ 时, $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{f(x)}{(x - 1)^n} = \lim_{x \rightarrow 1} \left(x^{2n} \cdot \sin \frac{\pi x}{2} \right) = 1$, 将 $f(x)$ 在 $x = 1$ 处 Taylor 展开, 有

$$\lim_{x \rightarrow 1} \frac{f(1) + f'(1)(x - 1) + \dots + \frac{f^{(n)}(1)}{n!}(x - 1)^n + o((x - 1)^n)}{(x - 1)^n} = 1$$

即

$$f(1) = f'(1) = \dots = f^{(n-1)}(1) = 0, \quad \frac{f^{(n)}(1)}{n!} = 1$$

故 $f^{(n)}(1) = n!$.

例 2.1.27. 设 $y = \arctan x$, 求 $y^{(n)}(0)$.

法一: 因为

$$\arctan x = \int_0^x \frac{dt}{1+t^2} = \int_0^x [1-t^2+t^4-\dots+(-1)^nt^{2n}] dt = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \dots (-1 < x < 1)$$

所以由幂级数展开式的唯一性, 得

$$y^{(2n)}(0) = 0, \quad y^{(2n+1)}(0) = (2n+1)! \frac{(-1)^n}{2n+1} = (-1)^n (2n)!$$

法二: 由 $y = \arctan x$, 则 $y' = \frac{1}{1+x^2}$, 即 $y'(1+x^2) = 1$, 等式两端对 x 求 $n+1$ 阶导数, 由 Leibniz 公式得

$$(1+x^2)y^{(n+2)} + (n+1)y^{(n+1)}(1+x^2)' + \frac{n(n+1)}{2!}y^{(n)}(1+x^2)'' = 0$$

于是得 $(1+x^2)y^{(n+2)} + 2(n+1)xy^{(n+1)} + n(n+1)y^{(n)} = 0$, 令 $x = 0$, 得

$$y^{(n+2)}(0) = -n(n+1)y^{(n)}(0)$$

又 $y'(0) = 1, y''(0) = 0$, 故 $y^{(2m)}(0) = 0, y^{(2m+1)}(0) = (-1)^m (2m)!$.

法三: 转化为 $x = \tan y$, 于是

$$y' = \frac{1}{1+x^2} = \frac{1}{1+\tan^2 y} = \cos^2 y = \cos y \cdot \sin \left(y + \frac{\pi}{2} \right)$$

两边关于 x 求导, 得

$$\begin{aligned} y'' &= -\sin y \cdot y' \cdot \sin \left(y + \frac{\pi}{2} \right) + \cos y \cdot \cos \left(y + \frac{\pi}{2} \right) \cdot y' = y' \cdot \left[-\sin y \cdot \sin \left(y + \frac{\pi}{2} \right) + \cos y \cdot \cos \left(y + \frac{\pi}{2} \right) \right] \\ &= y' \cos \left(2y + \frac{\pi}{2} \right) = \cos^2 y \cdot \sin \left(2y + 2 \cdot \frac{\pi}{2} \right) = \cos^2 y \cdot \sin \left(y + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned}$$

由数学归纳法可证得

$$y^{(n)} = (n-1)! \cdot \cos^n y \cdot \sin n \left(y + \frac{\pi}{2} \right)$$

当 $x = 0$ 时 $y = 0$, 于是

$$y^{(n)}(0) = (n-1)! \cdot \sin \frac{n\pi}{2} = \begin{cases} 0, & n = 2m \\ (-1)^m (2m)!, & n = 2m+1 \end{cases} \quad \text{其中 } m = 0, 1, \dots$$

法四: 由 $y' = \frac{1}{1+x^2} = \frac{1}{2i} \left(\frac{1}{x-i} - \frac{1}{x+i} \right)$, $x \pm i = re^{\pm i\theta}$, 其中 $r = \sqrt{1+x^2}$, $\theta = \arccot x$, 所以

$$\begin{aligned} y^{(n+1)} &= \left(\frac{1}{1+x^2} \right)^{(n)} = \frac{1}{2i} \left[\left(\frac{1}{x-i} \right)^{(n)} - \left(\frac{1}{x+i} \right)^{(n)} \right] = \frac{1}{2i} \left[\frac{(-1)^n n!}{(x-i)^{n+1}} - \frac{(-1)^n n!}{(x+i)^{n+1}} \right] \\ &= \frac{(-1)^n n!}{2i(1+x^2)^{n+1}} \cdot [(x+i)^{n+1} - (x-i)^{n+1}] = \frac{(-1)^n n!}{2i(1+x^2)^{n+1}} \cdot [r^{n+1} e^{i(n+1)\theta} - r^{n+1} e^{-i(n+1)\theta}] \\ &= \frac{(-1)^n n!}{(1+x^2)^{n+1}} r^{n+1} \sin(n+1)\theta = \frac{(-1)^n n!}{(1+x^2)^{\frac{n+1}{2}}} \sin[(n+1) \cdot \arccot x] \end{aligned}$$

于是 $y'(0) = 1$, $y(n+1)(0) = (-1)^n n! \sin \frac{(n+1)}{2}\pi$, $n = 1, 2, \dots$, 故当 $n = 2m$ 时,

$$y^{(2m+1)}(0) = (-1)^{2m} (2m)! \sin \frac{2m+1}{2}\pi = (-1)^m (2m)!$$

当 $n = 2m-1$ 时, $y^{(2m)}(0) = 0$.

例 2.1.28. 设 $f(x) = x^{2021} e^{2020x} \sin x$, 求 $f^{(2023)}(0)$.

法一: 令 $h(x) = x^{2021}$, $g(x) = e^{2020x} \sin x$, 根据 Leibniz 求导公式,

$$\begin{aligned} f^{(2023)}(x) &= \sum_{k=0}^{2023} C_{2023}^k h^{(2023-k)}(x) g^{(k)}(x) = \sum_{k=0}^{2023} C_{2023}^k (x^{2021})^{(2023-k)} (e^{2020x} \sin x)^{(k)} \\ &= \sum_{k=0}^{2023} C_{2023}^k (x^{2021})^{(2023-k)} \left[\sum_{m=0}^k C_k^m (e^{2020x})^{(m-k)} \sin^{(m)} x \right] \\ &= \sum_{k=0}^{2023} C_{2023}^k \frac{2021!}{(k-2)!} x^{k-2} \left[\sum_{m=0}^k C_k^m (2020)^{k-m} e^{2020x} \sin \left(x + \frac{m\pi}{2} \right) \right] \end{aligned}$$

当 $x = 0$ 时,

$$f^{(2023)}(0) = C_{2023}^2 \frac{2021!}{(2-2)!} \left[\sum_{m=0}^2 C_2^m (2020)^{2-m} \sin \left(\frac{m\pi}{2} \right) \right] = \frac{2023!}{2! \cdot 2021!} 2021! \cdot 2! \cdot 2020 = 2020 \cdot 2023!$$

法二: 利用 Taylor 公式的唯一性,

$$f(x) = x^{2021} e^{2020x} \sin x = x^{2021} (1 + 2020x + 1010x^2 + o(x^2)) \left(x - \frac{x^3}{6} + o(x^3) \right) = x^{2022} + 2020x^{2023} + o(x^{2023})$$

故 $f^{(2023)}(0) = 2020 \cdot 2023!$.

2.2 函数的可导性

函数的可导性是指函数在某一点处存在导数 (或导数存在), 即该点处函数的斜率存在. 可导性是微积分中一个重要的概念, 它在研究函数的变化率、极值、凹凸性等方面起着关键作用.

2.2.1 含绝对值函数的可导性

$|f(x)|$ 在 $x = x_0$ 点的可导性

定理 2.2.1 (含绝对值函数的可导性). $|f(x)|$ 在 $x = x_0$ 点的可导性的四种情况:

(1) 当 $f(x_0) > 0$, 时 $y = |f(x)|$ 在 x_0 处可导, 且 $y'|_{x=x_0} = f'(x_0)$.

(2) 当 $f(x_0) < 0$, 时 $y = |f(x)|$ 在 x_0 处可导, 且 $y'|_{x=x_0} = -f'(x_0)$.

(3) 当 $f(x_0) = 0$ 但 $f'(x_0) \neq 0$ 时, $y = |f(x)|$ 在 x_0 处不可导.

(4) 当 $f(x_0) = 0$ 且 $f'(x_0) \neq 0$ 时, $y = |f(x)|$ 在 x_0 处可导, 且 $y'|_{x=x_0} = 0$.

证 (1) 与 (2) 只需证明其中一个, (3) 与 (4) 也只需证明其中一个.

(1) 因 $f(x)$ 在 x_0 处可导, 则 $f(x_0)$ 在 x_0 处连续, 又 $f(x_0) > 0$, 由保号性可知, 存在 x_0 点的 δ 邻域 $U(x_0, \delta)$, 当 $x \in U(x_0, \delta)$ 时, $y = |f(x)| = f(x)$, 故 $y'|_{x=x_0} = f'(x_0)$, 同理可证 (2).

(3) $y'_\pm(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0^\pm} \frac{|f(x)| - |f(x_0)|}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0^\pm} \left| \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \right| = \pm |f'(x_0)|$, 因 $|f(x_0)| \neq 0$, 所以 $y'_-(x_0) \neq y'_+(x_0)$, 故 $y = |f(x)|$ 在 x_0 处不可导, 同理可证 (4).

例 2.2.1 (2000 数三). 设函数 $f(x)$ 在 $x = a$ 处可导, 则函数 $|f(x)|$ 在点 $x = a$ 处不可导的充分条件是

- | | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| A. $f(a) = 0$ 且 $f'(a) = 0$ | B. $f(a) = 0$ 且 $f'(a) \neq 0$ |
| C. $f(a) > 0$ 且 $f'(a) > 0$ | D. $f(a) < 0$ 且 $f'(a) < 0$ |

由定理 2.2.1 知, 选 B.

例 2.2.2. 求 $y = |x^2 - 1|$ 的导数.

令 $f(x) = x^2 - 1$, 当 $|x| > 1$ 时, $y = |f(x)| = f(x) = x^2 - 1$, 那么 $y' = f'(x) = 2x$; 当 $|x| < 1$ 时, $y = |f(x)| = -f(x) = 1 - x^2$, 那么 $y' = -f'(x) = -2x$; 当 $x = \pm 1$ 时, 因 $f(\pm 1) = 0$, 但 $f'(\pm 1) \neq 0$, 故 $y = |f(x)|$ 在 $x = \pm 1$ 处不可导, 综上 $y' = \begin{cases} 2x, & |x| > 1 \\ -2x, & |x| < 1. \end{cases}$

$f(x)|g(x)|$ 在 $x = x_0$ 点的可导性

定理 2.2.2. 设 $f(x)$ 在 x_0 处可导, $|g(x)|$ 在 x_0 处连续但不可导, 则 $\varphi(x) = f(x)|g(x)|$ 在 x_0 处可导的充要条件是 $f(x_0) = 0$, 且当 $\varphi(x)$ 在 x_0 处可导时, 有 $\varphi'(x_0) = f'(x_0)|g(x_0)|$, 并且称 $f(x)$ 是 $|g(x)|$ 在 $x = x_0$ 点的磨光函数.

证 充分性: 当 $f(x_0) = 0$ 时,

$$\varphi'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\varphi(x) - \varphi(x_0)}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} |g(x_0)| = f'(x_0)|g(x_0)|$$

必要性: 用反证法, 反设 $f(x_0) \neq 0$, 则由 $\varphi(x), f(x)$ 在 x_0 点皆可导, 可得 $\frac{\varphi(x)}{f(x)} = |g(x)|$ 在 x_0 可导, 与条件矛盾, 所以当 $\varphi(x)$ 在 x_0 可导时必有 $f(x_0) = 0$.

例 2.2.3 (1995 数一). 设 $f(x)$ 可导, $F(x) = f(x)(1 + |\sin x|)$, 则 $f(0) = 0$ 是 $F(x)$ 在 $x = 0$ 可导的

- | | |
|-------------|---------------|
| A. 充分必要条件 | B. 充分但非必要条件 |
| C. 必要但非充分条件 | D. 即非充分也非必要条件 |

易知, $1 + |\sin x|$ 在 $x = 0$ 处连续但不可导, 由定理 2.2.2 知, $f(0) = 0$ 是 $F(x)$ 在 $x = 0$ 可导的充分必要条件, 选 A.

例 2.2.4 (1998 数二). 函数 $F(x) = (x^2 - x - 2)|x^3 - x|$ 不可导点的个数是

- | | | | |
|------|------|------|------|
| A. 3 | B. 2 | C. 1 | D. 0 |
|------|------|------|------|

由 $|x^3 - x|$ 知不可导点为 $x = 0, x = \pm 1$, 但 $f(x) = x^2 - x - 2 = (x-2)(x+1)$ 处处可导, 且 $f(-1) = 0$, 则 $F(-1)$ 可导, 但 $f(0) \neq 0, f(1) \neq 0$, 故 $F(x)$ 在 $x = 0, 1$ 处不可导, 因此不可导点的个数是 2, 选 B.

定理 2.2.3. 设 $f(x) = (x-a)^n|x-a|$ $n \in \mathbb{Z}^+$, 则 $f(x)$ 在 $x=a$ 点的各阶导数

$$f^{(k)}(a) = \begin{cases} 0, & k \leq n \\ \text{不存在}, & k > n. \end{cases}$$

证 由 $f(x) = \begin{cases} -(x-a)^{n+1}, & x \leq a \\ (x-a)^{n+1}, & x > a \end{cases}$ 得 $f^{(n)}(a) = \begin{cases} -(n+1)!(x-a), & x \leq a \\ (n+1)!(x-a), & x > a \end{cases}$, 但 $f_-^{(n+1)}(a) = -(n+1)! \neq f_+^{(n+1)}(a) = (n+1)!$, 故 $f^{(n+1)}(a)$ 不存在.

例 2.2.5 (1992 数一). 设 $f(x) = 3x^3 + x^2|x|$, 则 $f^{(n)}(0)$ 存在的最高阶数为

A. 0

B. 1

C. 2

D. 3

$f(x) = f_1(x) + f_2(x)$, 其中 $f_1(x) = 3x^3$ 在 $x=0$ 任意阶可导, 但 $f_2(x) = x^2|x|$ 在 $x=0$ 点之多只有二阶导数, 故选 C.

2.2.2 分段函数的可导性

$$\begin{cases} g(x), & x < x_0 \\ A, & x = x_0 \\ h(x), & x > x_0 \end{cases}$$

定理 2.2.4. 设分段函数 $f(x) = \begin{cases} g(x), & x < x_0 \\ A, & x = x_0 \\ h(x), & x > x_0 \end{cases}$ 如果函数 $f(x)$ 满足: (1) 在点 x_0 处连续; (2) 在点 x_0 的某空心邻域内可导; (3) $\lim_{x \rightarrow x_0^-} g'(x) = B, \lim_{x \rightarrow x_0^+} h'(x) = C$. 则 $f'_-(x_0) = B, f'_+(x_0) = C$.

例 2.2.6. 设函数 $f(x) = \begin{cases} \frac{\pi}{2}(e^x - 1), & x \leq 0 \\ x \arctan \frac{1}{x}, & x > 0 \end{cases}$ 讨论函数 $f(x)$ 在 $x=0$ 的可导性, 并求导函数 $f'(x)$.

显然函数 $f(x)$ 在分段点 $x=0$ 连续,

$$g'(x) = \left(\frac{\pi}{2}(e^x - 1)\right)' = \frac{\pi}{2}e^x, h'(x) = \left(x \arctan \frac{1}{x}\right)' = \arctan \frac{1}{x} - \frac{x}{1+x^2}$$

于是有 $f'_-(0) = \lim_{x \rightarrow 0^-} g'(x) = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{\pi}{2}e^x = \frac{\pi}{2}, f'_+(0) = \lim_{x \rightarrow 0^+} h'(x) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \left(\arctan \frac{1}{x} - \frac{x}{1+x^2}\right) = \frac{\pi}{2}$, 从而函数 $f(x)$

在 $x=0$ 可导且 $f'(0) = \frac{\pi}{2}$, 所以 $f'(x) = \begin{cases} \frac{\pi}{2}e^x, & x \leq 0 \\ \arctan \frac{1}{x} - \frac{x}{1+x^2}, & x > 0. \end{cases}$

2.3 微分中值定理

微分中值定理是微积分中的一个重要定理, 它描述了函数在某一区间内的平均变化率与某一点处的瞬时变化率之间的关系.

2.3.1 四大基本定理

引理 2.3.1 (Fermat 引理). 函数 $f(x)$ 在点 $x = \xi$ 的某邻域 $U(\xi)$ 内有定义, 并且在 ξ 处可导, 如果对于任意的 $x \in U(\xi)$, 都有 $f(x) \geq f(\xi)$ 或 $f(x) \leq f(\xi)$, 那么 $f'(\xi) = 0$.

定理 2.3.1 (Rolle 定理). 若 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且 $f(b) = f(a)$, 则 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得 $f'(\xi) = 0$.

例 2.3.1. 设函数 $f(x)$ 在 $(0, +\infty)$ 内可导, 且 $f(x) > 0$, $0 < a < 1$, 证明存在 $\xi \in \left(a, \frac{1}{a}\right)$, 使得

$$\frac{\xi f'(\xi)}{f(\xi)} = \frac{\xi^{-1} f'(\xi^{-1})}{f(\xi^{-1})}.$$

证 将要证的等式化中的 ξ 换成 x , 并两边关于 x 积分得

$$\int \frac{f'(x)}{f(x)} dx = \int \frac{f'(x^{-1})}{f(x^{-1})} dx^{-1} \Rightarrow f(x)f(x^{-1}) = C$$

为此构造辅助函数

$$F(x) = f(x)f(x^{-1})$$

于是 $f(x) \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$, 故由 Rolle 定理知, $\exists \xi \in (0, 1)$, 使得

$$F'(\xi) = f'(\xi)f(\xi^{-1}) - \xi^{-2}f'(\xi^{-1})f(\xi) = 0$$

又 $\xi, f(\xi), f(\xi^{-1}) \neq 0$, 故 $\frac{\xi f'(\xi)}{f(\xi)} = \frac{\xi^{-1} f'(\xi^{-1})}{f(\xi^{-1})}$.

定理 2.3.2 (Lagrange 定理). 若 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 则 $\forall x_1, x_2 \in [a, b]$, $\exists \xi \in (x_1, x_2)$, 使得

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} = f'(\xi).$$

例 2.3.2. 设 $f(x)$ 在 $[0, 1]$ 上有连续的导数, 证明

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

由 Lagrange 中值定理知, $\exists \xi_k \in \left(\frac{2k-1}{2n}, \frac{k}{n}\right)$, 使 $f\left(\frac{k}{n}\right) - f\left(\frac{2k-1}{2n}\right) = \frac{f'(\xi_k)}{2n}$, 于是

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \left[f\left(\frac{k}{n}\right) - f\left(\frac{2k-1}{2n}\right) \right] = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f'(\xi_k) = \frac{1}{2} \int_0^1 f(x) dx = \frac{1}{2}[f(1) - f(0)].$$

定理 2.3.3 (Cauchy 定理). 若 $F(x), G(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, $G'(x) \neq 0$, 则 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$\frac{F(b) - F(a)}{G(b) - G(a)} = \frac{F'(\xi)}{G'(\xi)}.$$

例 2.3.3. 设 $0 < a < b$, 证明至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使 $a e^b - b e^a = (1 - \xi) e^\xi (a - b)$.

证 将要证的等式化为 $\frac{e^b - e^a}{\frac{1}{b} - \frac{1}{a}} = (1 - \xi)e^\xi$, 令 $f(x) = \frac{e^x}{x}$, $g(x) = \frac{1}{x}$, 则 $f(x), g(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且 $\forall x \in (a, b)$, $g'(x) = -\frac{1}{x^2} < 0$, 故由 Cauchy 定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$\frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)} = \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)} = (1 - \xi)e^\xi$$

化简得 $ae^b - be^a = (1 - \xi)e^\xi(a - b)$.

定理 2.3.4 (Darboux 定理). 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上处处可导 (端点指单侧导数), $f'(a) < f'(b)$ 或 $f'(a) > f'(b)$, 则 $\forall \mu : f'(a) < \mu < f'(b)$, 或 $f'(a) > \mu > f'(b)$, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得 $f'(\xi) = \mu$.

2.3.2 单中值问题

辅助函数的构造

常用的辅助函数构造, 本质为解微分方程.

表 2.1

原函数	辅助函数	原函数	辅助函数
(1) $\xi f'(\xi) + nf(\xi) = 0$	$F(x) = x^n f(x)$	(2) $\xi f'(\xi) - nf(\xi) = 0$	$F(x) = x^{-n} f(x)$
(3) $f'(\xi) + \lambda f(\xi) = 0$	$F(x) = e^{\lambda x} f(x)$	(4) $\alpha f'(\xi) + \beta f(\xi) = 0$	$F(x) = e^{\frac{\beta}{\alpha} x} f(x)$
(5) $f'(\xi) + g'(\xi)f(\xi) = 0$	$F(x) = e^{g(x)} f(x)$	(6) $f'(\xi) + g(\xi)f(\xi) = 0$	$F(x) = e^{\int g(x)} f(x)$
(7) $f'(x) - \lambda(f(x) - x) = 1$	$F(x) = (f(x) - x)e^{-\lambda x}$	(8) $f'(x) - \alpha(f(x) - f(a)) = 0$	$F(x) = (f(x) - f(a))e^{-\alpha x}$
(9) $f''(x) + f(x) = 0$	$F(x) = f^2(x) + [f'(x)]^2$	(10) $f''(x) - f(x) = 0$	$F(x) = e^x(f'(x) - f(x))$

证 关于如何解微分方程可参考阅读第八章.

(1) 将原函数改写为 $x \frac{dy}{dx} + ny = 0$, 该方程是变量分离方程, 即

$$\frac{dx}{x} = -\frac{dy}{ny} \Rightarrow \int \frac{dx}{x} = -\frac{1}{n} \int \frac{dy}{y} \Rightarrow \ln x^n + \ln y = C \Rightarrow x^n y = C$$

将 C 改写为 $F(x)$, 即得辅助函数 $F(x) = x^n f(x)$.

(2) 同 (1) 易得 $\frac{y}{x^n} = C$, 因此辅助函数为 $F(x) = \frac{f(x)}{x^n}$.

(3) 将原函数改写为 $y' + \lambda y = 0$, 有通解 $y = Ce^{-\lambda x}$, 即 $C = ye^{\lambda x}$, 将 C 改写为 $F(x)$, 即得辅助函数 $F(x) = e^{\lambda x} f(x)$.

(4) 同 (2) 得通解 $y = Ce^{-\frac{\beta}{\alpha} x}$, 即 $C = ye^{\frac{\beta}{\alpha} x}$, 因此有辅助函数 $F(x) = e^{\frac{\beta}{\alpha} x} f(x)$.

(5) 将原函数改写为 $y' + g'(x)y = 0$, 该方程为一阶常系数线性微分方程, 有通解 $y = Ce^{-\int g'(x)dx}$, 即 $C = ye^{g(x)}$, 因此有辅助函数 $F(x) = e^{g(x)} f(x)$.

(6) 同 (5) 易得辅助函数为 $F(x) = e^{\int g(x)} f(x)$.

(7) 将原函数改写为 $y' - \lambda(y - x) = 1 \Rightarrow y' - \lambda y = 1 - \lambda x$, 该方程为一阶常系数线性微分方程, 有通解为

$$y = e^{\int \lambda dx} \left[\int (1 - \lambda x)e^{-\int \lambda dx} dx + C \right] = x + Ce^{\lambda x}$$

即 $C = (y - x)e^{-\lambda x}$, 因此辅助函数为 $F(x) = (f(x) - x)e^{-\lambda x}$.

(8) 同 (7) 原函数为 $y' - \alpha f(x) = -\alpha f(a)$, 有通解为

$$y = e^{\alpha \int dx} \left[-\alpha f(a) \int e^{-\alpha \int dx} dx + C \right] = f(a) + Ce^{\alpha x}$$

即 $C = (y - f(a))e^{-\alpha x}$, 因此辅助函数为 $F(x) = (f(x) - f(a))e^{-\alpha x}$.

(9) 将原函数改写为 $y'' + y = 0$, 等式两边同时乘以 $2y'$, 有 $2y'y'' + 2yy' = 0 \Rightarrow [(y')^2 + y^2]' = C$, 因此辅助函数为 $F(x) = f^2(x) + [f'(x)]^2$.

(10) 将原函数改写为 $y'' - y = 0$ 并令 $D = \frac{d}{dx}$, 于是有 $(D^2 - 1)y = (D + 1)(D - 1)y = 0$, 令 $(D - 1)y = z$, 则

$$\frac{dz}{dx} + z = 0 \Rightarrow z = Ce^{-x} \Rightarrow C = (D - 1)y e^{-x}$$

将 C 改写为 $F(x)$, 即得辅助函数 $F(x) = e^x(f'(x) - f(x))$.

例 2.3.4. 设函数 $f(x), g(x) \in C[a, b] \cap D(a, b)$, 且 $f(a) = f(b) = 0$, 证明至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得 $f'(\xi) + f(\xi)g'(\xi) = 0$.

证 将要证的等式化中的 ξ 换成 x , 有 $f'(x) + f(x)g'(x) = 0$, 化为 $\frac{f'(x)}{f(x)} - g'(x)$, 然后两边关于 x 积分, 得

$$\ln|f(x)| = -g(x) + C \Rightarrow f(x) = Ce^{-g(x)} \Rightarrow f(x)e^{g(x)} = C$$

为此构造辅助函数

$$F(x) = f(x)e^{g(x)}$$

则 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 故由 Rolle 定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$F'(\xi) = (f'(\xi) + f(\xi) \cdot g'(\xi))e^{g(\xi)} = 0$$

而 $e^{g(x)} > 0$, 故 $f'(\xi) + f(\xi) \cdot g'(\xi) = 0$.

例 2.3.5. 设函数 $f(x) \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$, $f(0) = 0$, 且 $\forall x \in (0, 1)$, 都有 $f(x) \neq 0$, 证明至少存在一点 $\xi \in (0, 1)$, 使得 $\frac{nf'(\xi)}{f(\xi)} = \frac{f'(1-\xi)}{f(1-\xi)}$, 其中 n 为自然数.

证 将要证的等式化中的 ξ 换成 x , 并两边关于 x 积分得

$$n \ln|f(x)| = -\ln|f(1-x)| + C \Rightarrow f^n(x) \cdot f(1-x) = C$$

为此构造辅助函数

$$F(x) = f^n(x) \cdot f(1-x)$$

那么 $f(x) \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$, $F(0) = F(1)$, 故有 Rolle 定理知,

$$\exists \xi \in (0, 1), \text{ 使得 } F'(\xi) = nf^{n-1}(\xi)f'(\xi)f(1-\xi) - f^n(\xi)f'(1-\xi) = 0$$

又 $f(\xi), f(1-\xi) \neq 0$, 故有 $nf'(\xi)f(1-\xi) - f(\xi)f'(1-\xi) = 0$, 即 $\frac{nf'(\xi)}{f(\xi)} = \frac{f'(1-\xi)}{f(1-\xi)}$.

推论 2.3.1. 设函数 $f(x) \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$, $f(0) = 0$, 且 $\forall x \in (0, 1)$, 都有 $f(x) \neq 0$, 则至少存在一点 $\xi \in (0, 1)$, 使得

$$\frac{mf'(\xi)}{f(\xi)} = \frac{nf'(1-\xi)}{f(1-\xi)}$$

其中 m, n 为自然数.

例 2.3.6. 设 $f(x) \in C\left[0, \frac{\pi}{2}\right] \cap D\left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, $f(0) = f\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2}$, 证明: $\exists \xi \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, 使得 $f'(\xi) + f(\xi) = \cos \xi$.

证 构造辅助函数¹ $F(x) = e^x f(x) - \frac{e^x}{2} \cdot (\sin x + \cos x)$, 则

$$F(0) = F\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$$

¹解一阶线性微分方程

$$y = e^{-\int dx} \left[\int \cos x \cdot e^{\int dx} dx + C \right] = e^{-x} \left[\int \cos x e^x dx + C \right] = \frac{1}{2}(\sin x + \cos x) + C e^{-x}$$

$$\text{其中 } \int \cos x e^x dx = \frac{\left| \begin{array}{c} (\cos x)' \\ e^x \end{array} \right| - \left| \begin{array}{c} (\cos x)' \\ \cos x \end{array} \right|}{2} + C = \frac{1}{2}(\sin x + \cos x) + C.$$

由 Rolle 定理知, $\exists \xi \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, 使得

$$F'(\xi) = e^\xi [f'(\xi) + f(\xi) - \cos \xi] = 0$$

又 $e^\xi > 0$, 因此 $f'(\xi) + f(\xi) = \cos \xi$.

例 2.3.7 (第十届“景润杯”). 设 $f(x), g(x) \in C[a, b] \cap D(a, b)$, 且满足

$$2b > 3a, a + b > 0, f(a) = 0, f\left(\frac{2a+2b}{5}\right) + f\left(\frac{3a+3b}{5}\right) = 0$$

证明存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得 $f'(\xi) + f(\xi)g'(\xi) = 0$.

证 令 $h(x) = f(x)e^{g(x)}$, 由题意可得 $\frac{2a+2b}{5}, \frac{3a+3b}{5} \in (a, b)$, 由 $f\left(\frac{2a+2b}{5}\right) + f\left(\frac{3a+3b}{5}\right) = 0$, 可得

$$f\left(\frac{2a+2b}{5}\right) \cdot f\left(\frac{3a+3b}{5}\right) < 0 \text{ 或 } f\left(\frac{2a+2b}{5}\right) = f\left(\frac{3a+3b}{5}\right) = 0$$

若 $f\left(\frac{2a+2b}{5}\right) \cdot f\left(\frac{3a+3b}{5}\right) < 0$, 则由零点定理知, $\exists \eta \in \left(\frac{2a+2b}{5}, \frac{3a+3b}{5}\right)$, 使得 $f(\eta) = 0$; 若 $f\left(\frac{2a+2b}{5}\right) = f\left(\frac{3a+3b}{5}\right) = 0$, 则取 $\eta = \frac{2a+2b}{5}$, 那么 $f(\eta) = 0$, 显然 $[a, \eta] \subset [a, b]$, 且 $h(x)$ 在 $[a, \eta]$ 上满足 Rolle 定理的条件, 则 $\exists \xi \in (a, \eta) \subset (a, b)$, 使得 $h'(\xi) = 0$, 而 $h'(\xi) = e^{g(\xi)}[f'(\xi) + f(\xi)g'(\xi)] = 0$, 因 $e^{g(\xi)} \neq 0$, 故 $f'(\xi) + f(\xi)g'(\xi) = 0$.

常数 k 值法

一般用于端点函数值不确定的情况下, 即题目中没有说明 $f(a)$ 与 $f(b)$ 的值, 此时令带有中值的函数 $\varphi(\xi) = k$, 再将待证式中的一端点 b (或者 a) 改写为 x 即得辅助函数.

例 2.3.8. 设 $0 < a < b$, 函数 $f(x) \in C[a, b] \cap D(a, b)$, 证明至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$f(b) - f(a) = \xi f'(\xi) \ln \frac{b}{a}.$$

证法一 将要证式化为 $\frac{f(b) - f(a)}{\xi} = f'(\xi) \ln \frac{b}{a}$, 即需证明 $[(f(b) - f(a)) \ln x]_{x=\xi}' = \left[f(x) \ln \frac{b}{a}\right]_{x=\xi}'$, 为此, 作辅助函数

$$F(x) = (f(b) - f(a)) \ln x - f(x) \ln \frac{b}{a}$$

则 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且 $F(b) = F(a)$, 故由 Rolle 定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$F'(\xi) = (f(b) - f(a)) \frac{1}{\xi} - f'(\xi) \ln \frac{b}{a} = 0$$

即 $f(b) - f(a) = \xi f'(\xi) \ln \frac{b}{a}$.

证法二 将要证式化为 $\frac{f(b) - f(a)}{\ln b - \ln a} = \xi f'(\xi)$, 令 $\frac{f(b) - f(a)}{\ln b - \ln a} = k$, 则 $f(b) - k \ln b = f(a) - k \ln a$, 此时只需证 $k = \xi f'(\xi)$, 为此, 作辅助函数

$$F(x) = f(x) - k \ln x$$

则 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且 $F(b) = F(a)$, 故由 Rolle 定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$F'(\xi) = f'(\xi) - \frac{k}{\xi} = 0$$

即得 $k = \xi f'(\xi)$, 从而得 $f(b) - f(a) = \xi f'(\xi) \ln \frac{b}{a}$.

证法三 要证 $f(b) - f(a) = \xi f'(\xi) \ln \frac{b}{a}$, 只需设 k 为使等式 $f(b) - f(a) = k \cdot \ln \frac{b}{a}$ 成立的待定常数, 再证明 $k = \xi f'(\xi)$ 即可, 为此, 将等式中的 b 改写为 x , 并移项, 构造辅助函数

$$F(x) = f(x) - f(a) - k \ln \frac{x}{a}$$

则 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且 $F(b) = 0 = F(a)$, 于是由 Rolle 定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$F'(\xi) = f'(\xi) - \frac{k}{\xi} = 0$$

即得 $k = \xi f'(\xi)$, 从而得证.

证法四 将要证的等式化为 $\frac{f(b) - f(a)}{\ln b - \ln a} = \frac{f'(\xi)}{\frac{1}{\xi}}$, 易见, 设 $g(x) = \ln x$, 则 $f(x), g(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且

$\forall x \in (a, b), g'(x) = \frac{1}{x} \neq 0$, 故由 Cauchy 中值定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$\frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)} = \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)}$$

即 $\frac{f(b) - f(a)}{\ln b - \ln a} = \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)}$, 化简得 $f(b) - f(a) = \xi f'(\xi) \ln \frac{b}{a}$.

证法二又称为第一类常数 k 值法, 主要适用于常数部分可以分离的微积分中值等式证明题; 证法三则称为第二类常数 k 值法, 适用面更广.

推论 2.3.2. 设函数 $f(x), g(x) \in C[a, b] \cap D(a, b)$, 且 $g'(x) \neq 0$, 又 $g(x) > 0, a \leq x \leq b$, 则存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$g'(\xi) [f(b) - f(a)] = g(\xi) f'(\xi) \ln \frac{g(b)}{g(a)}.$$

证 因为 $f(x), g(x)$ 皆在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且 $g'(x) \neq 0$, 又 $g(x) > 0, a \leq x \leq b$, 所以由 Cauchy 定理知 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$\frac{\ln g(b) - \ln g(a)}{f(b) - f(a)} = \frac{g'(\xi)}{g(\xi) f'(\xi)}$$

整理即得待证式.

例 2.3.9. 设 $0 < a < b$, 函数 $f(x) \in C[a, b] \cap D(a, b)$, 证明 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$2\xi[f(b) - f(a)] = (b^2 - a^2)f'(\xi).$$

证法一 要证 $2\xi[f(b) - f(a)] = (b^2 - a^2)f'(\xi)$, 只需证

$$[x^2 \cdot (f(b) - f(a))]'_{x=\xi} = [(b^2 - a^2)f(x)]'_{x=\xi}$$

为此, 构造辅助函数 $F(x) = x^2 \cdot (f(b) - f(a)) - (b^2 - a^2)f(x)$, 那么 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且 $F(a) = F(b)$, 故由 Rolle 定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$F'(\xi) = 2\xi(f(b) - f(a)) - (b^2 - a^2)f'(\xi) = 0$$

即 $2\xi[f(b) - f(a)] = (b^2 - a^2)f'(\xi)$.

证法二 将要证的等式化为 $2\xi \frac{f(b) - f(a)}{b^2 - a^2} = f'(\xi)$, 令 $\frac{f(b) - f(a)}{b^2 - a^2} = k$, 则 $f(b) - kb^2 = f(a) - ka^2$, 为此, 构造辅助函数

$$F(x) = f(x) - kx^2$$

则 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且 $F(a) = F(b)$, 故由 Rolle 定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$F'(\xi) = f'(\xi) - 2k\xi = 0$$

即 $f'(\xi) = 2k\xi$, 因而在 $\frac{f(b) - f(a)}{b^2 - a^2} = k$ 的两边同时乘以 $2\xi(b^2 - a^2)$, 即得待证等式.

证法三 将要证的等式化为 $f(b) - f(a) = \frac{f'(\xi)}{2\xi}(b^2 - a^2)$, 设 k 为使 $f(b) - f(a) = k(b^2 - a^2)$ 成立的实常数, 则只需证 $k = \frac{f'(\xi)}{2\xi}$, 为此构造辅助函数:

$$F(x) = f(x) - f(a) - k(x^2 - a^2)$$

则 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且 $F(a) = F(b)$, 故由 Rolle 定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$F'(\xi) = f'(\xi) - 2k\xi = 0$$

即得 $f'(\xi) = 2k\xi$, 又 $0 < a < b$, $\xi \in (a, b)$, 所以 $\xi > 0$, 于是 $k = \frac{f'(\xi)}{2\xi}$, 从而得证.

证法四 将要证的等式化为 $\frac{f(b) - f(a)}{b^2 - a^2}$, 令 $g(x) = x^2$, 则 $f(x), g(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且 $\forall x \in (a, b)$, $g'(x) = 2x > 0$, 故由 *Cauchy* 定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$\frac{f(b) - f(a)}{b^2 - a^2} = \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)}$$

化简得 $2\xi[f(b) - f(a)] = (b^2 - a^2)f'(\xi)$.

推论 2.3.3. 一般地, 设函数 $f(x), g(x) \in C[a, b] \cap D(a, b)$, 则 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$g'(\xi)(f(b) - f(a)) = (g(b) - g(a))f'(\xi).$$

证 由 *Cauchy* 定理易证.

例 2.3.10. 设函数 $f(x) \in C[a, b] \cap D(a, b)$, 证明 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得 $\frac{f(\xi) - f(a)}{b - \xi} = f'(\xi)$.

证法一 将要证的等式化为 $f(\xi) + \xi f'(\xi) - f(a) - bf'(\xi) = 0$, 即只需证 $[xf(x) - f(a)x - bf(x)]'_{x=\xi}$, 为此构造辅助函数

$$F(x) = xf(x) - f(a)x - bf(x)$$

则 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且 $F(a) = -bf(a) = F(b)$, 故由 *Rolle* 定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$F'(\xi) = f(\xi) + \xi f'(\xi) - f(a) - bf'(\xi) = 0$$

化简即得 $\frac{f(\xi) - f(a)}{b - \xi} = f'(\xi)$.

证法二 将要证的等式化中的 ξ 化为 x , 有 $\frac{f(x) - f(a)}{b - x} = f'(x) \Rightarrow \frac{1}{b - x} = \frac{[f(x) - f(a)]'}{f(x) - f(a)}$, 两边关于 x 积分得

$$-\ln(b - x) = \ln|f(x) - f(a)| + \ln C$$

即 $(b - x)(f(x) - f(a)) \equiv C$, 为此构造辅助函数

$$F(x) = (b - x)(f(x) - f(a))$$

则 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且 $F(a) = 0 = F(b)$, 故由 *Rolle* 定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$F'(\xi) = bf'(\xi) - f(\xi) - \xi f'(\xi) + f(a) = 0$$

化简即得 $\frac{f(\xi) - f(a)}{b - \xi} = f'(\xi)$.

证法三 将要证的等式化为 $(b - \xi)f'(\xi) - f(\xi) = -f(a) = -\frac{(b - a)f(a)}{b - a}$, 为此构造辅助函数

$$F(x) = (b - x)f(x)$$

则 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 故由 *Lagrange* 中值定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$\frac{F(b) - F(a)}{b - a} = F'(\xi) = -f(\xi) + (b - \xi)f'(\xi)$$

即得 $f'(\xi) = \frac{f(\xi) - f(a)}{b - \xi}$.

证法四 将要证的等式化为 $f(\xi) - f(a) + \xi f'(\xi) = bf'(\xi)$, 即只需证

$$\frac{1}{b} = \frac{f'(\xi)}{f(\xi) - f(a) + \xi f'(\xi)}$$

而 $f(\xi) - f(a) + x\xi f'(\xi) = [xf(x) - f(a)x]_{x=\xi}'$, 为此构造辅助函数

$$F(x) = x(f(x) - f(a))$$

则 $f(x), F(x)$ 在 $[a, b]$ 满足 *Cauchy* 中值定理的条件, 于是 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$\frac{f(b) - f(a)}{F(b) - F(a)} = \frac{f'(\xi)}{F'(\xi)}$$

化简即得 $\frac{f(\xi) - f(a)}{b - \xi} = f'(\xi)$.

推论 2.3.4. 设函数 $f(x), g(x) \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$, 且对任意的 $x \in (a, b)$, 有 $g'(x) \neq 0$, 则至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\frac{f(\xi) - f(a)}{g(b) - g(\xi)} = \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)}.$$

证 要证 $\frac{f(\xi) - f(a)}{g(b) - g(\xi)} = \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)}$, 只需证 $(g(\xi) - g(b))f'(\xi) + (f(\xi) - f(a))g'(\xi) = 0$, 即证

$$(g(x)f(x) - g(b)f(x) - f(a)g(x))'_{x=\xi} = 0$$

为此构造辅助函数 $F(x) = (f(x) - f(a))(g(x) - g(b))$ 则 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, $F(a) = F(b)$ 故由 Rolle 定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$F'(\xi) = f'(\xi)(g(\xi) - g(b))g'(\xi)(f(\xi) - f(a)) = 0$$

即得 $\frac{f(\xi) - f(a)}{g(b) - g(\xi)} = \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)}$.

2.3.3 双中值问题

证明含有两个中值(可相等)微分等式的常见方法有:

- (1) 使用两次 Lagrange 中值定理;
- (2) 使用两次 Cauchy 中值定理;
- (3) 使用两次 Taylor 中值定理;
- (4) 使用 Rolle 定理、Lagrange 中值定理及 Cauchy 中值定理中的任两个定理各一次.

对于含有三个中值微分等式的证明题, 其证明方法可以类似地推广得到. 如果两个中值不相等, 那么可对区间进行划分, 在各自的子区间运用中值定理.

区间无需划分

例 2.3.11. 设函数 $f(x) \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$, 且 $f(a) = f(b) = 1$, 证明存在 $\xi, \eta \in (a, b)$, 使得 $e^{\eta-\xi}[f(\eta) - f'(\eta)] = 1$.

证法一 将要证明的等式中含 ξ 和 η 的项分别放到等式的两侧, 化为

$$e^\eta [f(\eta) + f'(\eta)] = e^\xi$$

即只需证 $[ef(x)]'_{x=\eta} = (e^x)'_{x=\xi}$, 而由 Lagrange 中值定理知,

$$\frac{e^b - e^a}{b - a} = (e^x)'_{x=\xi}, \quad \frac{e^b f(b) - e^a f(a)}{b - a} = [ef(x)]'_{x=\eta}$$

且 $f(a) = f(b) = 1$ 知 $\frac{e^b - e^a}{b - a} = \frac{e^b f(b) - e^a f(a)}{b - a}$, 故可令

$$F(x) = e^x f(x), \quad G(x) = e^x$$

则 $F(x), G(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 于是分别对 $F(x)$ 和 $G(x)$ 用 Lagrange 中值定理知 $\exists \xi, \eta \in (a, b)$, 使得

$$\frac{e^b - e^a}{b - a} = (e^x)'_{x=\xi} = e^\xi, \quad \frac{e^b f(b) - e^a f(a)}{b - a} = [ef(x)]'_{x=\eta} = e^\eta [f(\eta) + f'(\eta)]$$

又 $f(a) = f(b) = 1$, 从而得 $e^\eta [f(\eta) + f'(\eta)] = e^\xi$, 即 $e^{\eta-\xi}[f(\eta) - f'(\eta)] = 1$.

证法二 要证 $e^{\eta-\xi}[f(\eta) - f'(\eta)] = 1$, 即要证 $e^{\eta-\xi}[f(\eta) - f'(\eta)] - 1 = 0$, 将 η 改写为 x 后, 只需证 $[e^{x-\xi} \cdot f(x) - x]'_{x=\eta} = 0$,

为此构造辅助函数

$$F(x) = e^{x-\xi} \cdot f(x) - x$$

即证 $F(x)$ 满足 Rolle 定理, 而这需要证明 $F(b) = F(a)$, 即 $e^{b-\xi} - e^{a-\xi} = b - a$, 再令 $G(x) = e^x$, 则 $G(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 由 Lagrange 中值定理知, $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$G(b) - G(a) = G'(\xi)(b - a)$$

从而得 $F(a) = F(b)$, 故由 Rolle 定理知, $\exists \eta \in (a, b)$, 使得 $F'(\eta) = 0$, 即 $e^{\eta-\xi}[f(\eta) - f'(\eta)] = 1$.

例 2.3.12. 设 $f(x) \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$, 证明: $\exists \xi, \eta \in (0, 1)$, 使得

$$e^{\eta-1}[f(\xi) + \xi f'(\xi)] = \eta f'(\eta) + f(\eta) - \eta f(\eta).$$

证 对 $xf(x)$ 在 $[0, 1]$ 上使用 Lagrange 中值定理, 有

$$\frac{1 \cdot f(1) - 0}{1 - 0} = f(\xi) + \xi f'(\xi) = 1, \quad \xi \in (0, 1)$$

对 $x e^{-x} f(x)$ 在 $[0, 1]$ 上使用 Lagrange 中值定理, 有

$$\frac{e^{-1} f(1) - 0}{1 - 0} = e^{-\eta} [\eta f'(\eta) + f(\eta) - \eta f(\eta)] = e^{-1} f(\eta), \quad \eta \in (0, 1)$$

两式联立即得证.

例 2.3.13. 设 $0 < a < b$, $f(x) \in C[a, b] \cap D(a, b)$, $f'(x) \neq 0$, 证明 $\exists \xi, \eta \in (a, b)$, 使得 $ab\xi f'(\xi) \ln \frac{b}{a} = (b-a)\eta^2 f'(\eta)$.

证 令 $g(x) = -\frac{1}{x}$, $h(x) = \ln x$, 那么 f, g, h 均在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且满足 Cauchy 中值定理的条件, 于是 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$\frac{f(b) - f(a)}{h(b) - h(a)} = \frac{f'(\xi)}{\frac{1}{\xi}} \Rightarrow f(b) - f(a) = \ln \frac{b}{a} \xi f'(\xi)$$

同理 $\exists \eta \in (a, b)$, 使得

$$\frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)} = \frac{f'(\eta)}{\frac{1}{\eta^2}} \Rightarrow f(b) - f(a) = (b-a) \frac{\eta^2 f'(\eta)}{ab}$$

故 $\ln \frac{b}{a} \xi f'(\xi) = (b-a) \frac{\eta^2 f'(\eta)}{ab}$, 整理得 $ab\xi f'(\xi) \ln \frac{b}{a} = (b-a)\eta^2 f'(\eta)$.

例 2.3.14. 设 $a > 0$, 函数 $f(x) \in C[a, b] \cap D(a, b)$, 且 $f(a) \neq f(b)$, 证明: $\exists \xi, \eta \in (a, b)$, 使得

$$ab(a+b)f'(\xi) = 2\xi\eta^2 f'(\eta).$$

证 令 $g(x) = x^2$, $h(x) = \frac{1}{x}$, f, g, h 均在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 由 Cauchy 中值定理知,

$$\begin{aligned} \frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)} &= \frac{f'(\xi)}{g'(\xi)} \Rightarrow f(b) - f(a) = (b^2 - a^2) \frac{f'(\xi)}{2\xi} \\ \frac{f(b) - f(a)}{h(b) - h(a)} &= \frac{f'(\eta)}{h'(\eta)} \Rightarrow f(b) - f(a) = \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right) f'(\eta) \eta^2 \end{aligned}$$

故 $(b^2 - a^2) \frac{f'(\xi)}{2\xi} = \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right) f'(\eta) \eta^2$, 整理即得 $ab(a+b)f'(\xi) = 2\xi\eta^2 f'(\eta)$.

区间需要划分

例 2.3.15. 已知函数 $f(x) \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$, 且 $f(0) = 0$, $f(1) = \frac{1}{2}$, 证明存在 $\xi, \eta \in (0, 1)$, $\xi \neq \eta$, 使得 $f'(\xi) + f'(\eta) = \xi + \eta$.

证 要证 $f'(\xi) + f'(\eta) = \xi + \eta$, 即证 $f'(\xi) - \xi = \eta - f'(\eta)$, 为此构造辅助函数

$$F(x) = f(x) - \frac{1}{2}x^2$$

那么 $f(x) \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$, 那么由 Lagrange 中值定理 $\exists \xi \in \left(0, \frac{1}{2}\right), \eta \in \left(\frac{1}{2}, 1\right)$ 使得

$$F\left(\frac{1}{2}\right) - F(0) = \frac{1}{2}F'(\xi) = \frac{f'(\xi) - \xi}{2}, \quad F(1) - F\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2}F'(\eta) = \frac{f'(\eta) - \eta}{2}$$

因为 $F(0) = F(1) = 0$, 于是 $F\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{f'(\xi) - \xi}{2} = -\frac{f'(\eta) - \eta}{2} \Rightarrow f'(\xi) + f'(\eta) = \xi + \eta$.

例 2.3.16. 设函数 $f(x) \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$, 且 $f(0) = 0, f(1) = 1$, 证明: $\exists \lambda, \mu \in (0, 1)$, 且 $\lambda \neq \mu$, 使得

$$f'(\lambda)(f'(\mu) + 1) = 2.$$

证 令 $F(x) = f(x) - 2(1 - x)$, 则 $F(x)$ 在区间 $[0, 1]$ 上连续, 在 $(0, 1)$ 内可导, 且 $F(0) < 0, F(1) > 0$, 由介值定理知, $\exists x_0 \in (0, 1)$, 使 $F(x_0) = 0$, 即

$$f(x_0) = 2(1 - x_0)$$

对区间 $[0, x_0]$ 和 $[x_0, 1]$, 使用 Lagrange 中值定理, 有

$$\frac{f(x_0) - f(0)}{x_0 - 0} = f'(\lambda), \quad \frac{f(1) - f(x_0)}{1 - x_0} = f'(\mu)$$

于是 $f'(\lambda)(f'(\mu) + 1) = \frac{f(x_0)}{x_0} \left(\frac{1 - f(x_0)}{1 - x_0} + 1 \right) = 2$.

例 2.3.17. 设 $f(x) \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$, 且 $f(0) = 0, f(1) = 1$, 证明:

(1) 若 $0 < a < 1$, 则在 $(0, 1)$ 内至少存在一点 ξ , 使得 $f(\xi) = a$;

(2) 在 $(0, 1)$ 内存在两个不同点 ξ_1, ξ_2 , 使得

$$\frac{1}{f'(\xi_1)} + \frac{2022}{f'(\xi_2)} = 2023.$$

证

(1) 令 $F(x) = f(x) - a$, 那么 $F(0) = -a < 0, F(1) = 1 - a > 0$, 故由零点定理知, $\exists \xi \in (0, 1)$, 使得 $F(\xi) = 0$, 即 $f(\xi) = a$;

(2) 因为 $0 < \frac{1}{2023} < 1$, 那么由 (1) 可知, $\exists \xi_0 \in (0, 1)$, 使得 $f(\xi_0) = \frac{1}{2023}$, 于是在区间 $(0, \xi_0)$ 和 $(\xi_0, 1)$ 上分别使用 Lagrange 中值定理, 有

$$f(\xi_0) - f(0) = \frac{1}{2023} = f'(\xi_1)\xi_0, \quad f(1) - f(\xi_0) = 1 - \frac{1}{2023} = f'(\xi_2)(1 - \xi_0)$$

两式消去 ξ_0 , 得 $\frac{1}{f'(\xi_1)} + \frac{2022}{f'(\xi_2)} = 2023, 0 < \xi_1 < \xi_0 < \xi_2 < 1$.

推论 2.3.5. 一般地, 设 $f(x) \in C[0, 1] \cap D(0, 1)$, 且 $f(0) = 0, f(1) = 1$, 那么

$$\frac{a}{f'(\xi)} + \frac{b}{f'(\eta)} = a + b.$$

例 2.3.18. 设函数 $f(x) \in C[0, 1] \cap D^2(0, 1)$, $f(0) = f(1) = 0, f(x) > 0$, 证明:

(1) 在 $(0, 1)$ 内存在两个不同的 ξ_1, ξ_2 , 使得 $\frac{1}{f'(\xi_1)} + \frac{1}{f'(\xi_2)} = \min_{0 < x < 1} \frac{1}{f(x)}$;

(2) $\int_0^1 \frac{|f''(x)|}{f(x)} dx \geq 4$.

证

- (1) 由题设可知函数 $f(x)$ 在 $[0, 1]$ 上连续, 由最值定理知, $\exists \xi_0 \in (0, 1)$, 使得 $f(\xi_0) = \max_{0 < x < 1} f(x)$, 于是在区间 $(0, \xi_0)$ 和 $(\xi_0, 1)$ 上分别使用 Lagrange 中值定理, 有

$$f(\xi_0) - f(0) = \max_{0 < x < 1} f(x) = f'(\xi_1)\xi_0, f(1) - f(\xi_0) = -\max_{0 < x < 1} f(x) = f'(\xi_2)(1 - \xi_0)$$

即

$$\frac{\xi_0}{f(\xi_0)} = \frac{1}{f'(\xi_1)}, \frac{1 - \xi_0}{f(\xi_0)} = -\frac{1}{f'(\xi_2)}, 0 < \xi_1 < \xi_0 < \xi_2 < 1$$

$$\text{两式相加, 即得证 } \frac{1}{f'(\xi_1)} + \frac{1}{f'(\xi_2)} = \min_{0 < x < 1} \frac{1}{f(x)};$$

- (2) 由 (1) 可知,

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{|f''(x)|}{f(x)} dx &\geq \frac{1}{f(\xi_0)} \int_0^1 |f''(x)| dx \geq \frac{1}{f(\xi_0)} \int_{\xi_1}^{\xi_2} |f''(x)| dx \geq \frac{1}{f(\xi_0)} \left| \int_{\xi_1}^{\xi_2} f''(x) dx \right| \\ &= \frac{1}{f(\xi_0)} |f'(\xi_1) - f'(\xi_2)| = \frac{1}{f(\xi_0)} \left| -\frac{f(\xi_0)}{1 - \xi_0} - \frac{f(\xi_0)}{\xi_0} \right| = \frac{1}{\xi_0(1 - \xi_0)} \geq 4 \end{aligned}$$

即所证不等式成立.

2.3.4 高阶中值问题

层次分析法

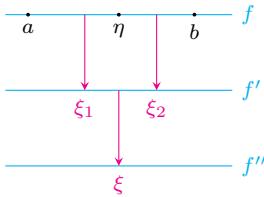


图 2.3.1

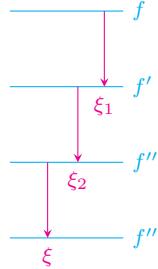


图 2.3.2

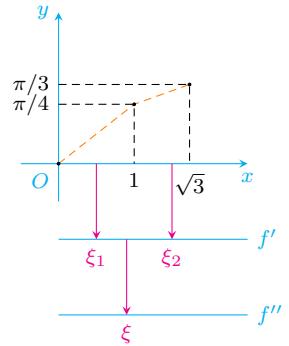


图 2.3.3

例 2.3.19. 设 $f(x) \in C[a, b] \cap D^2(a, b)$, $f(a) = f(b) = 0$, $f'_+(a) > 0$, 证明: $\exists \xi \in (a, b)$, 使得 $f''(\xi) < 0$.

如图 2.3.1 所示, 因为 $f'_+(a) = \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x) - f(a)}{x - a}$, 且 $f(a) = 0$, 因此 $\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{x - a} > 0$, 所以 $\exists \eta \in (a, b)$, 使得 $f(\eta) > 0$, 在 $[a, \eta]$ 和 $[\eta, b]$ 上分别使用 Lagrange 中值定理, 有

$$\frac{f(\eta) - f(a)}{\eta - a} = f'(\xi_1) > 0, \frac{f(b) - f(\eta)}{b - \eta} = f'(\xi_2) < 0, \xi_1 \in (a, \eta), \xi_2 \in (\eta, b)$$

在 $[\xi_1, \xi_2]$ 满足 Lagrange 中值定理条件, 故 $\exists \xi \in (\xi_1, \xi_2) \subset (a, b)$, 使得

$$\frac{f'(\xi_2) - f'(\xi_1)}{\xi_2 - \xi_1} = f''(\xi) < 0.$$

例 2.3.20. 设函数 $f(x) \in C[0, 1] \cap D^3(0, 1)$, 且 $f(0) = f(1) = 0$, 又 $F(x) = x^3 f(x)$, 证明存在 $\xi \in (0, 1)$, 使得 $F'''(\xi) = 0$.

证法一 如图 2.3.2 所示, 欲使在 f''' 层次有一中值, 则需要在 f'' 层次中寻找一个左右端点皆为 0 值的区间, 同理 f' 层次中也需要寻找两个零点, 由已知 $F(0) = F(1) = 0$ 且 $F(x)$ 在 $[0, 1]$ 上可导, 故由 Rolle 定理知, $\exists \xi_1 \in (0, 1)$, 使得 $F'(\xi_1) = 0$, 又

$$F'(x) = 3x^2 f(x) + x^3 f'(x), F''(x) = 6xf(x) + 6x^2 f'(x) + x^3 f''(x)$$

所以 $F'(0) = 0, F''(0) = 0$, 于是由 Rolle 定理知, $\exists \xi_2 \in (0, \xi_1)$, 使得 $F''(\xi_2) = 0$, 再由 $F''(x)$ 在 $[0, \xi_2]$ 上用 Rolle 定理知, $\exists \xi \in (0, \xi_2) \subset (0, \xi_1) \subset (0, 1)$, 使得 $F'''(\xi) = 0$.

证法二 $F(x) = x^3 f(x)$ 在 $[0, 1]$ 上三阶可导, 且 $F(0) = F(1) = 0, F'(0) = F''(0) = 0$, 令 $g(x) = x^3$, 则 $g'(x) = 3x^2 > 0, g''(x) = 6x > 0, \forall x \in (0, 1)$, 由 Cauchy 中值定理知,

$$\frac{F(1) - F(0)}{g(1) - g(0)} = \frac{F'(\xi_1)}{g'(\xi_1)}$$

然后分别对 $F'(x)$ 与 $g'(x)$ 在 $[0, \xi_1]$ 和 $F''(x)$ 与 $g''(x)$ 在 $[0, \xi_2]$ 上用 Cauchy 中值定理知,

$$0 = \frac{F'(\xi_1) - F'(0)}{g'(\xi_1) - g'(0)} = \frac{F''(\xi_2)}{g''(\xi_2)} = \frac{F''(\xi_2) - F''(0)}{g''(\xi_2) - g''(0)} = \frac{F'''(\xi)}{g'''(\xi)} = \frac{F'''(\xi)}{6}$$

其中 $\xi_2 \in (0, \xi_1), \xi \in (0, \xi_2) \subset (0, 1)$, 故得 $F'''(\xi) = 0$.

例 2.3.21. 设函数 $f(x) \in C[a, b] \cap D^5(a, b)$, 证明: $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$f(b) = f(a) + \frac{1}{6}(b-a) \left[f'(a) + f'(b) + 4f'\left(\frac{a+b}{2}\right) \right] - \frac{(b-a)^5}{2880} f^{(5)}(\xi).$$

证 令 $h = \frac{b-a}{2}, c = \frac{a+b}{2}$, 则待证式等价为

$$f(c+h) = f(c-h) + \frac{h}{3} [f'(c-h) + f'(c+h) + 4f'(c)] - \frac{h^5}{90} f^{(5)}(\xi)$$

令 $h = x$, 构造辅助函数

$$\varphi(x) = f(c+x) - f(c-x) - \frac{x}{3} [f'(c-x) + f'(c+x) + 4f'(c)] + \frac{x^5}{90} k$$

即证 $k = f^{(5)}(\xi)$, 因为 $f \in C[a, b] \cap D^5(a, b)$, 所以 $\varphi(x) \in C[a, b] \cap D^4(a, b)$, 因此

$$\begin{aligned} \varphi'(x) &= \frac{2}{3} [f'(c+x) + f'(c-x)] - \frac{4}{3} f'(c) + \frac{x}{3} [f''(c-x) - f''(c+x)] + \frac{x^4}{18} k \\ \varphi''(x) &= \frac{1}{3} [f''(c+x) - f''(c-x)] - \frac{x}{3} [f'''(c-x) + f'''(c+x)] + \frac{2x^3}{9} k \\ \varphi'''(x) &= \frac{x}{3} [f^{(4)}(c-x) - f^{(4)}(c+x)] + \frac{2x^2}{3} k \end{aligned}$$

因为 $\varphi(0) = \varphi(h) = 0$, 由 Rolle 定理知, $\exists \xi_1 \in (0, h)$, 使得 $\varphi'(\xi_1) = 0$, 而 $\varphi'(0) = 0$, 所以, 又由 Rolle 定理知, $\exists \xi_2 \in (0, \xi_1)$, 使得 $\varphi''(\xi_2) = 0$, 最后又因为 $\varphi''(0) = 0$, 所以 $\exists \xi_3$, 使得

$$\varphi'''(\xi_3) = \frac{\xi_3}{3} [f^{(4)}(c-\xi_3) - f^{(4)}(c+\xi_3)] + \frac{2\xi_3^2}{3} k$$

又根据 Lagrange 中值定理, $\exists \xi(c-\xi_3, c+\xi_3) \subset (a, b)$, 使得

$$f^{(4)}(c-\xi_3) - f^{(4)}(c+\xi_3) = f^{(5)}(\xi)(-2\xi_3)$$

$$\text{即 } 0 = \frac{-2\xi_3^2}{3} f^{(5)}(\xi) + \frac{2\xi_3^2}{3} k \Rightarrow f^{(5)}(\xi) = k.$$

特殊函数作差法

例 2.3.22. 设 $f(x) \in C[0, \sqrt{3}] \cap D^2(0, \sqrt{3})$, 且 $f(0) = 0, f(1) = \frac{\pi}{4}, f(\sqrt{3}) = \frac{\pi}{3}$, 证明: $\exists \xi \in (0, \sqrt{3})$,

$$\text{使得 } f''(\xi) = -\frac{2\xi}{1+\xi^2} f'(\xi).$$

证: 如图 2.3.3 所示, 欲证在 f'' 层次有一中值, 则需寻找在 f' 层次的两个过渡中值, 那么就需要在 f 层次, 即通过作差的方法将第一象限的两个坐标点, 向下移动到 x 轴, 使得在 x 轴上存在 3 个零点, 满足这一性质的可以思考到将 $f(x)$ 与 $\arctan x$ 作差得到, 即令 $g(x) = f(x) - \arctan x$, 则 $g(0) = g(1) = g(\sqrt{3}) = 0$, 由 Rolle 中值定理知 $\exists \xi_1 \in (0, 1), \exists \xi_2 \in (1, \sqrt{3})$, 使 $g'(\xi_1) = g'(\xi_2) = 0$, 即

$$(1 + \xi_1^2) f'(\xi_1) = (1 + \xi_2^2) f'(\xi_2) = 1$$

再令 $h(x) = (1+x^2) f'(x)$, 那么 $h(\xi_1) = h(\xi_2)$, 又由 Rolle 中值定理知 $\exists \xi \in (\xi_1, \xi_2) \subset (0, \sqrt{3})$, 使 $h'(\xi) = 0$, 整理即得待证式.

合理分配法

例 2.3.23. 设 $f(x) \in C\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \cap D\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$, $f(0) = 0$, 证明: $\exists \xi \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$, 使得

$$f''(\xi) = 3f'(\xi) \tan \xi + 2f(\xi).$$

证 构造辅助函数² $F(x) = f(x) \cdot \cos^2 x$, 那么有 $F\left(-\frac{\pi}{2}\right) = F\left(\frac{\pi}{2}\right) = F(0) = 0$, 则由 Rolle 定理知, $\exists \xi_1, \xi_2$ 分别属于 $\left(-\frac{\pi}{2}, 0\right)$ 与 $\left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, 使得 $F'(\xi_1) = F'(\xi_2) = 0$, 又

$$F'(x) = f'(x) \cos^2 x - 2 \sin x \cos x f(x) = \cos x [f'(x) \cos x - 2 \sin x f(x)]$$

令 $g(x) = f'(x) \cos x - 2 \sin x f(x)$, 则有 $g(\xi_1) = g(\xi_2) = 0$, 再由 Rolle 定理知, $\exists \xi \in (\xi_1, \xi_2) \subset \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$, 使得

$$g'(\xi) = 0 = f''(\xi) \cos \xi - 3f(\xi) \sin \xi - 2f(\xi) \cos \xi$$

由于 $\cos \xi \neq 0$, 所以两边同时除以 $\cos \xi$, 即得证.

补充导函数法

一般待证式中, 出现的导函数阶数是连续的, 即 0 与 1 或 1 与 2, 亦或常数与导函数直接相等的类型, 当缺失一阶导函数的时候, 需要人为补充一阶导, 之后再构造辅助函数.

例 2.3.24. 设函数 $f(x) \in C[a, b] \cap D^2(a, b)$, 且 $f(a) = f'(a) = f''(a) = f(b) = 0$, 证明: $\exists \xi \in (a, b)$, 使得 $(\xi - a)^2 f''(\xi) - 2f(\xi) = 0$.

证 先令³ $F(x) = (x - a)^2 f'(x) - 2f(x)(x - a)$, 则 $F(a) = 0$, 欲再寻找一点 η , 使得 $F(\eta) = 0$, 为此构造辅助函数

$$G(x) = \begin{cases} \frac{f(x)}{(x - a)^2}, & x \in (a, b] \\ 0, & x = a \end{cases}$$

则有 $\lim_{x \rightarrow a^+} G(x) = \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{(x - a)^2} = \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(a) + f'(a)(x - a) + \frac{1}{2!} f''(a)(x - a)^2 + o((x - a)^2)}{(x - a)^2} = 0 = G(0)$, 因此 $G(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内可导, 且 $G(a) = G(b)$ 则由 Rolle 定理知 $\exists \eta \in (a, b)$, 使得

$$G'(\eta) = \frac{f'(\eta)(\eta - a)^2 - 2(\eta - a)f(\eta)}{(\eta - a)^4} = 0 \Rightarrow f'(\eta)(\eta - a)^2 - 2(\eta - a)f(\eta) = 0 \Rightarrow F(\eta) = 0$$

又因为 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, (a, b) 内可导, 故由 Rolle 定理知 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$F'(\xi) = 2(\xi - a)f'(\xi) + (\xi - a)^2 f''(\xi) - 2f'(\xi)(\xi - a) - 2f(\xi) = 0$$

整理即得证 $(\xi - a)^2 f''(\xi) - 2f(\xi) = 0$.

²首先观察待证式的各项系数, 发现存在 $1 + 2 = 3$ 的情况, 于是利用“合理分配达到平均”思想, 组成

$$f''(\xi) - f'(\xi) \tan \xi = 2[f'(\xi) \tan \xi + f(\xi)]$$

又 $\cos \xi \neq 0$, 于是两边同时乘以 $\cos \xi$, 得 $[f''(\xi) \cos \xi - f'(\xi) \sin \xi] - 2[f'(\xi) \sin \xi + f(\xi) \cos \xi] = 0$; 发现 $[]$ 内是“前导后不导”形式, 则可化为 $g'(\xi) = (f'(\xi) \cos \xi)' - 2(f(\xi) \sin \xi)' = 0$, $g(x) = f'(x) \cos x - 2f(x) \sin x$; 此为“经典构造模型”之一 (参考表 2.1), 则构造辅助函数

$$F(x) = f(x)e^{\int -2 \tan x dx} = f(x) \cdot \cos^2 x.$$

³因为缺少一阶导项, 故考虑人为补充, 又由待证式的结构不难想到 $(gf' - fg')'$ 其中 $g = (x - a)^2$.

2.4 Taylor 展开与差商

定理 2.4.1 (带 Lagrange 余项的 Taylor 展开). 利用 Taylor 公式可得:

$$f(x+j) = f(x) + \frac{f'(x)}{1!}j + \frac{f''(x)}{2!}j^2 + \cdots + \frac{f^{(n-1)}(x)}{(n-1)!}j^{n-1} + \frac{f^{(n)}(\xi_j)}{n!}j^n$$

其中 $j = 1, 2, \dots, n-1$, $x < \xi_j < x+j$.

2.4.1 证明中值定理

例 2.4.1. 设函数 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上具有连续的二阶导数, 证明: $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$\frac{4}{(b-a)^2} \left[f(a) - 2f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right] = f''(\xi).$$

证法一 函数 $f(x)$ 在 $x = \frac{a+b}{2}$ 处的一阶带 Lagrange 余项的 Taylor 公式为

$$f(x) = f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f'\left(\frac{a+b}{2}\right)\left(x - \frac{a+b}{2}\right) + \frac{f''(\xi_1)}{2}\left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2$$

其中 ξ_1 位于 $x, \frac{a+b}{2}$ 之间, 令 $x=a, b$ 代入上式, 得

$$\begin{aligned} f(a) &= f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f'\left(\frac{a+b}{2}\right)\left(a - \frac{a+b}{2}\right) + \frac{f''(x_1)}{2}\left(a - \frac{a+b}{2}\right)^2 \\ f(b) &= f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f'\left(\frac{a+b}{2}\right)\left(b - \frac{a+b}{2}\right) + \frac{f''(x_2)}{2}\left(b - \frac{a+b}{2}\right)^2 \end{aligned}$$

其中 $a < x_1 < \frac{a+b}{2}, \frac{a+b}{2} < x_2 < b, x_1 < x_2$, 两式相加, 得

$$f(a) + f(b) = 2f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{f''(x_1) + f''(x_2)}{2}\left(\frac{b-a}{2}\right)^2$$

改写得

$$\frac{4}{(b-a)^2} \left[f(a) + f(b) - 2f\left(\frac{a+b}{2}\right) \right] = \frac{f''(x_1) + f''(x_2)}{2}$$

由于函数 $f(x)$ 在闭区间 $[a, b]$ 上具有连续的二阶导数, 所以由最值定理, 可知

$$\min_{x \in [x_1, x_2]} f''(x) \leq \frac{f''(x_1) + f''(x_2)}{2} \leq \max_{x \in [x_1, x_2]} f''(x)$$

于是由介值定理可知存在 $\xi \in (a, b)$, 使得 $\frac{f''(x_1) + f''(x_2)}{2} = f''(\xi)$, 代入即得

$$\frac{4}{(b-a)^2} \left[f(a) - 2f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right] = f''(\xi).$$

证法二 设 $f(x) - 2f\left(\frac{x+a}{2}\right) + f(a) = \frac{1}{4}K(x-a)^2$, 其中 K 为待定实常数, 记

$$F(x) = f(x) - 2f\left(\frac{x+a}{2}\right) + f(a) - \frac{1}{4}K(x-a)^2$$

则 $F(a) = F(b) = 0$, 由 Rolle 中值定理, $\exists c \in (a, b)$, 使得 $F'(c) = 0$, 即

$$f'(c) - f'\left(\frac{c+a}{2}\right) - \frac{1}{2}K(c-a) = 0$$

再由 Lagrange 中值定理, $\exists \xi \in \left(\frac{a+c}{2}, c\right)$, 使得

$$f'(c) - f'\left(\frac{c+a}{2}\right) = f''(\xi)\left(c - \frac{c+a}{2}\right)$$

比较得 $f''(c)\left(c - \frac{c+a}{2}\right) - \frac{1}{2}K(c-a) = 0$, 由此得 $f''(\xi) = K$.

例 2.4.2. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 在 (a, b) 内二阶可导, 证明存在 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$f(b) - 2f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(a) = \frac{(b-a)^2}{4}f''(\xi).$$

证法一 注意到

$$f(b) - 2f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(a) = \left[f\left(\frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2}\right) - f\left(\frac{a+b}{2}\right)\right] - \left[f\left(a + \frac{b-a}{2}\right) - f(a)\right]$$

令 $F(x) = f\left(x + \frac{b-a}{2}\right) - f(x)$, $x \in \left[a, \frac{a+b}{2}\right]$, 则 $F(x)$ 在 $\left[a, \frac{a+b}{2}\right]$ 上连续, 在 $\left(a, \frac{a+b}{2}\right)$ 内二阶可导, 故由 Lagrange 中值定理,

$$\exists \xi_1 \in \left(a, \frac{a+b}{2}\right), \text{ 使 } F\left(\frac{a+b}{2}\right) - F(a) = F'(\xi_1) \cdot \frac{b-a}{2}$$

又由 $f'(x)$ 在 $\left[\xi_1, \xi_1 + \frac{b-a}{2}\right]$ 上用 Lagrange 中值定理,

$$\exists \xi \in \left(\xi_1, \xi_1 + \frac{b-a}{2}\right) \subset (a, b), \text{ 使 } f'\left(\xi_1 + \frac{b-a}{2}\right) - f'(\xi_1) = f''(\xi) \cdot \frac{b-a}{2}$$

代入上式, 即得 $f(b) - 2f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(a) = \frac{(b-a)^2}{4}f''(\xi)$.

证法二 将 $f(a), f(b)$ 分别在 $x = \frac{a+b}{2}$ 处进行 Taylor 展开, 得

$$\begin{aligned} f(a) &= f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{a-b}{2}f'\left(\frac{a+b}{2}\right) + \left(\frac{a-b}{2}\right)^2 \frac{f''(\xi_1)}{2!} \\ f(b) &= f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{b-a}{2}f'\left(\frac{a+b}{2}\right) + \left(\frac{b-a}{2}\right)^2 \frac{f''(\xi_2)}{2!} \end{aligned}$$

其中 $a < \xi_1 < \frac{a+b}{2} < \xi_2 < b$, 两式相加, 得

$$f(b) - 2f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(a) = \frac{(b-a)^2}{4} \cdot \left[\frac{f''(\xi_1) + f''(\xi_2)}{2} \right]$$

而 $\min(f''(\xi), f''(\xi_2)) \leq \frac{f''(\xi_1) + f''(\xi_2)}{2} \leq \max(f''(\xi_1), f''(\xi_2))$, 由 Darboux 定理知, 存在 $\xi \in (\xi_1, \xi_2) \subset (a, b)$, 使得 $f''(\xi) = \frac{f''(\xi_1) + f''(\xi_2)}{2}$, 从而得 $f(b) - 2f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(a) = \frac{(b-a)^2}{4}f''(\xi)$.

证法三 要证 $f(b) - 2f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(a) = \frac{(b-a)^2}{4}f''(\xi)$, 即证

$$\frac{f(b) - 2f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(a)}{(b-a)^2} = \frac{1}{4}f''(\xi)$$

为此, 构造辅助函数 $F(x) = f(x) - 2f\left(\frac{a+x}{2}\right) + f(a)$, $G(x) = (x-a)^2$, 则 $F(x), G(x)$ 满足 Cauchy 中值定理的条件, 故由 Cauchy 中值定理得

$$\frac{F(b)}{G(b)} = \frac{F(b) - F(a)}{G(b) - G(a)} = \frac{F'(\xi_1)}{G'(\xi_1)} = \frac{f'(\xi_1) - f'\left(\frac{a+\xi_1}{2}\right)}{2(\xi_1 - a)} = \frac{f''(\xi) \cdot \frac{\xi_1 - a}{2}}{2(\xi_1 - a)} = \frac{1}{4}f''(\xi)$$

其中 $\xi_1 \in (a, b)$, $\xi \in \left(\frac{a+\xi_1}{2}, \xi_1\right) \subset (a, b)$.

证法四 设 k 为使 $f(b) - 2f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(a) = \frac{(b-a)^2}{4}k$ 成立的实常数, 构造辅助函数

$$g(x) = f(x) - 2f\left(\frac{a+x}{2}\right) + f(a) - \frac{(x-a)^2}{4}k$$

则 $g(a) = g(b) = 0$, 于是由 Rolle 定理得, 存在 $\xi_1 \in (a, b)$, 使 $g'(\xi_1) = 0$, 即

$$f'(\xi_1) - f'\left(\frac{a+\xi_1}{2}\right) - \frac{k}{2}(\xi_1 - a) = 0$$

又 $f'(\frac{a+\xi_1}{2}) = f'(\xi_1) + f''(\xi) \cdot \frac{a-\xi_1}{2}$, 其中 $\xi \in \left(\frac{a+\xi_1}{2}, \xi_1\right) \subset (a, b)$, 代入前一式, 即得 $k = f''(\xi)$.

2.4.2 中值点的极限

例 2.4.3. 设 $f''(x)$ 在某区间 I 上连续, 且 $f''(x_0) \neq 0$ ($x_0 \in I$), 对于 $x_0 + h \in I$, 由微分中值定理

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + hf'(x_0 + \theta h) \quad (0 < \theta < 1)$$

证明: $\lim_{h \rightarrow 0} \theta = \frac{1}{2}$.

证 对 $f'(x)$ 应用 Lagrange 中值定理, 有

$$f'(x_0 + \theta h) - f'(x_0) = \theta h f''(x_0 + \xi \theta) \quad (0 < \xi < 1)$$

于是

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + hf'(x_0 + \theta h) = f(x_0) + h[f'(x_0) + \theta h f''(x_0 + \xi \theta)] \quad (1)$$

再根据 Taylor 公式有

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + hf'(x_0) + \frac{1}{2}h^2 f''(x_0 + \eta h) \quad (0 < \eta < 1) \quad (2)$$

比较式 (1)、(2) 得

$$\theta f''(x_0 + \xi \theta) = \frac{1}{2} f''(x_0 + \eta h)$$

因 $f''(x)$ 在 x_0 点连续, 所以

$$\lim_{h \rightarrow 0} \theta f''(x_0 + \xi \theta) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{2} f''(x_0 + \eta h)$$

因此有 $f''(x_0) \lim_{h \rightarrow 0} \theta = \frac{1}{2} f''(x_0)$, 又因为 $f''(x_0) \neq 0$, 所以 $\lim_{h \rightarrow 0} \theta = \frac{1}{2}$.

例 2.4.4. 设 $f(x + h) = f(x) + hf'(x) + \cdots + \frac{h^n}{n!} f^{(n)}(x + \theta h)$ ($0 < \theta < 1$), 且 $f^{(n+1)}(x) \neq 0$, 证明:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \theta = \frac{1}{n+1}.$$

证 由题设知 $f(x)$ 在 $x = a$ 处具有 $n+1$ 阶导数, 故 $f(x)$ 在 a 点处的 n 阶 Taylor 展开为

$$f(a+h) = f(a) + hf'(a) + \frac{h^2}{2!} f''(a) + \cdots + \frac{h^n}{n!} f^{(n)}(a) + \frac{h^{n+1}}{(n+1)!} f^{(n+1)}(a + \theta_1 h) \quad (0 < \theta_1 < 1)$$

与 $f(a+h) = f(a) + hf'(a) + \frac{h^2}{2!} f''(a) + \cdots + \frac{h^n}{n!} f^{(n)}(a + \theta h)$ 相比较, 得

$$\frac{h^n}{n!} f^{(n)}(a + \theta h) = \frac{h^n}{n!} f^{(n)}(a) + \frac{h^{n+1}}{(n+1)!} f^{(n+1)}(a + \theta_1 h)$$

于是

$$f^{(n)}(a + \theta h) - f^{(n)}(a) = \frac{f^{(n+1)}(a + \theta_1 h)}{n+1} h$$

由 Lagrange 中值定理知,

$$f^{(n+1)}(a + \theta_2(\theta h)) \cdot \theta h = f^{(n+1)}(a + \theta_1 h) \cdot \frac{h}{n+1} \quad (0 < \theta_2 < 1)$$

令 $h \rightarrow 0$, 则 $\theta h, \theta_1 h, \theta_2(\theta h) \rightarrow 0$, 并注意到 $f^{(n+1)}(x)$ 连续及 $f^{(n+1)}(a) \neq 0$, 即得 $\lim_{h \rightarrow 0} \theta = \frac{1}{n+1}$.

例 2.4.5. 设函数 $f(x)$ 在 $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ 内有 n 阶连续导数, 且

$$f^{(k)}(x_0) = 0, k = 2, 3, \dots, n-1, \text{ 且 } f^{(n)}(x_0) \neq 0$$

当 $0 < |h| < \delta$ 时,

$$f(x_0 + h) - f(x_0) = hf'(x_0 + \theta h) \quad (0 < \theta < 1)$$

证明: $\lim_{h \rightarrow 0} \theta = \frac{1}{\sqrt[n-1]{n}}$.

证 由 Taylor 公式可得

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + f'(x_0)h + \frac{f''(x_0)}{2!}h^2 + \cdots + \frac{f^{(n-1)}(x_0)}{(n-1)!}h^{n-1} + \frac{f^{(n)}(\xi)}{n!}h^n, \xi \in (x_0, x_0 + h)$$

由题设的条件, 可得

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + f'(x_0)h + \frac{1}{n!}f^{(n)}(\xi)h^n \quad (1)$$

又有

$$f(x_0 + n) - f(x_0) = hf'(x_0 + \theta h), 0 < \theta < 1 \quad (2)$$

由 (1)、(2) 式可得

$$hf'(x_0 + \theta h) = hf'(x_0) + \frac{1}{n!}f^{(n)}(\xi)h^n \quad (3)$$

仿式 (1) 可得

$$f'(x_0 + \theta h) = f'(x_0) + f^1(x_0)(\theta h) + \cdots + \frac{f^{(n)}(\eta)}{(n-1)!}(\theta h)^{n-1}, \eta \in (x_0, x_0 + \theta h) \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3), 注意到 $f^{(k)}(x_0) = 0$, 可得

$$\frac{1}{n}f^{(n)}(\xi) = f^{(n)}(\eta)\theta^{n-1} \Rightarrow \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{n}f^{(n)}(\xi) = \lim_{h \rightarrow 0} f^{(n)}(\eta)\theta^{n-1}$$

可得

$$\frac{f^{(n)}(x_0)}{n} = f^{(n)}(x_0) \left[\lim_{h \rightarrow 0} \theta \right]^{n-1} \Rightarrow \lim_{h \rightarrow 0} \theta = \frac{1}{\sqrt[n]{n}}.$$

2.4.3 无穷远处的极限

例 2.4.6. 设 $f(x)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 内具有 n 阶导数且满足 $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = c$ (c 为常数), $\lim_{x \rightarrow \infty} f^{(n)}(x) = 0$,

证明: $\lim_{x \rightarrow \infty} f^{(k)}(x) = 0$ ($k = 1, 2, \dots, n-1$).

证 由 Taylor 公式可得:

$$f(x+j) = f(x) + \frac{f(x)}{1!}j + \frac{f''(x)}{2!}j^2 + \cdots + \frac{f^{(n-1)}(x)}{(n-1)!}j^{n-1} + \frac{f^{(n)}(\xi_j)}{n!}j^n$$

其中 $j = 1, 2, \dots, n-1$, $x < \xi_j < x+j$. 从而有

$$f(x+j) - f(x) = f'(x)j + \frac{f''(x)}{2!}j^2 + \cdots + \frac{f^{(n-1)}(x)}{(n-1)!}j^{n-1} + \frac{f^{(n)}(\xi_j)}{n!}j^n \quad (*)$$

由于 $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = c$, $\lim_{x \rightarrow \infty} f^{(n)}(x) = 0$, $x < \xi_j < x+j$, 可知

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x+j) = c, \lim_{x \rightarrow \infty} f^{(n)}(\xi_j) = 0$$

由式 (*) 可得

$$0 = \lim_{x \rightarrow \infty} [f(x+j) - f(x)] = \lim_{x \rightarrow \infty} \left[f'(x)j + \frac{1}{2}f''(x)j^2 + \cdots + \frac{f^{(n-1)}(x)}{(n-1)!}j^{n-1} + \frac{f^{(n)}(\xi_j)}{n!}j^n \right]$$

令 $j=1$ 得

$$\begin{aligned} 0 &= \lim_{x \rightarrow \infty} \left[f'(x) + \frac{1}{2!}f''(x) + \cdots + \frac{f^{(n-1)}(x)}{(n-1)!} + \frac{f^{(n)}(\xi_1)}{n!} \right] \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} f'(x) + \frac{1}{2!} \lim_{x \rightarrow \infty} f''(x) + \cdots + \frac{1}{(n-1)!} \lim_{x \rightarrow \infty} f^{(n-1)}(x) \end{aligned}$$

相仿可得

$$\begin{aligned} 0 &= 2 \lim_{x \rightarrow \infty} f'(x) + \frac{2^2}{2!} \lim_{x \rightarrow \infty} f''(x) + \cdots + \frac{2^{n-1}}{(n-1)!} \lim_{x \rightarrow \infty} f^{(n-1)}(x) \\ &= 3 \lim_{x \rightarrow \infty} f'(x) + \frac{3^2}{2!} \lim_{x \rightarrow \infty} f''(x) + \cdots + \frac{3^{n-1}}{(n-1)!} \lim_{x \rightarrow \infty} f^{(n-1)}(x) \\ &\quad \dots \end{aligned}$$

$$= (n-1) \lim_{x \rightarrow \infty} f'(x) + \frac{(n-1)^2}{2!} \lim_{x \rightarrow \infty} f''(x) + \cdots + \frac{(n-1)^{n-1}}{(n-1)!} \lim_{x \rightarrow \infty} f^{(n-1)}(x)$$

不妨记 $\lim_{x \rightarrow \infty} f^{(k)}(x) = a_k$ 为待定数值, 可得含有 $n-1$ 个未知量, $n-1$ 个方程构成的方程组,

$$\begin{cases} a_1 + \frac{1}{2!} a_2 + \cdots + \frac{1}{(n-1)!} a_{n-1} = 0 \\ 2a_1 + \frac{2^2}{2!} a_2 + \cdots + \frac{2^{n-1}}{(n-1)!} a_{n-1} = 0 \\ \cdots \\ (n-1)a_1 + \frac{(n-1)^2}{2!} a_2 + \cdots + \frac{(n-1)^{n-1}}{(n-1)!} a_{n-1} = 0 \end{cases}$$

系数行列式 D 为, 并将第 i 行提出公因子 i , 第 j 列提出公因子 $\frac{1}{j!}$, 转化为 *Vandermonde* 行列式,

$$D = \begin{vmatrix} 1 & \frac{1}{2!} & \cdots & \frac{1}{(n-1)!} \\ 2 & \frac{2^2}{2!} & \cdots & \frac{2^{n-1}}{(n-1)!} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ n-1 & \frac{(n-1)^2}{2!} & \cdots & \frac{(n-1)^{n-1}}{(n-1)!} \end{vmatrix} = \frac{1 \cdot 2 \cdots (n-1)}{1 \cdot 2! \cdots (n-1)!} \begin{vmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 2 & \cdots & 2^{n-2} \\ 1 & 3 & \cdots & 3^{n-2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & n-1 & \cdots & (n-1)^{n-2} \end{vmatrix} \neq 0$$

可知上述齐次线性方程组仅有零解, 即 $\lim_{x \rightarrow \infty} f^{(k)}(x) = a_k = 0 (k = 1, 2, \dots, n-1)$.

2.4.4 关于界的估计

例 2.4.7. 设 $f(x)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 内具有三阶导数, 且 $f(x), f'''(x)$ 有界, 证明: $f'(x)$ 和 $f''(x)$ 有界.

证 由 *Taylor* 公式可知

$$f(x+1) = f(x) + f'(x) + \frac{1}{2} f''(x) + \frac{1}{6} f'''(\xi_1) \quad (1)$$

$$f(x-1) = f(x) - f'(x) + \frac{1}{2} f''(x) - \frac{1}{6} f'''(\xi_2) \quad (2)$$

其中 $x < \xi_1 < x+1, x-1 < \xi_2 < x$, 式 (1) + 式 (2) 得

$$f(x+1) + f(x-1) = 2f(x) + f''(x) + \frac{1}{6} [f'''(\xi_1) - f'''(\xi_2)]$$

由 $f(x)$ 与 $f'''(x)$ 有界, 可知 $f''(x)$ 有界, 式 (1) - 式 (2) 得

$$f(x+1) - f(x-1) = 2f'(x) + \frac{1}{6} [f'''(\xi_1) + f'''(\xi_2)]$$

同理可知 $f'(x)$ 有界.

例 2.4.8. 已知 $f(x) \in C[0, 2] \cap D^2(0, 2)$, $\max_{0 \leq x \leq 2} \{|f(x)|, |f''(x)|\} \leq 1$ 证明: $\forall x \in [0, 2]$, 有 $|f'(x)| \leq 2$.

证 由 $\max_{0 \leq x \leq 2} \{|f(x)|, |f''(x)|\} \leq 1$ 知, $|f(x)| \leq 1, |f''(x)| \leq 1$, 对 $f(0)$ 和 $f(2)$ *Taylor* 展开, 有

$$\begin{cases} f(0) = f(x) + f'(x)(-x) + \frac{1}{2!} f''(\xi_1)x^2 \\ f(2) = f(x) + f'(x)(2-x) + \frac{1}{2!} f''(\xi_2)(2-x)^2 \end{cases}$$

作差得 $f(0) - f(2) = -2f'(x) + \frac{1}{2} f''(\xi_1)x^2 - \frac{1}{2} f''(\xi_2)(x-2)^2$, 即

$$|2f'(x)| = \left| f(2) - f(0) + \frac{1}{2} f''(\xi_1)x^2 - \frac{1}{2} f''(\xi_2)(x-2)^2 \right| \leq |f(2)| + |f(0)| + \left| \frac{1}{2} f''(\xi_1)x^2 \right| + \left| \frac{1}{2} f''(\xi_2)(x-2)^2 \right|$$

因为 $|f(x)| \leq 1, |f''(x)| \leq 1$, 所以

$$|f(2)| + |f(0)| \leq 2, \left| \frac{1}{2} f''(\xi_1)x^2 \right| + \left| \frac{1}{2} f''(\xi_2)(x-2)^2 \right| \leq \frac{x^2}{2} + \frac{(x-2)^2}{2}$$

因此 $2|f'(x)| \leq 2 + \frac{x^2}{2} + \frac{(x-2)^2}{2} \leq 4 \Rightarrow |f'(x)| \leq 2$.

例 2.4.9. 设函数 $f(x)$ 在 $(a, +\infty)$ 内具有二阶导数, 且 $|f(x)| \leq M_0$, $|f'(x)| \leq M_1$, $|f''(x)| \leq M_2$, 证明: $M_1^2 < 4M_0M_2$.

$\forall x \in (a, +\infty)$ 和 $\forall h > 0$, 由在 x 处有一阶 Taylor 公式

$$f(x+h) = f(x) + f'(x) \cdot h + \frac{f''(\xi)}{2} \cdot h^2, x < \xi < x+h$$

于是 $f'(x) = \frac{1}{h}[f(x+h) - f(x)] - \frac{f''(\xi)}{2}h$, 从而有

$$|f'(x)| \leq \frac{1}{h}|f(x+h) - f(x)| + \frac{|f''(\xi)|}{2}h = \frac{2M_0}{h} + \frac{M_2h}{2}$$

取 $h = 2\sqrt{\frac{M_0}{M_2}}$, 则 $|f'(x)| \leq 2\sqrt{M_0M_2} \Rightarrow |f'(x)|^2 \leq 4M_0M_2$, 有 x 的任意性, 得 $M_1^2 \leq 4M_0M_2$.

例 2.4.10. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上二阶可导, $f'(a) = f'(b) = 0$, 证明存在 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$|f''(\xi)| \geq \frac{4}{(b-a)^2}|f(b) - f(a)|.$$

证法一 将 $f\left(\frac{a+b}{2}\right)$ 分别在 $x=a$ 和 $x=b$ 处进行 Taylor 展开

$$\begin{aligned} f\left(\frac{a+b}{2}\right) &= f(a) + f'(a)\frac{b-a}{2} + \frac{f''(\xi_1)}{2!}\left(\frac{b-a}{2}\right)^2 \\ f\left(\frac{a+b}{2}\right) &= f(b) + f'(b)\frac{a-b}{2} + \frac{f''(\xi_2)}{2!}\left(\frac{a-b}{2}\right)^2 \end{aligned}$$

其中 $a < \xi_1 < \frac{a+b}{2} < \xi_2 < b$, 由已知 $f'(a) = f'(b) = 0$ 代入上式, 得

$$f\left(\frac{a+b}{2}\right) - f(a) = \frac{f''(\xi_1)}{2}\left(\frac{b-a}{2}\right)^2, f(b) - f\left(\frac{a+b}{2}\right) = -\frac{f''(\xi_2)}{2}\left(\frac{b-a}{2}\right)^2$$

记 $\xi = \begin{cases} \xi_1, & |f''(\xi_2)| \leq |f''(\xi_1)| \\ \xi_2, & |f''(\xi_2)| > |f''(\xi_1)| \end{cases}$, 则 $\xi \in (a, b)$, $|f''(\xi)| = \max(|f''(\xi_1)|, |f''(\xi_2)|)$, 故

$$|f(b) - f(a)| \leq \left|f(b) - f\left(\frac{a+b}{2}\right)\right| + \left|f\left(\frac{a+b}{2}\right) - f(a)\right| \leq \frac{|f''(\xi_1)| + |f''(\xi_2)|}{2}\left(\frac{b-a}{2}\right)^2 \leq \frac{(b-a)^2}{4}|f''(\xi)|$$

即 $|f''(\xi)| \geq \frac{4}{(b-a)^2}|f(b) - f(a)|$.

证法二 由连续函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上用介值定理知, 存在 $x_0 \in [a, b]$, 使 $f(x_0) = \frac{1}{2}[f(a) + f(b)]$, 不妨设 $a \leq x_0 \leq \frac{a+b}{2}$, 则将 $f(x_0)$ 在点 $x=a$ 处进行 Taylor 展开, 得存在 $\xi \in (a, x_0) \subset (a, b)$, 使

$$f(x_0) = f(a) + f'(a)(x_0 - a) + \frac{f''(\xi)}{2!}(x_0 - a)^2 = f(a) + \frac{f''(\xi)}{2}(x_0 - a)^2$$

于是 $|f''(\xi)| = \frac{2|f(x_0) - f(a)|}{(x_0 - a)^2} \geq \frac{|f(b) - f(a)|}{\left(\frac{b-a}{2}\right)^2} = \frac{4}{(b-a)^2}|f(b) - f(a)|$.

证法三 令 $g_1(x) = (x-a)^2$, $g_2(x) = (x-b)^2$, 则将 $f(x)$ 与 $g_1(x)$ 和 $f(x)$ 与 $g_2(x)$ 分别在 $\left[a, \frac{a+b}{2}\right]$ 和 $\left[\frac{a+b}{2}, b\right]$ 上用两次 Cauchy 中值定理, 知 $\exists \eta_1 \in \left(a, \frac{a+b}{2}\right)$, $\xi_1 \in (a, \eta_1)$, 使

$$\frac{f\left(\frac{a+b}{2}\right) - f(a)}{\left(\frac{b-a}{2}\right)^2} = \frac{f\left(\frac{a+b}{2}\right) - f(a)}{g_1\left(\frac{a+b}{2}\right) - g_1(a)} = \frac{f'(\eta_1)}{g'_1(\eta_1)} = \frac{f'(\eta_1) - f'(a)}{g'_1(\eta_1) - g'_1(a)} = \frac{f''(\xi_1)}{g''_1(\xi_1)} = \frac{1}{2}f''(\xi_1)$$

$\exists \eta_2 \in \left(\frac{a+b}{2}, b\right)$, $\xi_2 \in (\eta_2, b)$, 使

$$\frac{f\left(\frac{a+b}{2}\right) - f(b)}{\left(\frac{b-a}{2}\right)^2} = \frac{f\left(\frac{a+b}{2}\right) - f(b)}{g_2\left(\frac{a+b}{2}\right) - g_2(b)} = \frac{f'(\eta_2)}{g'_2(\eta_2)} = \frac{f'(\eta_2) - f'(b)}{g'_2(\eta_2) - g'_2(b)} = \frac{f''(\xi_2)}{g''_2(\xi_2)} = \frac{1}{2}f''(\xi_2)$$

取 $\xi = \begin{cases} \xi_1, & |f''(\xi_1)| \geq |f''(\xi_2)|, \\ \xi_2, & |f''(\xi_1)| < |f''(\xi_2)|, \end{cases}$ 则

$$\begin{aligned} |f''(\xi)| &= \max(|f''(\xi_1)|, |f''(\xi_2)|) \geq \frac{1}{2}(|f''(\xi_1)| + |f''(\xi_2)|) \geq \frac{1}{2}|f''(\xi_1) - f''(\xi_2)| \\ &= \left| \frac{f\left(\frac{a+b}{2}\right) - f(a)}{\left(\frac{b-a}{2}\right)^2} - \frac{f\left(\frac{a+b}{2}\right) - f(b)}{\left(\frac{b-a}{2}\right)^2} \right| = \frac{4}{(b-a)^2}|f(b) - f(a)|. \end{aligned}$$

推论 2.4.1. 一般地, 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上具有直至 n 阶的导数 ($n \geq 2$), 且 $f^{(k)}(a) = f^{(k)}(b) = 0$ ($k = 1, 2, \dots, n-1$), 则至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使

$$|f^{(n)}(\xi)| \geq \frac{2^{n-1} \cdot n!}{(b-a)^n} |f(b) - f(a)|.$$

2.4.5 差商与导数

定义 2.4.1 (一阶差商). 设 x_0, x_1, \dots, x_n 为 $[a, b]$ 上的节点, 若 $x_i \neq x_j$, 则函数 $f(x)$ 关于节点 x_i, x_j 的一阶差商定义为

$$f[x_i, x_j] = \frac{f(x_j) - f(x_i)}{x_j - x_i}.$$

定义 2.4.2 (重节点差商). 若 $x_i = x_j$, 则定义重节点差商

$$f[x_i, x] = \lim_{x \rightarrow x_i} f[x_i, x] = \lim_{x \rightarrow x_i} \frac{f(x) - f(x_i)}{x - x_i} = f'(x_i).$$

定义 2.4.3 (二阶差商). 若 x_i, x_j, x_k 互异, 则定义二阶差商

$$f[x_i, x_j, x_k] = \frac{f[x_j, x_k] - f[x_i, x_j]}{x_k - x_i}.$$

若 $x_i = x_j \neq x_k$ 或 $x_i = x_j = x_k$, 则分别定义

$$f[x_i, x_i, x_k] = \frac{f[x_i, x_k] - f[x_i, x_i]}{x_k - x_i}, \quad f[x_i, x_i, x_i] = \lim_{\substack{x_i \rightarrow x_i \\ x_k \rightarrow x_i}} f[x_i, x_j, x_k] = \frac{1}{2} f''(x_i).$$

定义 2.4.4 (n 阶差商). 一般地, 定义 n 阶差商及 n 阶重节点差商分别为

$$\begin{aligned} f[x_{i0}, x_{i1}, \dots, x_{in}] &= \frac{f[x_{i1}, \dots, x_{in}] - f[x_{i0}, x_{i1}, \dots, x_{i(n-1)}]}{x_{in} - x_{i0}} \\ f[x_{i0}, x_{i0}, \dots, x_{i0}] &= \lim_{x_{ij} \rightarrow x_{i0}} f[x_{i0}, x_{i1}, \dots, x_{in}] = \frac{1}{n!} f^{(n)}(x_{i0}). \end{aligned}$$

定理 2.4.2 (差商与导数的关系). 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上存在 n 阶导数, 且节点 $x_{i0}, x_{i1}, \dots, x_{in} \in [a, b]$ (其中可有重节点), 则有

$$f[x_{i0}, x_{i1}, \dots, x_{in}] = \frac{f^{(n)}(\xi)}{n!}$$

其中 $\xi \in \left(\min_{0 \leq k \leq n} \{x_{ik}\}, \max_{0 \leq k \leq n} \{x_{ik}\} \right)$.

例 2.4.11. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上三阶可导, 证明存在 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$f(b) = f(a) + f'\left(\frac{a+b}{2}\right)(b-a) + \frac{1}{24} f'''(\xi)(b-a)^3.$$

证法一 将 $f(a), f(b)$ 在 $x = \frac{a+b}{2}$ 处进行 Taylor 展开, 得

$$\begin{aligned} f(a) &= f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f'\left(\frac{a+b}{2}\right) \cdot \frac{a-b}{2} + \frac{1}{2}f''\left(\frac{a+b}{2}\right) \cdot \frac{(a-b)^2}{4} + \frac{1}{6}f'''(\xi_1) \frac{(a-b)^3}{8} \\ f(b) &= f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f'\left(\frac{a+b}{2}\right) \cdot \frac{b-a}{2} + \frac{1}{2}f''\left(\frac{a+b}{2}\right) \cdot \frac{(b-a)^2}{4} + \frac{1}{6}f'''(\xi_2) \frac{(b-a)^3}{8} \end{aligned}$$

其中 $a < \xi_1 < \frac{a+b}{2} < \xi_2 < b$, 两式相减得

$$f(b) - f(a) - f'\left(\frac{a+b}{2}\right)(b-a) = \frac{1}{24} \frac{f'''(\xi_1) + f'''(\xi_2)}{2} (b-a)^3$$

而由

$$\min(f'''(\xi_1), f'''(\xi_2)) \leq \frac{f'''(\xi_1) + f'''(\xi_2)}{2} \leq \max(f'''(\xi_1), f'''(\xi_2))$$

及 Darboux 定理知

$$\exists \xi \in (\xi_1, \xi_2) \subset (a, b), \text{ 使得 } f'''(\xi) = \frac{f'''(\xi_1) + f'''(\xi_2)}{2}$$

故得证.

证法二 设 k 为使 $f(b) = f(a) + f'\left(\frac{a+b}{2}\right)(b-a) + \frac{1}{24}k(b-a)^3$ 成立的实常数, 为此只需证 $k = f''(\xi)$ 即可, 令 $g(x) = f(x) - f(a) - f'\left(\frac{a+x}{2}\right)(x-a) - \frac{k}{24}(x-a)^3$ 则 $g(a) = g(b) = 0$, 于是由 Rolle 定理知, $\exists \eta \in (a, b)$, 使 $g'(\eta) = 0$ 即

$$f'(\eta) - \frac{1}{2}f''\left(\frac{a+\eta}{2}\right)(\eta-a) - f'\left(\frac{a+\eta}{2}\right) - \frac{k}{8}(\eta-a)^2 = 0$$

又将 $f'(\eta)$ 在 $x = \frac{a+\eta}{2}$ 处进行 Taylor 展开, 得

$$f'(\eta) = f'\left(\frac{a+\eta}{2}\right) + f''\left(\frac{a+\eta}{2}\right) \cdot \frac{\eta-a}{2} + \frac{f''(\xi)}{2!} \cdot \left(\frac{\eta-a}{2}\right)^2$$

代入上式, 得 $\frac{f'''(\xi)}{2!} \cdot \left(\frac{\eta-a}{2}\right)^2 - \frac{k}{8}(\eta-a)^2 = 0$, 从而得 $k = f'''(\xi)$, 其中 $\xi \in \left(\frac{a+\eta}{2}, \eta\right) \subset (a, b)$, 故得证.

证法三 由于要证等式中含有 $f'\left(\frac{a+b}{2}\right)$, 因而选取重节点: $x_0 = a, x_1 = c = \frac{a+b}{2}, x_2 = c, x_3 = b$, 列差商表如下:

表 2.2

x_k	$f(x_k)$	一阶差商	二阶差商	三阶差商
$x_0 = a$	$f(a)$			
$x_1 = c$	$f(c)$	$f[a, c]$		
$x_2 = c$	$f(c)$	$f'(c)$	$f[a, c, c]$	
$x_3 = b$	$f(b)$	$f[c, b]$	$f[c, c, b]$	$f[a, c, c, b]$

而由差商与导数的关系, 得 $f[a, c, c, b] = \frac{f''(\xi)}{3!}$, 其中 $\xi \in (a, b)$, 由重节点差商定义, 有

$$f[a, c, c, b] = \frac{f[c, c, b] - f[a, c, c]}{b-a}, \quad f[c, c, b] = \frac{f[c, b] - f'(c)}{b-c}$$

$$f[a, c, c] = \frac{f'(c) - f[a, c]}{c-a}, \quad f[c, b] = \frac{f(b) - f(c)}{b-c}, \quad f[a, c] = \frac{f(c) - f(a)}{c-a}$$

代入整理, 即得 $f(b) = f(a) + f'\left(\frac{a+b}{2}\right)(b-a) + \frac{1}{24}f''(\xi)(b-a)^3$.

例 2.4.12. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上三阶可导, 证明存在 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$f(b) = f(a) + \frac{1}{2}(f'(a) + f'(b))(b-a) - \frac{1}{12}f'''(\xi)(b-a)^3.$$

证法一 将要证的等式化为 $\frac{f(b) - f(a) - \frac{1}{2}(f'(a) + f'(b))(b-a)}{-\frac{1}{12}(b-a)^3} = f'''(\xi)$ 为此, 令

$$F(x) = f(x) - f(a) - \frac{1}{2}(f'(a) + f'(x))(x-a), G(x) = -\frac{1}{12}(x-a)^3$$

则 $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上二阶可导, $G(x)$ 在 $[a, b]$ 上任意阶可导, 于是两次用 Cauchy 中值定理, 得

$$\frac{F(b)}{G(b)} = \frac{F(b) - F(a)}{G(b) - G(a)} = \frac{F'(\xi_1)}{G'(\xi_1)} = \frac{F'(\xi_1) - F'(a)}{G'(\xi_1) - G'(a)} = \frac{F'(\xi)}{G'(\xi)} = f'''(\xi)$$

其中 $F(a) = 0 = F'(a)$, $G(a) = 0 = G'(a)$, $\xi_1 \in (a, b)$, $\xi \in (a, \xi_1) \subset (a, b)$, 整理即得 $f(b) = f(a) + \frac{1}{2}(f'(a) + f'(b))(b-a) - \frac{1}{12}f'''(\xi)(b-a)^3$.

证法二 设 k 为使 $f(b) = f(a) + \frac{b-a}{2}(f'(a) + f'(b)) - \frac{1}{12}k(b-a)^3$ 成立的实常数, 为此证明 $k = f'''(\xi)$ 即可, 令

$$g(x) = f(x) - f(a) - \frac{x-a}{2}(f'(a) + f'(x)) + \frac{1}{12}k(x-a)^3$$

则 $g(a) = g(b) = 0$, 于是由 Rolle 定理知, 存在 $\eta \in (a, b)$, 使得 $g'(\eta) = 0$, 即

$$\frac{1}{2}f'(\eta) - \frac{1}{2}f'(a) - \frac{\eta-a}{2}f'(\eta) + \frac{k}{4}(\eta-a)^2 = 0$$

又将 $f'(a)$ 在 $x = \eta$ 处进行 Taylor 展开, 得

$$f'(a) = f'(\eta) + f'(\eta)(a-\eta) + \frac{1}{2}f'''(\xi)(a-\eta)^2$$

代入上式, 即得 $k = f'''(\xi)$, 其中 $\xi \in (a, \eta) \subset (a, b)$, 故得证.

证法三 由于要证明的等式中含有 $f'(a)$ 及 $f'(b)$, 因而考虑选取重节点: $x_0 = a, x_1 = a, x_2 = b, x_3 = b$, 列差商表如下

表 2.3

x_k	$f(x_k)$	一阶差商	二阶差商	三阶差商
$x_0 = a$	$f(a)$			
$x_1 = a$	$f(a)$	$f'(a)$		
$x_2 = b$	$f(b)$	$f[a, b]$	$f[a, a, b]$	
$x_3 = b$	$f(b)$	$f'(b)$	$f[a, b, b]$	$f[a, a, b, b]$

而由差商与导数的关系, 得 $f[a, a, b, b] = \frac{f'''(\xi)}{3!}$, 其中 $\xi \in (a, b)$, 又由重节点差商定义, 有

$$f[a, a, b, b] = \frac{f[a, b, b] - f[a, a, b]}{b-a}, f[a, a, b] = \frac{f[a, b] - f'(a)}{b-a}$$

$$f[a, b, b] = \frac{f'(b) - f[a, b]}{b-a}, f[a, b] = \frac{f(b) - f(a)}{b-a}$$

代入整理, 即得 $f(b) = f(a) + \frac{1}{2}(f'(a) + f'(b))(b-a) - \frac{1}{12}f'''(\xi)(b-a)^3$.

2.5 Lagrange 插值与 Hermite 插值

Lagrange 插值和 Hermite 插值都是插值法的一种, 用于通过已知数据点构建一个多项式函数, 从而估计在其他点上的函数. 它们的主要区别在于插值多项式的构造方式和插值点的选择.

2.5.1 Lagrange 插值

定义 2.5.1 (Lagrange 插值多项式). 经过数据点 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ 而次数不高于 n 的 Lagrange 插值多项式为

$$p_n(x) = \sum_{k=0}^n \left(\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^n \frac{x - x_j}{x_k - x_j} \right) y_k.$$

定理 2.5.1. 若函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上二阶可导, 且 $f(a) = f(b) = c$, 则 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$\begin{cases} f''(\xi) \geq \frac{8(c-d)}{(a-b)^2}, & \min_{a \leq x \leq b} \{f(x)\} = d \\ f''(\xi) \leq \frac{8(c-d)}{(a-b)^2}, & \max_{a \leq x \leq b} \{f(x)\} = d. \end{cases}$$

证 由于函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上二阶可导, 且 $\min_{a \leq x \leq b} \{f(x)\} = d$ (对于 $\max_{a \leq x \leq b} \{f(x)\} = d$ 类似可证), 所以 $\exists x_0 \in (a, b)$, 使得 $f(x_0) = d$, 作 Lagrange 插值多项式:

$$p_2(x) = \frac{c(x-x_0)(x-b)}{(a-x_0)(a-b)} + \frac{d(x-a)(x-b)}{(x_0-a)(x_0-b)} + \frac{c(x-a)(x-x_0)}{(b-a)(b-x_0)}$$

则 $p(x)$ 与 $f(x)$ 在 a, x_0, b 三点有相同的函数值, 设 $F(x) = f(x) - p(x)$, 那么 $F(a) = F(x_0) = F(b) = 0$, 由 Rolle 定理, $\exists \xi_1 \in (a, x_0), \xi_2 \in (x_0, b)$, 使得

$$F'(\xi_1) = F'(\xi_2) = 0$$

在 $[\xi_1, \xi_2]$ 上应用 Rolle 定理, $\exists \xi \in (\xi_1, \xi_2) \subset (a, b)$, 使得 $F''(\xi) = 0$, 即

$$f''(\xi) = F''(\xi) + p''(\xi) = p''(\xi) = \frac{2(c-d)}{\left(\frac{a-b}{2}\right)^2 - \left(x_0 - \frac{a+b}{2}\right)^2}$$

即得证

$$\begin{cases} f''(\xi) \geq \frac{8(c-d)}{(a-b)^2}, & \min_{a \leq x \leq b} \{f(x)\} = d \\ f''(\xi) \leq \frac{8(c-d)}{(a-b)^2}, & \max_{a \leq x \leq b} \{f(x)\} = d. \end{cases}$$

推论 2.5.1. 若函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上二阶可导, 且 $f(a) = f(b) = 0$, 则 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$\begin{cases} f''(\xi) \geq -\frac{8d}{(a-b)^2}, & \min_{a \leq x \leq b} \{f(x)\} = d \\ f''(\xi) \leq -\frac{8d}{(a-b)^2}, & \max_{a \leq x \leq b} \{f(x)\} = d. \end{cases}$$

证 在定理 2.5.1 中令 $c = 0$, 即得证.

2.5.2 Hermite 插值

插值多项式要求在插值节点上函数值相等, 有的实际问题还要求在节点上导数值相等, 甚至高阶导数值也相等, 满足这种要求的插值多项式称为 Hermite 插值多项式.

例 2.5.1. 给定 $f(x) = x^{3/2}, x_0 = \frac{1}{4}, x_1 = 1, x_2 = \frac{9}{4}$, 试求 $f(x)$ 在 $\left[\frac{1}{4}, \frac{9}{4}\right]$ 上的三次 Hermite 插值多项式 $p(x)$, 使之满足 $p(x_i) = f(x_i), p'(x_1) = f'(x_1)$ ($i = 0, 1, 2$), 并写出余项表达式.

由所给节点可求出

$$f_0 = f\left(\frac{1}{4}\right) = \frac{1}{8}, f_1 = f(1) = 1, f_2 = f\left(\frac{9}{4}\right) = \frac{27}{8}, f'(x) = \frac{3}{2}x^{1/2}, f'(1) = \frac{3}{2}$$

那么差商表为

表 2.4

x_k	$f(x_k)$	一阶差商	二阶差商
$x_0 = \frac{1}{4}$	$f_0 = \frac{1}{8}$		
$x_1 = 1$	$f_1 = 1$	$f[x_0, x_1] = \frac{f_1 - f_0}{x_1 - x_0} = \frac{7}{6}$	
$x_2 = \frac{9}{4}$	$f_2 = \frac{27}{8}$	$f[x_1, x_2] = \frac{f_2 - f_1}{x_2 - x_1} = \frac{19}{10}$	$f[x_0, x_1, x_2] = \frac{f[x_1, x_2] - f[x_0, x_1]}{x_2 - x_0} = \frac{11}{30}$

故可令

$$H_3(x) = \frac{1}{8} + \frac{7}{6}\left(x - \frac{1}{4}\right) + \frac{11}{30}\left(x - \frac{1}{4}\right)(x - 1)\left(x - \frac{9}{4}\right) + A\left(x - \frac{1}{4}\right)(x - 1)\left(x - \frac{9}{4}\right)$$

再由 $p'(1) = f'(1) = \frac{3}{2}$, 解得 $A = -\frac{14}{225}$, 于是所求的三次 Hermite 插值多项式为

$$H_3(x) = -\frac{14}{225}x^3 + \frac{263}{450}x^2 + \frac{233}{450}x - \frac{1}{25}$$

余项为

$$\begin{aligned} R(x) &= f(x) - H_3(x) = \frac{f^{(4)}(\xi)}{4!}\left(x - \frac{1}{4}\right)(x - 1)^2\left(x - \frac{9}{4}\right) \\ &= \frac{1}{4!} \frac{9}{16} \xi^{-5/2} \left(x - \frac{1}{4}\right)(x - 1)^2 \left(x - \frac{9}{4}\right) \end{aligned}$$

其中 $\xi \in \left(\frac{1}{4}, \frac{9}{4}\right)$.

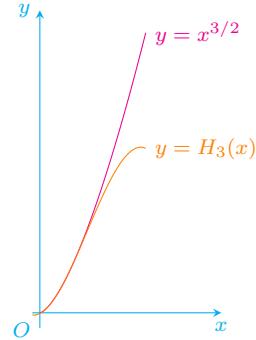


图 2.5.1

例 2.5.2. 设 $f(x)$ 在 $[-1, 1]$ 三阶导数连续, $f(-1) = 0, f(1) = 1, f'(0) = 0$, 证明: $\exists \xi \in (-1, 1)$, 使得 $f'''(\xi) = 3$.

证法一: 令⁴

$$H_3(x) = f(0)(x+1) + \frac{1-2f(0)}{2}(x+1)x + \frac{1}{2}(x+1)x(x-1)$$

构造 $F(x) = f(x) - H_3(x)$, 那么有 $F(-1) = F(0) = F(1) = 0$, 由 Rolle 定理 $\exists \xi_1 \in (-1, 0), \xi_2 \in (0, 1)$, 使得

$$F'(\xi_1) = F'(\xi_2) = 0$$

而 $F'(0) = f'(0) - H'_3(0) = 0$, 则有 $F'(\xi_1) = F'(0) = F'(\xi_2) = 0$ 故又由 Rolle 定理 $\exists \xi_3 \in (\xi_1, 0), \xi_4 \in (0, \xi_2)$, 使得

$$F''(\xi_3) = F''(\xi_4) = 0$$

最后由 Rolle 定理知 $\exists \xi \in (\xi_3, \xi_4) \subset (-1, 1)$, 使得 $F'''(\xi) = 0$ 而

$$F'''(\xi) = f'''(\xi) - H'''_3(\xi) = f'''(\xi) - 3 = 0$$

即得证.

证法二 将 $f(1)$ 和 $f(-1)$ 在 $x=0$ 处 Taylor 展开, 并作差, 下略.

定理 2.5.2. 若函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上三阶可导, 且 $ab < 0, a \neq b, f(a) = c, f(0) = d, f(b) = e, f'(0) = f$, 则 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$f'''(\xi) = \frac{6}{ab} \left[f + \frac{d-c}{a} + \frac{a(e-d) + b(d-c)}{b(b-a)} \right].$$

⁴由 $f_0 = f(-1) = 0, f_1 = f(0), f_2 = f(1) = 1$ 作差商, 下同例题 2.5.1

证 由所给节点可求出

$$f_0 = f(a) = c, f_1 = f(0) = d, f_2 = f(b) = e$$

那么差商表为

表 2.5

x_k	$f(x_k)$	一阶差商	二阶差商
a	c		
0	d	$-\frac{d-c}{a}$	
b	e	$\frac{e-d}{b}$	$\frac{a(e-d)+b(d-c)}{ab(b-a)}$

故可令

$$H_3(x) = c - \frac{d-c}{a}(x-a) + \frac{a(e-d)+b(d-c)}{ab(b-a)}(x-a)x(x-b)$$

$$f + \frac{d-c}{a} + \frac{a(e-d)+b(d-c)}{b(b-a)}$$

由 $p'_3(0) = f'(0) = f$, 解得 $A = \frac{f + \frac{d-c}{a} + \frac{a(e-d)+b(d-c)}{b(b-a)}}{ab}$ 于是

$$H_3(x) = c - \frac{d-c}{a}(x-a) + \frac{a(e-d)+b(d-c)}{ab(b-a)}(x-a)x + \frac{f + \frac{d-c}{a} + \frac{a(e-d)+b(d-c)}{b(b-a)}}{ab}(x-a)x(x-b)$$

则 $H_3(x)$ 与 $f(x)$ 在 $a, 0, b$ 三点有相同的函数值, 在 0 点有相同的导数值, 设 $F(x) = f(x) - H_3(x)$, 则 $F(a) = F(0) = F(b) = 0$, 由 Rolle 定理知, $\exists \xi_1 \in (a, 0), \xi_2 \in (0, b)$, 使得

$$F'(\xi_1) = F'(\xi_2) = 0$$

由于 $F'(x) = f'(x) - p'_3(x)$, 所以 $F'(0) = f'(0) - p'(0) = 0$, 在 $[\xi_1, 0]$ 和 $[0, \xi_2]$ 上应用 Rolle 定理, 则 $\exists \xi_3 \in (\xi_1, 0), \xi_4 \in (0, \xi_2)$, 使得

$$F''(\xi_3) = F''(\xi_4) = 0$$

最后在 $[\xi_3, \xi_4]$ 上应用 Rolle 定理, $\exists \xi \in (\xi_3, \xi_4)$, 使得 $F'''(\xi) = 0$, 而 $F'''(x) = f'''(x) - p'''_3(x)$, 则 $f'''(\xi) = p'''(\xi)$, 即

$$f'''(\xi) = \frac{6}{ab} \left[f + \frac{d-c}{a} + \frac{a(e-d)+b(d-c)}{b(b-a)} \right].$$

与例题 2.5.1 不同但同样典型的例子是“两点三次 Hermite 插值”, 插值节点取 x_k 及 x_{k+1} , 插值多项式为 $H_3(x)$, 满足条件

$$\begin{cases} H_3(x_k) = y_k, & H_3(x_{k+1}) = y_{k+1} \\ H'_3(x_k) = m_k, & H'_3(x_{k+1}) = m_{k+1} \end{cases}$$

定理 2.5.3 (两点三次 Hermite 插值). 采用基函数方法, 令

$$H_3(x) = \alpha_k(x)y_k + \alpha_{k+1}(x)y_{k+1} + \beta_k(x)m_k + \beta_{k+1}(x)m_{k+1}$$

其中 $\alpha_k(x), \alpha_{k+1}(x), \beta_k(x), \beta_{k+1}(x)$ 是关于节点 x_k 及 x_{k+1} 的三次 Hermite 插值基函数, 它们应分别满足以下条件:

$$\begin{array}{lll} \alpha_k(x_k) = 1 & \alpha_k(x_{k+1}) = 0 & \alpha'_k(x_k) = \alpha'_{k+1}(x_{k+1}) = 0 \\ \alpha_{k+1}(x_k) = 0 & \alpha_{k+1}(x_{k+1}) = 1 & \alpha'_{k+1}(x_k) = \alpha'_{k+1}(x_{k+1}) = 0 \\ \beta_k(x_k) = \beta_k(x_{k+1}) = 0 & \beta'_k(x_k) = 1 & \beta'_k(x_{k+1}) = 0 \\ \beta_{k+1}(x_k) = \beta_{k+1}(x_{k+1}) = 0 & \beta'_{k+1}(x_k) = 0 & \beta'_{k+1}(x_{k+1}) = 1 \end{array}$$

解得基函数, 那么有

$$\begin{aligned} H_3(x) &= \left(1 + 2\frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k}\right) \left(\frac{x - x_{k+1}}{x_k - x_{k+1}}\right)^2 y_k + \left(1 + 2\frac{x - x_{k+1}}{x_k - x_{k+1}}\right) \left(\frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k}\right)^2 y_{k+1} \\ &\quad + (x - x_k) \left(\frac{x - x_{k+1}}{x_k - x_{k+1}}\right)^2 m_k + (x - x_{k+1}) \left(\frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k}\right)^2 m_{k+1}. \end{aligned}$$

定理 2.5.4. 若函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上三阶可导, 且 $f(a) = c, f(b) = d, f'(a) = e, f'(b) = f$, 则 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$f'''(\xi) = 6 \frac{f(b-a) - 2(d-c) + e(b-a)}{(b-a)^3}.$$

证 作三次 Hermite 插值多项式:

$$H_3(x) = c + e(x-a) + \frac{(d-c) - e(b-a)}{(b-a)^2}(x-a)^2 + \frac{f(b-a) - 2(d-c) + e(b-a)}{(b-a)^3}(x-a)^2(x-b)$$

则 $H_3(x)$ 与 $f(x)$ 在 a, b 两点有相同的函数值与导数值, 设 $F(x) = f(x) - H_3(x)$, 则 $F(a) = F(b) = 0$, 由 Rolle 定理, $\exists \xi_1 \in (a, b)$, 使得 $F'(\xi_1) = 0$, 由于

$$F'(x) = f'(x) - H'_3(x) = f'(x) + e + 2 \frac{(d-c) - e(b-a)}{(b-a)^2}(x-a) + \frac{f(b-a) - 2(d-c) + e(b-a)}{(b-a)^3}[2(x-a)(x-b) + (x-a)^2]$$

则 $F'(a) = F'(b) = 0$, 在 $[a, \xi_1]$ 和 $[\xi_1, b]$ 上应用 Rolle 定理, 则 $\exists \xi_2 \in (a, \xi_1), \xi_3 \in (\xi_1, b)$, 使得

$$F''(\xi_2) = F''(\xi_3) = 0$$

最后在 $[\xi_2, \xi_3]$ 上应用 Rolle 定理, 即 $\exists \xi \in (\xi_2, \xi_3)$, 使得 $F'''(\xi) = 0$, 即得证.

推论 2.5.2. 若函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上三阶可导, 且 $f(a) = a, f(b) = b, f'(a) = f'(b) = 0$, 则 $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$f'''(\xi) = -\frac{12}{(a-b)^2}.$$

证 令 $c = a, d = b, e = f = 0$, 即得证.

例 2.5.3. 设函数 $f \in C[0, 1] \cap D^3(0, 1)$, $f(0) = 2, f(1) = 1, f'(0) = 0, f'(1) = 4$ 证明: 存在一点 $\xi \in (0, 1)$ 使得 $f'''(\xi) = 24 + 24\xi$.

令 $g(x) = f(x) - x^4$, 则 $g \in C[0, 1] \cap D^3(0, 1)$ 那么 $\begin{cases} x_k = 0, & x_{k+1} = 1 \\ y_k = 2, & y_{k+1} = 0, \text{ 因此} \\ m_k = 0, & m_{k+1} = 0 \end{cases}$

$$H_3(x) = 2(1+x)(x-1)^2 = 4x^3 - 6x^2 + 2$$

构造 $F(x) = g(x) - H_3(x)$ 有 $F(0) = F(1) = 0$, 由 Rolle 定理 $\exists \xi_1 \in (0, 1)$ 使得 $F'(\xi_1) = 0$, 又 $F'(0) = F'(\xi_1) = F'(1) = 0$, 由 Rolle 定理得 $\exists \xi_2 \in (0, \xi_1), \xi_3 \in (\xi_1, 1)$ 使得 $F''(\xi_i) = 0, i = 2, 3$, 再根据 Rolle 定理得 $\exists \xi \in (\xi_2, \xi_3) \subset (0, 1)$ 使得 $F'''(\xi) = 0$ 即

$$f'''(\xi) - 4!\xi - 24 = 0 \Rightarrow f'''(\xi) = 24\xi + 24.$$

2.6 导数的综合应用

2.6.1 极值问题

极值、最值

求极值的方法步骤一般如下:

(1) 求可疑点, 可疑点包括:

- (i) 稳定点 (亦称驻点或逗留点, 皆值一阶导数等于零的点);
- (ii) 导数不存在的点;
- (iii) 区间端点.

(2) 对可疑点进行判断, 基本方法是:

(i) 直接利用定义判断;

(ii) 利用实际背景来判断;

- (iii) 查看一阶导数的符号, 当 x 从左向右穿越可疑点 x_0 时,
 若 $f'(x)$ 由“正”变“负”, 则 $f(x_0)$ 为严格极大值点;
 若 $f'(x)$ 由“负”变“正”, 则 $f(x_0)$ 为严格极小值点;
 若 $f'(x)$ 不变号, 则 $f(x_0)$ 不是极值.

(iv) 若 $f'(x_0) = 0, f''(x_0) \begin{cases} > 0, & \text{则 } f(x_0) \text{ 为严格极小值,} \\ < 0, & \text{则 } f(x_0) \text{ 为严格极大值;} \end{cases}$

(v) $f^{(k)}(x_0) = 0 (k = 1, 2, \dots, n - 1), f^{(n)}(x_0) \neq 0$,
 若 n 为偶数, 则 $f(x_0)$ 为极值: $\begin{cases} f^{(n)}(x_0) > 0, & \text{严格极小值,} \\ f^{(n)}(x_0) < 0, & \text{严格极大值;} \end{cases}$
 若 n 为奇数, 则 $f(x_0)$ 不是极值.

例 2.6.1. 求函数 $f(x) = |x(x^2 - 1)|$ 的极值以及在 $[-2, 2]$ 上的最值.

$f(x) = \operatorname{sgn}(x(x^2 - 1)) \cdot x(x^2 - 1)$, 那么 $f'(x) = \operatorname{sgn}(x(x^2 - 1)) \cdot (3x^2 - 1) (x \neq 0, \pm 1)$, 令 $f'(x) = 0$, 得 $x = \pm \frac{\sqrt{3}}{3}$

$$f''\left(\frac{\sqrt{3}}{3}\right) = \operatorname{sgn}(x(x^2 - 1)) \Big|_{x=\frac{\sqrt{3}}{3}} \cdot 6x \Big|_{x=\frac{\sqrt{3}}{3}} = -2\sqrt{3} < 0$$

故 $f(x)$ 在 $x = \frac{\sqrt{3}}{3}$ 处取极大值, 又 $f(x)$ 是偶函数, 所以在 $x = -\frac{\sqrt{3}}{3}$ 处亦取极大值, 当 $x = 0, \pm 1$ 时, $f(0) = f(1) = f(-1) = 0 \leq f(x) (\forall x)$, 故为最小值, 也是极小值; $f(2) = f(-2) = 6 \geq f(x) (\forall x \in [-2, 2])$, 故 $f(x)$ 在 $[-2, 2]$ 上最大值为 6, 最小值为 0.

例 2.6.2. 设 $f(x)$ 在 $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ 可导, $f(0) = 1$, $f(x) > 0$,

$$\lim_{h \rightarrow 0} \left[\frac{f(x + h \cdot \cos^2 x)}{f(x)} \right]^{\frac{1}{h}} = e^{x \cos^2 x + \tan x}$$

求 $f(x)$ 的表达式及极值.

$$\lim_{h \rightarrow 0} \left[\frac{f(x + h \cdot \cos^2 x)}{f(x)} \right]^{\frac{1}{h}} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \ln \frac{f(x + h \cdot \cos^2 x)}{f(x)} = x \cos^2 x + \tan x, \text{ 等式左边化为}$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \frac{f(x + h \cdot \cos^2 x) - f(x)}{f(x)} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos^2 x}{f(x)} \frac{f(x + h \cdot \cos^2 x) - f(x)}{h \cos^2 x} = \frac{\cos^2 x}{f(x)} \cdot f'(x)$$

即

$$\frac{f'(x)}{f(x)} = x + \tan x \cdot \sec^2 x \Rightarrow [\ln f(x)]' = x + \tan x \cdot \sec 2x \Rightarrow \ln f(x) = \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}\tan^2 x + C$$

又 $f(0) = 1$, 解得 $C = 0$, 于是 $f(x) = e^{\frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}\tan^2 x}$, 则

$$f'(x) = e^{\frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}\tan^2 x} \cdot (x + \tan x \cdot \sec^2 x)$$

因为 e^x 恒大于 0, 因此只需讨论 $x + \tan x \cdot \sec^2 x$ 的符号即可, 令 $g(x) = x + \tan x \cdot \sec^2 x$, 对 $g(x)$ 求导得

$$g'(x) = 1 + \sec^4 x + 4\tan^2 x \sec^2 x > 1$$

所以 $g(x) \nearrow$, 而 $g(0) = 0$, 故当 $x \in (-\frac{\pi}{2}, 0)$ 时, $g(x) < 0 \Rightarrow f'(x) < 0 \Rightarrow f(x) \searrow$; 当 $x \in (0, \frac{\pi}{2})$ 时, $f(x) \nearrow$, 所以当 $x = 0$ 时, $f(x)$ 取得极小值, 无极大值, 且 $f(0) = 1$.

例 2.6.3 (2014 数一). 设函数 $y = f(x)$ 由方程 $y^3 + xy^2 + x^2y = 0$ 确定, 求 $f(x)$ 的极值.

方程 $y^3 + xy^2 + x^2y = 0$ 两端对 x 求导, 得

$$3y^2y' + y^2 + 2xyy' + 2xy + x^2y' = 0 \quad (*)$$

并令 $y' = 0$, 得 $y^2 + 2xy = 0$, 解得 $y = 0$ 或 $y = -2x$, 显然 $y = 0$ 不满足原方程, 将 $y = -2x$ 代入原方程得 $-6x^3 + 6 = 0 \Rightarrow x_0 = 1$, 那么 $f(1) = -2$, $f'(1) = 0$, $(*)$ 式两端对 x 再次求导, 得

$$6y'^2 + 3y^2y'' + 4yy' + 2xy'^2 + 2xyy'' + 2y + 4xy' + x^2y'' = 0$$

将 $x = 1$, $f(1) = -2$, $f'(1) = 0$ 代入上式得 $f''(1) = \frac{4}{9} > 0$, 则函数 $y = f(x)$ 在 $x = 1$ 处取极小值, 极小值为 $f(1) = -2$.

极值点偏移

例 2.6.4. 已知函数 $f(x) = xe^{-x}$, $x \in \mathbb{R}$, 如果有 $f(x_1) = f(x_2)$ 且 $x_1 \neq x_2$, 求证 $x_1 + x_2 > 2$.

证法一 由 $f(x_1) = f(x_2)$ 得 $\frac{x_2}{x_1} = \frac{e^{x_2}}{e^{x_1}} \Rightarrow \ln \frac{x_2}{x_1} = x_2 - x_1$, 不妨设 $0 < x_1 < 1 < x_2$, 作换元 $t = \frac{x_2}{x_1}$, 那么 $t > 1$, 且

$$x_1 = \frac{\ln t}{t-1}, x_2 = \frac{t \ln t}{t-1}$$

于是要证 $\forall t > 1$, $\frac{t \ln t + \ln t}{t-1} > 2$, 构造函数 $F(t) = \ln t - \frac{2(t-1)}{t+1}$, 那么 $F'(t) = \frac{1}{t} - \frac{4}{(t+1)^2} = \frac{(t-1)^2}{t(t+1)^2} > 0$, 所以 $F(t)$ 在 $(1, +\infty)$ 上单调递增, 所以 $F(t) > F(1) = 0$, 即得待证式成立.

证法二 由题可得 $\ln x_2 - \ln x_1 = x_2 - x_1$, 即 $\frac{x_2 - x_1}{\ln x_2 - \ln x_1} = 1$, 要证 $x_1 + x_2 > 2$, 即证 $x_1 + x_2 > 2 \frac{x_2 - x_1}{\ln x_2 - \ln x_1}$, 不妨设 $0 < x_1 < 1 < x_2$, 作换元 $t = \frac{x_2}{x_1}$, 那么原不等式可化为 $\ln t > \frac{2(t-1)}{t+1}$, 由证法一可得该不等式成立, 所以原命题成立.

定理 2.6.1 (对数平均不等式 (ALG)). 对任意 $0 < a < b$, 满足 $\sqrt{ab} < \frac{b-a}{\ln b - \ln a} < \frac{a+b}{2}$.

2.6.2 不等式与函数凹凸性及拐点

不等式与凸函数之间有着密切的关系, 凸函数在不等式中起着重要的作用.

不等式

定理 2.6.2 (均值不等式). 对任意 n 个实数 $x_i \geq 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 有 调和平均数 \leq 几何平均数 \leq 算术平均数 \leq 平方平均数, 即

$$\begin{array}{cccccc} H_n & \leq & G_n & \leq & A_n & \leq Q_n \\ \parallel & & \parallel & & \parallel & \parallel \\ \sqrt[n]{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}} & & \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} & & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i & \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \end{array}$$

其中等号当且仅当 $a_1 = a_2 = \dots = a_n$ 时成立.

例 2.6.5. 试比较 π^e 和 e^π 的大小, 并说明理由.

法一: 只需比较 $\frac{\ln e}{e}$ 与 $\frac{\ln \pi}{\pi}$ 的大小, 令 $f(x) = \frac{\ln x}{x}$ ($x \geq e$) $\Rightarrow f'(x) = \frac{1 - \ln x}{x^2} < 0$ ($x > e$), 于是 $f(x)$ 在 $[e, +\infty)$ 上单调递减, 又 $e < \pi$, 从而 $f(\pi) < f(e)$, 即 $\frac{\ln \pi}{\pi} < \frac{\ln e}{e}$, 故 $e^\pi > \pi^e$.

法二: 记 $\pi = e + \lambda$, 则 $\lambda > 0$, 于是

$$\frac{\pi^e}{e^\pi} = \frac{(e + \lambda)^e}{e^{e+\lambda}} = \frac{1}{e^\lambda} \left(\frac{e + \lambda}{e} \right)^e = \frac{1}{e^x} \left[\left(1 + \frac{\lambda}{e} \right)^{\frac{e}{\lambda}} \right]^\lambda < \frac{1}{e^\lambda} e^\lambda = 1 \Rightarrow e^\pi > \pi^e.$$

例 2.6.6 (1995 数学 (二)). 设 $f(x)$ 二阶可导, 且 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x} = 1$, $f''(x) > 0$, 证明 $f(x) \geq x$.

证法一 要证 $f(x) \geq x$, 只需证 $f(x) - x \geq 0$, 为此, 令 $g(x) = f(x) - x$, 则由 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x} = 1$, 得 $f(0) = \lim_{x \rightarrow 0} f(x) = 0$, $f'(0) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(0)}{x} = 1$, 所以 $g'(x) = f'(x) - 1 = f'(x) - f'(0)$, 又由 $f''(x) = (f'(x))' > 0$ 知, $f'(x)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 上单调递增, 于是当 $x < 0$ 时, $g'(x) < 0$; 当 $x > 0$ 时, $g'(x) > 0$, 从而知 $x = 0$ 为 $g(x)$ 的极小值点也是最小值点, 故 $g(x) \geq g(0) = 0$, 即 $f(x) \geq x$.

证法二 由 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x} = 1$ 可知, $f(0) = \lim_{x \rightarrow 0} f(x) = 0$, $f'(0) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(0)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x} = 1$, 由题设 $f(x)$ 二阶可导, 将 $f(x)$ 在 $x = 0$ 点进行 Taylor 展开, 得

$$f(x) = f(0) + f'(0)x + \frac{f''(\xi)}{2!} x^2$$

其中 ξ 介于 0 与 x 之间, 故由 $f''(x) > 0$ 得 $f(x) \geq f(0) + f'(0)x = x$ (等号仅当 $x = 0$ 时成立).

证法三 由 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x} = 1$ 及 $f(x)$ 连续可知, $f(0) = \lim_{x \rightarrow 0} f(x) = 0$, $f'(0) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(0)}{x} = 1$, 又由 $f''(x) = (f'(x))' > 0$ 知 $f'(x)$ 严格单调递增, 于是由 Lagrange 中值定理得

当 $x > 0$ 时, $\frac{f(x)}{x} = \frac{f(x) - f(0)}{x} = f'(\xi_1) > f'(0) = 1$, 其中 $\xi_1 \in (0, x)$, 故 $f(x) > x$;

当 $x < 0$ 时, $\frac{f(x)}{x} = \frac{f(x) - f(0)}{x} = f'(\xi_2) < f'(0) = 1$, 其中 $\xi_2 \in (x, 0)$, 故 $f(x) > x$;

当 $x = 0$ 时, $f(0) = 0$, $\forall x \in (-\infty, +\infty)$, 都有 $f(x) \geq x$.

推论 2.6.1. 一般地, 设 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{x} = A$, 且 $f''(x) > 0$, 则 $f(x) \geq Ax$.

例 2.6.7. 证明: $\left| \frac{\sin x - \sin y}{x - y} - \cos y \right| \leq \frac{1}{2} \cdot |x - y|$, $x \neq y$.

证 将 $\sin x$ 在 $x = y$ 处 Taylor 展开, 得

$$\sin x = \sin y + \cos y(x - y) - \frac{1}{2} \sin \xi (x - y)^2$$

其中 ξ 介于 x 与 y 之间, 那么待证等式化简为

$$\left| \frac{\sin x - \sin y}{x - y} - \cos y \right| = \left| \frac{|\sin \xi|}{2} \right| |x - y|$$

又 $|\sin \xi| \leq 1$, 即得待证式成立.

定理 2.6.3 (Cauchy 不等式). 设 a_k, b_k 为任意实数 ($i = 1, 2, \dots, n$), 则

$$\left(\sum_{k=1}^n a_k b_k \right)^2 \leq \left(\sum_{k=1}^n a_k^2 \right) \left(\sum_{k=1}^n b_k^2 \right)$$

其中等号当且仅当 a_k 与 b_k 成比例时成立.

凸函数

凸函数的多种定义

定义 2.6.1 (凸函数 A). 设 $f(x)$ 在区间 I 上有定义, $f(x)$ 在 I 上称为凸函数, 当且仅当 $\forall x_1, x_2 \in I, \forall \lambda \in (0, 1)$, 有

$$f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2).$$

式中的 \leq 改为 $<$ 便是严格凸的定义.

定义 2.6.2 (凸函数 B). 设 $f(x)$ 在区间 I 上有定义, $f(x)$ 称为 I 上的凸函数, 当且仅当 $\forall x_1, x_2 \in I$, 有

$$f\left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right) \leq \frac{f(x_1) + f(x_2)}{2}.$$

式中的 \leq 改为 $<$ 便是严格凸的定义.

定义 2.6.3 (凸函数 C). 设 $f(x)$ 在区间 I 上有定义, $f(x)$ 称为凸函数, 当且仅当 $\forall x_1, \dots, x_n \in I$, 有

$$f\left(\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}\right) \leq \frac{f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_n)}{n}.$$

式中的 \leq 改为 $<$ 便是严格凸的定义.

定义 2.6.4 (凸函数 D). 设 $f(x)$ 在区间 I 上有定义, 当且仅当曲线 $y = f(x)$ 的切线恒保持在曲线以下, 称 $f(x)$ 为凸函数. 若除切点之外, 切线严格保持在曲线的下方, 则称 $f(x)$ 为严格凸的.

例 2.6.8. 已知 $f(x)$ 为二阶导的正值函数, 且 $f(0) = f'(0) = 1$, , 则

- A. $f(2) \leq e^2 \leq \sqrt{f(1)f(3)}$
- B. $e^2 \leq f(2) \leq \sqrt{f(1)f(3)}$
- C. $\sqrt{f(1)f(3)} \leq e^2 \leq f(2)$
- D. $\sqrt{f(1)f(3)} \leq f(2) \leq e^2$

因为 $f(x)$ 为一正值函数, 且 $f(x)f''(x) \geq [f'(x)]^2$, 于是有

$$\frac{f(x)f''(x) - [f'(x)]^2}{f^2(x)} \geq 0 \Rightarrow \left(\frac{f'(x)}{f(x)}\right)' \geq 0 \Rightarrow (\ln f(x))'' \geq 0$$

那么 $g(x) = \ln f(x)$ 为一下凸函数, 那么 $\frac{g(1) + g(3)}{2} = \frac{1}{2}(\ln f(1) + \ln f(3)) = \ln \sqrt{f(1)f(3)}$, 并且根据凸函数的性质, 有

$$\frac{g(1) + g(3)}{2} \geq g\left(\frac{1+3}{2}\right) = \ln f(2) \Rightarrow \ln \sqrt{f(1)f(3)} \geq \ln f(2) \Rightarrow f(2) \leq \sqrt{f(1)f(3)}$$

将 $g(x)$ 在 $x=0$ 处 Taylor 展开, 得

$$g(x) = g(0) + g'(0)x + \frac{1}{2}g''(\theta)x^2 \geq g(0) + g'(0)x = x$$

于是得 $f(x) \geq e^x$, 因此 $f(2) \geq e^2$, 综上所述, 选 B.

定理 2.6.4. 设函数 $f(x)$ 在区间 I 上有定义, 则 $f(x)$ 为凸函数的充要条件是: $\forall x_0 \in I$, $\exists \alpha$, 使得 $\forall x \in I$ 有 $f(x) \geq \alpha(x - x_0) + f(x_0)$.

推论 2.6.2. 设 $f(x)$ 在区间 I 内部可导, 则 $f(x)$ 在 I 上为凸的充要条件是: $\forall x_0 \in I^\circ$, 有

$$f(x) \geq f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0) \quad (\forall x \in I).$$

推论 2.6.3. 若 $f(x)$ 在区间 I 上为凸的, 则 $\forall x_0 \in I^\circ$, 在曲线 $y = f(x)$ 上一点 $(x_0, f(x_0))$ 可作一条直线

$$L: y = \alpha(x - x_0) + f(x_0)$$

使曲线 $y = f(x)$ 位于直线 L 上方.

定理 2.6.5 (分离性定理). 若 f 为严格凸函数, 则除点 $(x_0, f(x_0))$ 之外曲线严格地在直线 L 的上方, 直线 L 称为 $y = f(x)$ 的支撑.

定理 2.6.6. 设 $f(x)$ 在区间 I 上有导数, 则 $f(x)$ 在 I 上为凸函数的充要条件是 $f'(x) \nearrow (x \in I)$.

定理 2.6.7 (Jensen 不等式). 若 $f(x)$ 在 I 上有定义, 则 $\forall q_i \geq 0: q_1 + q_2 + \dots + q_n = 1, \forall x_1, x_2, \dots, x_n \in I$, 有

$$f(q_1x_1 + q_2x_2 + \dots + q_nx_n) \leq q_1f(x_1) + q_2f(x_2) + \dots + q_nf(x_n);$$

$\forall p_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n)$ 不全为零, $\forall x_1, x_2, \dots, x_n \in I$, 有

$$f\left(\frac{p_1x_1 + p_2x_2 + \dots + p_nx_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n}\right) \leq \frac{p_1f(x_1) + p_2f(x_2) + \dots + p_nf(x_n)}{p_1 + p_2 + \dots + p_n}.$$

例 2.6.9. 证明当 $0 < x < \frac{\pi}{2}$ 时, $\sin x > \frac{2}{\pi}x$.

证法一 设 $f(x) = \sin x - \frac{2}{\pi}x$, 则 $f'(x) = \cos x - \frac{2}{\pi}, f''(x) = -\sin x < 0 (0 < x < \frac{\pi}{2})$, 于是 $f(x)$ 在 $[0, \frac{\pi}{2}]$ 上为凸函数, 又 $f(0) = f\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$, 故当 $0 < x < \frac{\pi}{2}$ 时, $f(x) > 0$, 即 $\sin x > \frac{2}{\pi}x$.

证法二 设 $f(x) = \sin x$, 则 $f'(x) = \cos x, f''(x) = -\sin x < 0 (0 < x < \frac{\pi}{2})$, 于是 $f(x)$ 在 $[0, \frac{\pi}{2}]$ 上是凸函数, 从而由凸函数的定义, 有

$$f(x) = f\left[\frac{2x}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2} + \left(1 - \frac{2x}{\pi}\right) \cdot 0\right] > \frac{2x}{\pi} \cdot f\left(\frac{\pi}{2}\right) + \left(1 - \frac{2x}{\pi}\right) \cdot f(0) = \frac{2x}{\pi}$$

即得 $\sin x > \frac{2}{\pi}x (0 < x < \frac{\pi}{2})$.

证法三 设 $f(x) = \sin x$, 对于 $x \in (0, \frac{\pi}{2})$, 将 $f(t)$ 分别在 $[0, x]$ 和 $[x, \frac{\pi}{2}]$ 上应用 Lagrange 中值定理,

$$\exists \xi \in (0, x), \text{ 使得 } \frac{\sin x - \sin 0}{x - 0} = \cos \xi$$

即 $\frac{\sin x}{x} = \cos \xi$, 又 $\exists \eta \in (x, \frac{\pi}{2})$, 使得 $\frac{\sin \frac{\pi}{2} - \sin x}{\frac{\pi}{2} - x} = \cos \eta$, 即 $\frac{1 - \sin x}{\frac{\pi}{2} - x} = \cos \eta$, 又因为 $\cos x$ 在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 内严格单调递增,

减, $\xi < \eta$, 所以 $\cos \xi > \cos \eta$, 从而 $\frac{\sin x}{x} > \frac{1 - \sin x}{\frac{\pi}{2} - x}$, 即得 $\sin x > \frac{2}{\pi}x (0 < x < \frac{\pi}{2})$.

拐点

定义 2.6.5 (拐点). 连续曲线凹与凸部分的分界点称为曲线的拐点.

定理 2.6.8 (拐点存在的必要条件). 设函数 $f(x)$ 在点 x_0 具有二阶导数, 则点 $(x_0, f(x_0))$ 是曲线 $y = f(x)$ 的拐点的必要条件是 $f''(x_0) = 0$.

例 2.6.10 (2008 数二). 求曲线 $y = (x - 5)x^{\frac{2}{3}}$ 的拐点坐标.

因为 $y' = \frac{5}{3}x^{\frac{2}{3}} - \frac{10}{3}x^{-\frac{1}{3}}, y'' = \frac{10}{9}x^{-\frac{1}{3}} + \frac{10}{9}x^{-\frac{4}{3}} = \frac{10(x+1)}{9\sqrt[3]{x^4}}$, 显然 $y''(-1) = 0, y''(0)$ 不存在, 由 y'' 的表达式可知在 $x = -1$ 两侧 y' 异号, 而 $x = 0$ 两侧 y' 不变号, 因此拐点坐标为 $(-1, -6)$.

例 2.6.11 (2018 数二). 求曲线 $y = x^2 + 2 \ln x$ 在其拐点处的切线方程.

$y' = 2x + \frac{2}{x}, y'' = 2 - \frac{2}{x^2}$, 令 $y'' = 0 \Rightarrow x = 1$ (舍负), 拐点为 $(1, 1)$, 切线的斜率为 $y'(1) = 4$, 因此拐点处的切线方程为 $y = 4x - 3$.

例 2.6.12 (2011 数二). 设函数 $y = y(x)$ 由参数方程 $\begin{cases} x = \frac{1}{3}t^3 + t + \frac{1}{3} \\ y = \frac{1}{3}t^3 - t + \frac{1}{3} \end{cases}$ 确定, 求函数 $y = y(x)$ 的极值和曲线 $y = y(x)$ 的凹凸区间及拐点.

由题意 $x'(t) = t^2 + 1, x''(t) = 2t, y'(t) = t^2 - 1, y''(t) = 2t$, 则

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y'(t)}{x'(t)} = \frac{t^2 - 1}{t^2 + 1}, \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{y''(t)x'(t) - x''(t)y'(t)}{x'^3(t)} = \frac{4t}{(t^2 + 1)^3}$$

令 $\frac{dy}{dx} = 0 \Rightarrow t = \pm 1$, 当 $t = 1$ 时, $x = \frac{5}{3}, y = -\frac{1}{3}, \frac{d^2y}{dx^2} > 0$, 所以 $y = -\frac{1}{3}$ 为极小值, 当 $t = -1$ 时, $x = -1, y = 1, \frac{d^2y}{dx^2} < 0$, 所以 $y = 1$ 为极大值.

令 $\frac{d^2y}{dx^2} = 0 \Rightarrow t = 0 \Rightarrow x = y = \frac{1}{3}$, 当 $t < 0$ 时, $x < \frac{1}{3}, \frac{d^2y}{dx^2} < 0$, 则曲线 $y = y(x)$ 在 $(-\infty, \frac{1}{3})$ 上是凸的, 当 $t > 0$ 时, $x > \frac{1}{3}, \frac{d^2y}{dx^2} > 0$, 则曲线 $y = y(x)$ 在 $(\frac{1}{3}, \infty)$ 上是凹的, 点 $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ 是曲线的拐点.

2.6.3 导数的几何意义与曲线的曲率

导数的几何意义

导数 $f'(x_0)$ 在几何上表示曲线 $y = f(x)$ 在点 $M(x_0, f(x_0))$ 处的切线斜率, 曲线 $y = f(x)$ 在点 M 的切线方程为 $y = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$, 法线方程 $y = -\frac{1}{f'(x_0)}(x - x_0) + f(x_0)$ ($f'(x_0) \neq 0$).

例 2.6.13 (2008 数一). 求曲线 $\sin(xy) + \ln(y - x) = x$ 在点 $(0, 1)$ 处的切线方程.

等式 $\sin(xy) + \ln(y - x) = x$ 两端对 x 求导, 得 $\cos(xy)(y + xy') + \frac{y' - 1}{y - x} = 1$, 并令 $x = 0, y = 1$, 解得 $y'(0) = 1$, 于是该曲线在点 $(0, 1)$ 处的切线方程为 $y = x + 1$.

例 2.6.14 (2010 数二). 曲线 $y = x^2$ 与曲线 $y = a \ln x$ ($a \neq 0$) 相切, 则 a 等于

A. 4e

B. 3e

C. 2e

D. e

设曲线 $y = x^2$ 与曲线 $y = a \ln x$ ($a \neq 0$) 的公切点为 (x_0, y_0) , 则 $\begin{cases} x_0^2 = a \ln x_0 \\ 2x_0 = \frac{a}{x_0} \end{cases}$, 解得 $x_0 = \sqrt{e}$, 那么 $a = 2e$, 故选 C.

例 2.6.15. 求对数螺线 $r = e^\theta$ 在 $(r, \theta) = \left(e^{\frac{\pi}{2}}, \frac{\pi}{2}\right)$ 处的切线的直角坐标方程.

由图 4.2.4 知对数螺线的参数方程为 $\begin{cases} x = e^\theta \cos \theta \\ y = e^\theta \sin \theta \end{cases}$ 那么

$$\frac{dy}{dx} \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = \frac{dy/d\theta}{dx/d\theta} \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = \frac{\sin \theta + \cos \theta}{\cos \theta - \sin \theta} \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = -1$$

因此在 $(r, \theta) = \left(e^{\frac{\pi}{2}}, \frac{\pi}{2}\right) \Rightarrow (x, y) = \left(0, e^{\frac{\pi}{2}}\right)$ 处的切线的直角坐标方程为 $x + y = e^{\frac{\pi}{2}}$.

曲线的曲率

定义 2.6.6 (曲率). 在曲线 L 上, 点 N 沿曲线 L 趋于点 M 时, 如果极限 $\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \bar{K} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \alpha}{\Delta s} \right|$ 存在, 则称此极限值为曲线 L 在点 M 处的曲率, 记作 $K = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \alpha}{\Delta s} \right|$. 在 $\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta \alpha}{\Delta s} = \frac{d\alpha}{ds}$ 存在的条件下, K 也可以表示为 $K = \left| \frac{d\alpha}{ds} \right|$. ($\Delta \alpha$ 为动点 N 移动到 M 时切线转过的角度, Δs 为弧段 \widehat{NM} 的长度).

定理 2.6.9 (曲率的计算公式). 设曲线的直角坐标方程是 $y = f(x)$, 且 $f(x)$ 具有二阶导数, 则曲率公式为

$$K = \frac{|y''|}{\left(1 + (y')^2\right)^{3/2}}$$

若曲线方程由参数方程 $\begin{cases} x = \varphi(t) \\ y = \psi(t) \end{cases}$ ($\alpha \leq t \leq \beta$) 给出, 则可利用参数方程确定的函数的求导法, 求出 y'_x 及 y''_x 代入曲率公式即可.

例 2.6.16 (2012 数二). 求曲线 $y = x^2 + x$ ($x < 0$) 上曲率为 $\frac{\sqrt{2}}{2}$ 的点的坐标.

$y' = 2x + 1$, $y'' = 2$, 那么 $K = \frac{|y''|}{(1+y'^2)^{3/2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow (2x+1)^2 = 1 \Rightarrow x = 0, -1$, 又 $x < 0$, 故坐标为 $(-1, 0)$.

例 2.6.17 (2018 数二). 求曲线 $\begin{cases} x = \cos^3 t \\ y = \sin^3 t \end{cases}$ 在 $t = \frac{\pi}{4}$ 对应点处的曲率.

法一: 求出各分量代入曲率公式 $K = \frac{|y''x' - x''y'|}{[(x')^2 + (y')^2]^{3/2}}$,

$$x'\left(\frac{\pi}{4}\right) = -3\cos^2 t \sin t \Big|_{t=\frac{\pi}{4}} = -\frac{3\sqrt{2}}{4}, \quad x''\left(\frac{\pi}{4}\right) = 6\cos t \sin^2 t - 3\cos^3 t \Big|_{t=\frac{\pi}{4}} = \frac{3\sqrt{2}}{4}$$

$$y'\left(\frac{\pi}{4}\right) = 3\sin^2 \cos t \Big|_{t=\frac{\pi}{4}} = \frac{3\sqrt{2}}{4}, \quad y''\left(\frac{\pi}{4}\right) = 6\sin t \cos^2 t - 3\sin^3 t \Big|_{t=\frac{\pi}{4}} = \frac{3\sqrt{2}}{4}$$

于是 $K = \frac{2}{3}$.

法二: $\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right)^{-1} = -\tan t$, $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{3\cos^4 t \sin t}$, 于是 $K = \frac{|y''|}{(1+(y')^2)^{3/2}} = \frac{2}{3}$.

2.6.4 导数不等式证明中的应用

例 2.6.18. 设 $\{a_n\}$ 为常数列, 且 $\left| \sum_{k=1}^n a_k \sin(kx) \right| \leq |\sin x|$, $\left| \sum_{k=1}^n a_{n-k+1} \sin(kx) \right| \leq |\sin x|$, 证明:

$$\left| \sum_{k=1}^n a_k \right| \leq \frac{2}{n+1}.$$

证 分别令 $f(x) = \sum_{k=1}^n a_k \sin(kx)$, $g(x) = \sum_{k=1}^n a_{n-k+1} \sin(kx)$, 则 f, g 在定义域内连续, 且 $f(0) = g(0) = 0$, 于是

$$f'(x) = \sum_{k=1}^n k a_k \cos kx, \quad g'(x) = \sum_{k=1}^n k a_{n-k+1} \cos kx$$

由 Lagrange 中值定理知, $\exists \xi_1, \xi_2 \in (0, x)$, 使得

$$f(x) - f(0) = f'(\xi_1)x \Rightarrow f(x) = f'(\xi_1)x, \quad g(x) - g(0) = g'(\xi_2)x \Rightarrow g(x) = g'(\xi_2)x$$

因此 $f'(\xi_1) + g'(\xi_2) = \frac{f(x)}{x} + \frac{g(x)}{x}$, 一方面

$$|f'(\xi_1) + g'(\xi_2)| = \left| \frac{f(x)}{x} + \frac{g(x)}{x} \right| \leq \left| \frac{f(x)}{x} \right| + \left| \frac{g(x)}{x} \right| \leq 2 \left| \frac{\sin x}{x} \right| \rightarrow 2 \quad (x \rightarrow 0)$$

另一方面当 $x \rightarrow 0$ 时, $\xi_1, \xi_2 \rightarrow 0$, 则

$$|f'(0) + g'(0)| \rightarrow \left| \sum_{k=1}^n k a_k + \sum_{k=1}^n k a_{n-k+1} \right| = \left| \sum_{k=1}^n k a_k + \sum_{k=1}^n (n-k+1) a_k \right| = \left| \sum_{k=1}^n [k + (n-k+1)] a_k \right| = (n+1) \left| \sum_{k=1}^n a_k \right|$$

所以, 当 $x \rightarrow 0$ 时, 有 $(n+1) \left| \sum_{k=1}^n a_k \right| \leq 2 \Rightarrow \left| \sum_{k=1}^n a_k \right| \leq \frac{2}{n+1}$.

第3章

一元函数积分学

“埋头苦干是第一，发白才知智叟。呆勤能补拙是良训，一分辛苦一分才。”

——华罗庚

积分学是微积分的主要部分，在高等数学中占有重要地位，而一元函数积分学是积分学的基础，重积分、曲线积分与曲面积分的计算最终都要化为定积分。

3.1 不定积分

3.1.1 基础类型

多项式型

常用多项式不定积分公式：

$ax + b$

$$(1) \int (ax + b)^n dx = \frac{(ax + b)^{n+1}}{a(n+1)} + C \quad (2) \int \frac{dx}{ax + b} = \frac{1}{a} \ln |ax + b| + C$$

$$(3) \int \frac{1}{x(ax + b)} dx = -\frac{1}{b} \ln \left| \frac{ax + b}{x} \right| + C \quad (4) \int \frac{1}{x^2(ax + b)} dx = \frac{a}{b^2} \ln \left| \frac{ax + b}{x} \right| - \frac{1}{bx} + C$$

$$(5) \int \frac{x}{ax + b} dx = \frac{1}{a^2} (ax + b - b \ln |ax + b|) + C$$

$$(6) \int \frac{x^2}{ax + b} dx = \frac{1}{2a^3} [(ax + b)^2 - 4b(ax + b) + 2b^2 \ln |ax + b|] + C$$

$x^2 \pm \alpha^2$

$$(7) \int \frac{1}{x^2 + \alpha^2} dx = \frac{1}{\alpha} \arctan \frac{x}{\alpha} + C \quad (8) \int \frac{1}{\pm x^2 + \alpha^2} dx = \frac{1}{2\alpha} \ln \left(\frac{x \mp \alpha}{\pm x + \alpha} \right) + C$$

$ax^2 + b$

$$(9) \int \frac{1}{ax^2 + b} dx = \frac{1}{\sqrt{ab}} \arctan \frac{\sqrt{a}x}{\sqrt{b}} + C$$

例 3.1.1. 求下列不定积分.

$$\left| \begin{array}{l} (1) \int \frac{dx}{x^8(1+x^2)}. \\ (5) \int \frac{x^3 dx}{(1+x^8)^2}. \\ (9) \int \frac{x^3 dx}{x^4-x^2+2}. \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} (2) \int \frac{dx}{x(1+x^{10})}. \\ (6) \int \frac{x^{14}}{(x^5+1)^4} dx. \\ (10) \int \frac{x^2}{(1-x)^{100}} dx. \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} (3) \int \frac{x^{11}}{(1+x^8)^2}. \\ (7) \int \frac{x^5 dx}{x^6-x^3-2}. \\ (11) \int \frac{dx}{x^4+1}. \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} (4) \int \frac{x^{11}}{x^8+3x^4+2} dx. \\ (8) \int \frac{xdx}{x^4-2x^2-1}. \\ (12) \int \frac{dx}{x^6+1}. \end{array} \right|$$

(1) 运用倒代换

$$\begin{aligned} \text{原式} & \stackrel{\frac{1}{x}=t}{=} -\int \frac{t^8 dt}{t^2+1} = -\int (t^6-t^4+t^2-1) dt - \int \frac{dt}{t^2+1} \\ & = -\frac{t^7}{7} + \frac{t^5}{5} - \frac{t^3}{3} + t - \arctan t + C = -\frac{1}{7x^7} + \frac{1}{5x^5} - \frac{1}{3x^3} + \frac{1}{x} - \arctan \frac{1}{x} + C. \end{aligned}$$

$$(2) \text{ 原式} \stackrel{\frac{1}{x}=t}{=} -\int \frac{t^9 dt}{1+t^{10}} = -\frac{1}{10} \int \frac{d(t^{10}+1)}{t^{10}+1} = -\frac{1}{10} \ln(t^{10}+1) + C = -\frac{1}{10} \ln(x^{-10}+1) + C.$$

$$(3) \text{ 原式} \stackrel{\frac{x^4=t}{x^2=t^2}}{=} \frac{1}{4} \int \frac{t^2 dt}{(1+t^2)^2} = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{2} \int \frac{dt}{1+t^2} - \frac{t}{2(t^2+1)} \right] = \frac{1}{8} \left(\arctan x^4 - \frac{x^4}{x^8+1} \right) + C.$$

(4) 与上题类似,

$$\begin{aligned} I & \stackrel{\frac{x^4=t}{x^2=3t+2}}{=} \frac{1}{4} \int \frac{t^2 dt}{t^2+3t+2} = \frac{1}{4} \int dt - \frac{1}{4} \int \frac{3t+2}{t^2+3t+2} dt = \frac{t}{4} - \frac{1}{4} \left[\frac{3}{2} \int \frac{dt}{t^2+3t+2} - \frac{5}{2} \int \frac{dt}{\left(t+\frac{3}{2}\right)^2-\frac{5}{4}} \right] \\ & = \frac{t}{4} - \frac{3}{8} \ln(t^2+3t+2) + \frac{\sqrt{5}}{8} \ln \left(\frac{t-\frac{\sqrt{5}}{2}}{t+\frac{\sqrt{5}}{2}} \right) + C = \frac{x^4}{4} - \frac{3}{8} \ln(x^8+3x^4+2) + \frac{\sqrt{5}}{8} \ln \left(\frac{2x^4-\sqrt{5}}{2x^4+\sqrt{5}} \right) + C. \end{aligned}$$

(5) 与上题类似, 并注意 $(\arctan t)' = \frac{1}{1+t^2}$,

$$\begin{aligned} \text{原式} & \stackrel{\frac{x^4=t}{x^2=1+x^8}}{=} \frac{1}{4} \int \frac{dt}{(1+t^2)^2} \stackrel{u=\arctan t}{=} \frac{1}{4} \int \cos^2 u du = \frac{1}{8} \int (\cos 2u+1) du = \frac{\sin 2u}{16} + \frac{u}{8} + C \\ & = \frac{x^4}{8(1+x^8)} + \frac{\arctan x^4}{8} + C. \end{aligned}$$

(6) 因为 $\frac{x^{14} dx}{(x^5+1)^4} = \frac{x^{14} dx}{x^{20}(1+x^{-5})^4} = -\frac{1}{5}(1+x^{-5})^{-4} d(1+x^5)$, 所以

$$\text{原式} = -\frac{1}{5} \int (1+x^{-5})^{-4} d(1+x^{-5}) = \frac{1}{15}(1+x^{-5})^{-3} + C = -\frac{3x^{10}+3x^5+1}{15(x^5+1)^3} + C.$$

$$(7) \text{ 原式} = \frac{1}{3} \int \frac{x^3 dx^3}{(x^3-2)(x^3+1)} = \frac{1}{9} \int \left(\frac{2}{x^3-2} + \frac{1}{x^3+1} \right) dx^3 = \frac{1}{9} \ln[(x^3-2)^2 |x^3+1|] + C.$$

$$(8) \text{ 原式} = \frac{1}{2} \int \frac{(x^2-1) dx}{(x^2-1)^2 - (\sqrt{2})^2} = \frac{1}{4\sqrt{2}} \ln \left| \frac{x-1-\sqrt{2}}{x-1+\sqrt{2}} \right| + C.$$

(9) 用“凑微分”的方法, 有

$$\begin{aligned} \text{原式} & = \frac{1}{2} \int \frac{x^2 dx^2}{\left(x^2-\frac{1}{2}\right)^2 + \frac{7}{4}} = \frac{1}{2} \int \frac{\left(x^2-\frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2}}{\left(x^2-\frac{1}{2}\right)^2 + \frac{7}{4}} d\left(x^2-\frac{1}{2}\right) \\ & = \frac{1}{4} \int \frac{d\left(x^2-\frac{1}{2}\right)^2}{\left(x^2-\frac{1}{2}\right)^2 + \frac{7}{4}} + \frac{1}{4} \int \frac{d\left(x^2-\frac{1}{2}\right)}{\left(x^2-\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{7}}{2}\right)^2} \\ & = \frac{1}{4} \ln(x^4-x^2+2) + \frac{1}{2\sqrt{7}} \arctan \left(\frac{2x^2-1}{\sqrt{7}} \right) + C. \end{aligned}$$

(10) 注意到 $x^2 = [(x-1)+1]^2$, 所以

$$\begin{aligned} \int \frac{x^2}{(1-x)^{100}} dx &= \int \frac{[(x-1)+1]^2}{(1-x)^{100}} dx = \int \left[(1-x)^{-98} - 2(1-x)^{-99} + (1-x)^{-100} \right] dx \\ &= \frac{1}{97(1-x)^{97}} - \frac{1}{49(1-x)^{98}} + \frac{1}{99(1-x)^{99}} + C. \end{aligned}$$

(11) 注意到 $1 = \frac{x^2+1}{2} - \frac{x^2-1}{2}$.

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \frac{1}{2} \int \frac{x^2+1}{x^4+1} dx - \frac{1}{2} \int \frac{x^2-1}{x^4+1} dx = \frac{1}{2} \int \frac{1+\frac{1}{x^2}}{x^2+\frac{1}{x^2}} dx - \frac{1}{2} \int \frac{1-\frac{1}{x^2}}{x^2+\frac{1}{x^2}} dx \\ &= \frac{1}{2} \int \frac{1+\frac{1}{x^2}}{\left(x-\frac{1}{x}\right)^2+2} dx - \frac{1}{2} \int \frac{1-\frac{1}{x^2}}{\left(x+\frac{1}{x}\right)^2-2} dx \stackrel{u=x-\frac{1}{x}}{\stackrel{v=x+\frac{1}{x}}{\longrightarrow}} \frac{1}{2} \int \frac{du}{u^2+2} - \frac{1}{2} \int \frac{dv}{v^2-2} \\ &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \arctan \frac{u}{\sqrt{2}} - \frac{1}{4\sqrt{2}} \ln \left| \frac{v-\sqrt{2}}{v+\sqrt{2}} \right| + C = \frac{1}{2\sqrt{2}} \arctan \frac{x^2-1}{\sqrt{2}x} - \frac{1}{4\sqrt{2}} \ln \left| \frac{x^2-\sqrt{2}x+1}{x^2+\sqrt{2}x+1} \right| + C. \end{aligned}$$

(12) 对分母进行因式分解.

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int \frac{dx}{(x^2+1)(x^4-x^2+1)} = \int \frac{dx}{(x^2+1)(x^2-\sqrt{3}x+1)(x^2+\sqrt{3}x+1)} \\ &= \int \left(\frac{Ax+B}{x^2+1} + \frac{Dx+E}{x^2-\sqrt{3}x+1} + \frac{Fx+G}{x^2+\sqrt{3}x+1} \right) dx \\ &\stackrel{(A,B,D,E,F,G)}{=} \frac{1}{3} \int \frac{dx}{x^2+1} + \frac{1}{6\sqrt{3}} \int \frac{3x+2\sqrt{3}}{x^2+\sqrt{3}x+1} dx - \frac{1}{6\sqrt{3}} \int \frac{3x-2\sqrt{3}}{x^2-\sqrt{3}x+1} dx \end{aligned}$$

其中 $\frac{1}{3} \int \frac{dx}{x^2+1} = \frac{1}{3} \arctan x + C$,

$$\begin{aligned} \int \frac{3x+2\sqrt{3}}{x^2+\sqrt{3}x+1} dx &= \frac{3}{2} \int \frac{2x+\sqrt{3}}{x^2+\sqrt{3}x+1} dx + \frac{\sqrt{3}}{2} \int \frac{dx}{x^2+\sqrt{3}x+1} \\ &= \frac{3}{2} \int \frac{d(x^2+\sqrt{3}x+1)}{x^2+\sqrt{3}x+1} + \frac{\sqrt{3}}{2} \int \frac{dx}{\left(x+\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \frac{1}{4}} \\ &= \frac{3}{2} \ln(x^2+\sqrt{3}x+1) + \sqrt{3} \arctan(2x+\sqrt{3}) + C, \end{aligned}$$

同理

$$\int \frac{3x-2\sqrt{3}}{x^2-\sqrt{3}x+1} dx = \frac{3}{2} \ln(x^2-\sqrt{3}x+1) - \sqrt{3} \arctan(2x-\sqrt{3}) + C,$$

$$\text{综上原式} = \frac{1}{4\sqrt{3}} \ln \frac{x^2+\sqrt{3}x+1}{x^2-\sqrt{3}x+1} + \frac{\arctan(2x+\sqrt{3})}{6} + \frac{\arctan(2x-\sqrt{3})}{6} + \frac{\arctan x}{3} + C.$$

例 3.1.2. 求下列不定积分.

$$(1) \int \frac{x^{2n-1}}{x^n+1} dx. \quad (2) \int \frac{x^{3n-1}}{(x^{2n}+1)^2} dx. \quad (3) \int \frac{x^n}{\sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!}} dx. \quad (4) \int \frac{dx}{1+x^{2n}}.$$

(1) 当 $n \neq 0$ 时,

$$\text{原式} = \int \frac{x^n \cdot x^{n-1}}{x^n+1} dx = \frac{1}{n} \int \frac{x^n dx^n}{x^n+1} = \frac{1}{n} \int dx^n - \frac{1}{n} \int \frac{dx^n}{x^n+1} = \frac{x^n}{n} - \frac{\ln|x^n+1|}{n} + C,$$

当 $n = 0$ 时, 原式 $= \int \frac{dx}{2x} = \frac{1}{2} \ln|x| + C$.

(2) 当 $n \neq 0$ 时,

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int \frac{x^{2n}x^{n-1}}{(x^{2n}+1)^2} dx = \frac{1}{n} \int \frac{x^{2n}dx^n}{(x^{2n}+1)^2} = \frac{1}{n} \int \frac{(x^{2n}+1)-1}{(x^{2n}+1)^2} dx^n = \frac{1}{n} \int \frac{dx^n}{x^{2n}+1} - \frac{1}{n} \int \frac{dx^n}{(x^{2n}+1)^2} \\ &= \frac{1}{n} \arctan x^n - \frac{1}{n} \left[\frac{x^n}{2(x^{2n}+1)} + \frac{1}{2} \arctan x^n \right] + C = \frac{1}{2n} \left(\arctan x^n - \frac{x^n}{x^{2n}+1} \right) + C, \end{aligned}$$

当 $n=0$ 时, 原式 $= \frac{1}{4} \int \frac{dx}{x} = \frac{1}{4} \ln|x| + C$.

(3) 令 $P(x) = \sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!} = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \cdots + \frac{x^n}{n!}$, 于是

$$P'(x) = 1 + x + \cdots + \frac{x^{n-1}}{(n-1)!} = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{x^k}{k!}$$

于是 $x^n = n!(P(x) - P'(x))$, 故

$$\text{原式} = n! \int \left(1 - \frac{P'(x)}{P(x)} \right) dx = n!(x - \ln P(x)) + C = n! \left(x - \ln \sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!} \right) + C.$$

(4) 先将被积函数分解成部分分式之和, 可以证明:

$$\frac{1}{1+x^{2n}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1-x \cos \frac{2k-1}{2n}\pi}{x^2 - 2x \cos \frac{2k-1}{2n}\pi + 1}$$

记多项式 $x^{2n}+1$ 的 $2n$ 个根为 $a_k (k=1, 2, \dots, 2n)$, 显然 $a_k = \cos \frac{2k-1}{2n}\pi + i \sin \frac{2k-1}{2n}\pi$, 其中 $i^2 = -1$, 于是

$$|a_k| = 1, a_k^{2n} = -1, \bar{a}_k = a_{2n-k+1}, a_k \bar{a}_k = 1, a_k + \bar{a}_k = 2 \cos \frac{2k-1}{2n}\pi$$

设 $\frac{1}{1+x^{2n}} = \sum_{k=1}^{2n} \frac{A_k}{x-a_k} \Rightarrow 1 = \sum_{k=1}^{2n} \frac{A_k(1+x^{2n})}{x-a_k}$, 令 $x \rightarrow a_i$, 由 L'Hospital 法则, 得

$$1 = \lim_{x \rightarrow a_i} \sum_{k=1}^{2n} \frac{A_k(1+x^{2n})}{x-a_k} = \lim_{x \rightarrow a_i} \frac{A_i(1+x^{2n})}{x-a_i} = \lim_{x \rightarrow a_i} (2n A_i x^{2n-1}) = 2n A_i \frac{a_i^{2n}}{a_i} = -\frac{2n A_i}{a_i}$$

即 $A_k = -\frac{a_k}{2n} (k=1, 2, \dots, 2n)$, 于是,

$$\begin{aligned} \frac{1}{1+x^{2n}} &= -\frac{1}{2n} \sum_{k=1}^{2n} \frac{a_k}{x-a_k} = -\frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{a_k}{x-a_k} + \frac{\bar{a}_k}{x-\bar{a}_k} \right) = -\frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n \frac{(a_k + \bar{a}_k)x - 2a_k \bar{a}_k}{x^2 - (a_k + \bar{a}_k)x + a_k \bar{a}_k} \\ &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1-x \cos \frac{2k-1}{2n}\pi}{x^2 - 2x \cos \frac{2k-1}{2n}\pi + 1} \end{aligned}$$

最后得到

$$\begin{aligned} \int \frac{dx}{1+x^{2n}} &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \int \frac{1-x \cos \frac{2k-1}{2n}\pi}{x^2 - 2x \cos \frac{2k-1}{2n}\pi + 1} dx = -\frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n \left(\cos \frac{2k-1}{2n}\pi \int \frac{2x-2 \cos \frac{2k-1}{2n}\pi}{x^2 - 2x \cos \frac{2k-1}{2n}\pi + 1} dx \right) \\ &\quad + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left[\sin^2 \frac{2k-1}{2n}\pi \int \frac{dx}{\left(x - \cos \frac{2k-1}{2n}\pi \right)^2 + \sin^2 \frac{2k-1}{2n}\pi} \right] \\ &= -\frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n \left[\cos \frac{2k-1}{2n}\pi \ln \left(x^2 - 2x \cos \frac{2k-1}{2n}\pi + 1 \right) \right] + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\sin \frac{2k-1}{2n}\pi \arctan \frac{x - \cos \frac{2k-1}{2n}\pi}{\sin \frac{2k-1}{2n}\pi} \right) + C. \end{aligned}$$

有理分式快速分解

例 3.1.3. 分解 $F(x) = \frac{x+1}{(x+2)(x+3)}$.

设 $F(x) = \frac{x+1}{(x+2)(x+3)} = \frac{k_1}{x+2} + \frac{k_2}{x+3}$, 欲求 k_1 , 只需等式两边乘分母 $x+2$, 并令 $x=-2$ 为分母的零点, 即

$$k_1 = (x+1)F(x)\Big|_{x=-2} = \frac{x+1}{x+3}\Big|_{x=-2} = -1$$

同理 $k_2 = (x+2)F(x)\Big|_{x=-3} = \frac{x+1}{x+2}\Big|_{x=-3} = 2$, 则 $F(x) = \frac{2}{x+3} - \frac{1}{x+2}$.

例 3.1.4. 分解 $F(x) = \frac{x+3}{(x+1)^2(x+2)}$.

设 $F(x) = \frac{x+3}{(x+1)^2(x+2)} = \frac{k_{11}}{(x+1)^2} + \frac{k_{12}}{x+1} + \frac{k_2}{x+2}$, 与上题类似,

$$k_{11} = (x+1)^2 F(x)\Big|_{x=-1} = \frac{x+3}{x+2}\Big|_{x=-1} = 2$$

$$k_{12} = \frac{d(x+1)^2 F(x)}{dx}\Big|_{x=-1} = \frac{x+3}{x+2}\Big|_{x=-1} = -1$$

$$k_2 = (x+2)F(x)\Big|_{x=-2} = \frac{x+3}{(x+1)^2}\Big|_{x=-2} = 1$$

于是 $F(x) = \frac{2}{(x+1)^2} - \frac{1}{x+1} + \frac{1}{x+2}$.

例 3.1.5. (2019 数二) 求不定积分 $\int \frac{3x+6}{(x-1)^2(x^2+x+1)} dx$.

设 $F(x) = \frac{3x+6}{(x-1)^2(x^2+x+1)} = \frac{k_{11}}{(x-1)^2} + \frac{k_{12}}{x-1} + \frac{k_{21}x+k_{22}}{x^2+x+1}$, 则有

$$k_{11} = (x-1)^2 F(x)\Big|_{x=1} = \frac{3x+6}{x^2+x+1}\Big|_{x=1} = 3$$

$$k_{12} = \frac{d(x-1)^2 F(x)}{dx}\Big|_{x=1} = \frac{-3x^2-12x-3}{(x^2+x+1)^2}\Big|_{x=1} = -2$$

并分别令 $x=0, 2$, 得方程组

$$\begin{cases} k_{11} - k_{12} + k_{22} = 6 \\ k_{11} + k_{12} + \frac{2k_{21} + k_{22}}{7} = \frac{12}{7} \end{cases}$$

因为 $k_{11} = 3, k_{12} = -2$, 故解得 $k_{21} = 1, k_{22} = 2$, 于是

$$F(x) = \frac{3x+6}{(x-1)^2(x^2+x+1)} = \frac{3}{(x-1)^2} + \frac{-2}{x-1} + \frac{x+2}{x^2+x+1}$$

那么不定积分有

$$I = \int F(x) dx = 3 \int \frac{dx}{(x-1)^2} - 2 \int \frac{dx}{x-1} + \int \frac{2x+1}{x^2+x+1} dx = -\frac{3}{x-1} - 2 \ln|x-1| + \ln(x^2+x+1) + C.$$

Ostrogradsky 法 所谓 Ostrogradsky 法, 是指关于有理真分式 $\frac{P(x)}{Q(x)}$ 的积分, 可以借助代数方法来分离成一个真分式与另外一个真分式积分的和, 使得在新的被积真分式函数中其分母次数达到最低状态, 也即在公式

$$\int \frac{P(x)}{Q(x)} dx = \frac{P_1(x)}{Q_1(x)} + \int \frac{P_2(x)}{Q_2(x)} dx$$

中, 如果 $P(x), Q(x)$ 已知, 且设分母 $Q(x)$ 可以分解成一次与二次类型的实因式:

$$Q(x) = (x-a)^k \cdots (x^2+px+q)^m \cdots$$

其中 k, \dots, m, \dots 是正整数.

例 3.1.6. 试用 Ostrogradsky 法求解例题 3.1.5.

原不定积分可化为

$$\int \frac{3x+6}{(x-1)^2(x^2+x+1)} dx = \frac{a}{x-1} + \int \left(\frac{b}{x-1} + \frac{cx+d}{x^2+x+1} \right) dx$$

对等式两边求导，并对比等式两边分子的系数，有

$$\begin{cases} -a & -b & +d & = & 6 \\ -a & +c & -2d & = & 3 \\ -a & -2c & +d & = & 0 \\ b & +c & & = & 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = -3 \\ b = -2 \\ c = 2 \\ d = 1 \end{cases}$$

于是

$$\text{原式} = -\frac{3}{x-1} + \int \frac{-2}{x-1} dx + \int \frac{2x+1}{x^2+x+1} dx = -\frac{3}{x-1} - 2 \ln|x-1| + \ln(x^2+x+1) + C.$$

例 3.1.7. 求 $\int \frac{x^3}{(x^2-2x+2)^2} dx$.

$$\text{设 } \int \frac{x^3}{(x^2-2x+2)^2} dx = \frac{Ax+B}{x^2-2x+2} + \int \frac{Dx+E}{x^2-2x+2} dx,$$

$$\left(\frac{Ax+B}{x^2-2x+2} + \int \frac{Dx+E}{x^2-2x+2} dx \right)' = \frac{A(x^2-2x+2) - (2x-2)(Ax+B)}{(x^2-2x+2)^2} + \frac{(Dx+E)(x^2-2x+2)}{(x^2-2x+2)^2}$$

$$\text{解得 } (A, B, D, E) = (-1, 0, 1, 1), \int \frac{x^3}{(x^2-2x+2)^2} dx = -\frac{x}{x^2-2x+2} + \int \frac{x+1}{x^2-2x+2} dx$$

$$\begin{aligned} \int \frac{x+1}{x^2-2x+2} dx &= \frac{1}{2} \int \frac{d(x^2-2x+2)}{x^2-2x+2} + 2 \int \frac{dx}{x^2-2x+2} = \frac{1}{2} \ln(x^2-2x+2) + 2 \int \frac{dx}{(x-1)^2+1} \\ &= \frac{1}{2} \ln(x^2-2x+2) + 2 \arctan(x-1) + C \end{aligned}$$

$$\text{综上, 原式} = \frac{1}{2} \ln(x^2-2x+2) + 2 \arctan(x-1) - \frac{x}{x^2-2x+2} + C.$$

例 3.1.8. 求 $\int \frac{x^2 dx}{(x^2+2x+2)^2}$.

$$\text{法一: 设 } \frac{x^2}{(x^2+2x+2)^2} = \left(\frac{Ax+B}{x^2+2x+2} \right)' + \frac{Dx+E}{x^2+2x+2}, \text{ 从而}$$

$$x^2 \equiv A(x^2+2x+2) - 2(x+1)(Ax+B) + (Dx+E)(x^2+2x+2)$$

解得 $A=0, B=1, D=0, E=1$, 于是,

$$\text{原式} = \frac{1}{x^2+2x+2} + \int \frac{dx}{x^2+2x+2} = \frac{1}{x^2+2x+2} + \int \frac{d(x+1)}{(x+1)^2+1} = \frac{1}{x^2+2x+2} + \arctan(x+1) + C.$$

法二:

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int \frac{(x^2+2x+2)-(2x+2)}{(x^2+2x+2)^2} dx = \int \frac{dx}{x^2+2x+2} - \int \frac{(2x+2)}{x^2+2x+2} dx \\ &= \int \frac{d(x+1)}{(x+1)^2+1} - \int \frac{d(x^2+2x+2)}{(x^2+2x+2)^2} = \arctan(x+1) + \frac{1}{x^2+2x+2} + C. \end{aligned}$$

根式型

常用根式不定积分公式:

$$\sqrt{a^2 + x^2} \quad (a > 0)$$

$$(1) \int \sqrt{a^2 + x^2} dx = \frac{1}{2}x\sqrt{a^2 + x^2} + \frac{1}{2}a^2 \ln \left(x + \sqrt{a^2 + x^2} \right) + C.$$

$$(2) \int \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{x} dx = \sqrt{a^2 + x^2} - a \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 + x^2}}{x} \right) + C.$$

$$(3) \int \frac{1}{\sqrt{a^2 + x^2}} dx = \ln \left(x + \sqrt{a^2 + x^2} \right) + C.$$

$$(4) \int \frac{1}{x\sqrt{a^2 + x^2}} dx = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{x}{a + \sqrt{a^2 + x^2}} \right) + C.$$

$$\sqrt{x^2 - a^2} \quad (x^2 > a^2)$$

$$(5) \int \frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2}} dx = \ln \left(x + \sqrt{x^2 - a^2} \right) + C.$$

$$\sqrt{a^2 - x^2} \quad (a^2 > x^2)$$

$$(6) \int \sqrt{a^2 - x^2} dx = \frac{1}{2}x\sqrt{a^2 - x^2} + \frac{a^2}{2} \arcsin \frac{x}{a} + C.$$

$$(7) \int \frac{\sqrt{a^2 - x^2}}{x} dx = \sqrt{a^2 - x^2} - a \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 - x^2}}{x} \right) + C.$$

$$(8) \int \frac{1}{\sqrt{a^2 - x^2}} dx = \arcsin \frac{x}{a} + C = -\arccos \frac{x}{a} + C.$$

$$(9) \int \frac{1}{x\sqrt{a^2 - x^2}} dx = -\frac{1}{a} \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 - x^2}}{x} \right) + C.$$

例 3.1.9. 求下列不定积分

$$(1) \int \frac{dx}{\sqrt{x(1-x)}}. \quad | \quad (2) \int \frac{dx}{\sqrt{x(1+x)}}. \quad | \quad (3) \int \frac{\arccot \sqrt{x}}{\sqrt{x}(1+x)} dx. \quad | \quad (4) \int \sqrt{\frac{x}{1-x\sqrt{x}}} dx.$$

(1) 法一：倒代换

$$\text{原式} \stackrel{x=\frac{1}{t}}{=} \int \frac{t}{\sqrt{t-1}} \left(-\frac{1}{t^2} \right) dt = - \int \frac{dt}{t\sqrt{t-1}} = -2 \int \frac{d\sqrt{t-1}}{1+(\sqrt{t-1})^2} = -2 \arctan \sqrt{\frac{1-x}{x}} + C.$$

$$\text{法二：原式} = \int \frac{dx}{\sqrt{x}\sqrt{1-x}} = 2 \int \frac{d\sqrt{x}}{\sqrt{1-(\sqrt{x})^2}} = 2 \arcsin \sqrt{x} + C.$$

$$\text{法三：原式} = \int \frac{d(2x-1)}{\sqrt{1-(2x-1)^2}} = \arcsin(2x-1) + C.$$

$$(2) \text{法一：原式} \stackrel{\sqrt{x}=t}{=} 2 \int \frac{dt}{1+t^2} = 2 \arctan t + C = 2 \arctan \sqrt{x} + C.$$

$$\text{法二：原式} \stackrel{\sqrt{x}=\tan t}{\substack{0 < t < \frac{\pi}{2}}} 2 \int dt = 2t + C = 2 \arctan \sqrt{x} + C.$$

$$\text{法三：原式} = \int \frac{dx}{\sqrt{x}} + \int \frac{dx}{1+x} = 2\sqrt{x} + \ln|1+x| + C.$$

$$(3) \text{原式} \stackrel{\arccot \sqrt{x}=t}{=} -2 \int t dt = -t^2 + C = -\arccot^2 \sqrt{x} + C.$$

$$(4) \text{原式} \stackrel{\sqrt{x}=t}{=} \int \frac{2t^2}{\sqrt{1-t^3}} dt = -\frac{4}{3} \int d\sqrt{1-t^3} = -\frac{4}{3} \sqrt{1-t^3} + C = -\frac{4}{3} \sqrt{1-x^{\frac{3}{2}}} + C.$$

常见的处理手法 利用公式 $\int \frac{P_n(x)}{R} dx = Q_{n-1}(x)R + \lambda \int \frac{dx}{R}$, 其中 $R = \sqrt{ax^2 + bx + c}$, $P_n(x)$ 为 n 次多项式, $Q_{n-1}(x)$ 为 $n-1$ 次多项式, λ 为常数.

Euler 代换 对于含有二次无理式的一般积分 $\int R(x, \sqrt{ax^2 + bx + c}) dx$, 其中 $R(u, v)$ 是二元有理函数, 则可作 Euler 代换, 它有三种形式:

- (1) 若 $a > 0$, 则可令 $\sqrt{ax^2 + bx + c} = \pm\sqrt{ax + t}$;
- (2) 若 $c > 0$, 则可令 $\sqrt{ax^2 + bx + c} = xt \pm \sqrt{c}$;
- (3) 对于根号内为可约的二次三项式, 则可令 $\sqrt{a(x - x_1)(x - x_2)} = t(x - x_1)$.

根式代换 $\int R\left(x, \sqrt[n]{\frac{ax+b}{cx+d}}\right) dx$ 型不定积分, 其中 $R(u, v)$ 为二元有理函数. 令 $t = \sqrt[n]{\frac{ax+b}{cx+d}}$.

例 3.1.10. 求下列不定积分

$(1) \int \frac{dx}{x\sqrt{x^2-1}}.$ $(4) \int \frac{dx}{(1+x^2)^{\frac{3}{2}}}.$ $(7) \int \frac{dx}{x\sqrt{4-x^2}}.$ $(10) \int \frac{1-x+x^2}{x\sqrt{1+x-x^2}} dx.$	$(2) \int \frac{dx}{x^2\sqrt{x^2-4}}.$ $(5) \int \frac{x dx}{\sqrt{x^2+2x+2}}.$ $(8) \int x^3\sqrt{4-x^2} dx.$ $(11) \int \frac{2x^3+x^2-1}{(x^2-1)\sqrt{1-x^2}} dx.$	$(3) \int \frac{dx}{1+\sqrt{1-x^2}}.$ $(6) \int \frac{dx}{x+\sqrt{x^2+x+1}}.$ $(9) \int \frac{\sqrt{16-x^2}}{x} dx.$ $(12) \int \frac{x^2+1}{x\sqrt{x^4+1}} dx.$
--	---	--

(1) 法一: 原式 $\frac{\text{第一 Euler 代换}}{\sqrt{x^2-1}=x+t} 2 \int \frac{dt}{t^2+1} = 2 \arctan t + C = 2 \arctan(\sqrt{x^2-1}-x) + C$.

法二: 原式 $\frac{\text{第三 Euler 代换}}{\sqrt{x^2-1}=t(x-1)} 2 \int \frac{dt}{t^2+1} = 2 \arctan t + C = -2 \arctan \frac{\sqrt{x^2-1}}{x-1} + C$.

法三: 原式 $= \int \frac{x dx}{x^2\sqrt{x^2-1}} = \int \frac{d\sqrt{x^2-1}}{(\sqrt{x^2-1})^2+1} = \arctan \sqrt{x^2-1} + C$.

(2) 原式 $\frac{x=\frac{1}{t}}{-} \int \frac{tdt}{\sqrt{1-4t^2}} = \frac{1}{4} \int d\sqrt{1-4t^2} = \frac{\sqrt{1-4t^2}}{4} + C = \frac{1}{4} \sqrt{1-\frac{4}{x^2}} + C$.

(3) 法一: 三角代换.

$$\begin{aligned} \text{原式 } &\stackrel{x=\sin t}{=} \int \frac{\cos t dt}{1+\cos t} = \int \left(1 - \frac{1}{1+\cos t}\right) dt = t - \tan \frac{t}{2} + C \\ &= \arcsin x - \tan \frac{\arcsin x}{2} + C = \arcsin x - \frac{1-\sqrt{1-x^2}}{x} + C. \end{aligned}$$

法二: 原式 $= \int \frac{1-\sqrt{1-x^2}}{x^2} dx = \int \frac{dx}{x^2} - \int \frac{\sqrt{1-x^2}}{x^2} dx = \arcsin x + \frac{\sqrt{1-x^2}}{x} - \frac{1}{x} + C$.

其中

$$\int \frac{\sqrt{1-x^2}}{x^2} dx = \int \sqrt{1-x^2} d\left(-\frac{1}{x}\right) = -\frac{\sqrt{1-x^2}}{x} - \int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = -\frac{\sqrt{1-x^2}}{x} - \arcsin x + C.$$

(4) 原式 $\frac{x=\tan t}{=} \int \cos t dt = \sin t + C = \sin \arctan x + C = \frac{x}{\sqrt{x^2+1}} + C$.

(5) 三角代换.

$$\begin{aligned} \text{原式 } &\stackrel{x=\tan t}{=} \int \frac{dt}{\sqrt{(x+1)^2+1}} \stackrel{x+1=\tan t}{=} \int \frac{\tan t - 1}{\cos t} dt = - \int \frac{d\cos t}{\cos^2 t} - \int \sec t dt \\ &= \sec t - \ln |\sec t + \tan t| + C = \sqrt{(x+1)^2+1} - \ln \left| \sqrt{(x+1)^2+1} + x+1 \right| + C. \end{aligned}$$

(6) Euler 代换转化为多项式函数.

$$\begin{aligned}
 & \text{原式} \xrightarrow{\substack{\text{第一 Euler 代换} \\ \sqrt{x^2+x+1}=t-x}} \int \frac{2(t^2+t+1)}{t(2t+1)^2} dt = \frac{1}{2} \int \frac{t^2+2+1}{t(t+\frac{1}{2})^2} dt \\
 &= \frac{1}{2} \int \left[-\frac{3}{t+\frac{1}{2}} - \frac{3}{(t+\frac{1}{2})^2} + \frac{4}{t} \right] dt = 2 \ln|t| - \frac{3}{2} \ln|2t+1| + \frac{3}{2(2t+1)} + C \\
 &= 2 \ln \left| \sqrt{x^2+x+1} + x \right| - \frac{3}{2} \ln \left| 2\sqrt{x^2+x+1} + 2x+1 \right| + \frac{3}{2(2\sqrt{x^2+x+1} + 2x+1)} + C.
 \end{aligned}$$

(7) 法一: $\sqrt{4-x^2} = t \Rightarrow x = \pm\sqrt{4-t^2}$, $dx = \mp \frac{dt}{\sqrt{4-t^2}}$, 所以

$$\begin{aligned}
 & \text{原式} = \int \frac{1}{\pm t\sqrt{4-t^2}} \cdot \frac{\mp t}{\sqrt{4-t^2}} dt = - \int \frac{dt}{4-t^2} = \frac{1}{4} \int \left(\frac{1}{t-2} - \frac{1}{t+2} \right) dt \\
 &= \frac{1}{4} \ln \left| \frac{t-2}{t+2} \right| + C = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{x}{2+\sqrt{4-x^2}} \right| + C.
 \end{aligned}$$

法二: 利用第二种 Euler 代换,

$$\sqrt{4-x^2} = xt - 2 \Rightarrow x = \frac{4t}{1+t^2}, \quad dx = \frac{4(1-t^2)}{(1+t^2)^2} dt, \quad \sqrt{4-x^2} = \frac{2(-1+t^2)}{1+t^2}$$

$$\text{原式} = -\frac{1}{2} \int dt = -\frac{1}{2} \ln|t| + C = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{x}{2+\sqrt{4-x^2}} \right| + C.$$

(8) 变量代换,

$$\begin{aligned}
 & \text{原式} \xrightarrow{\substack{4-x^2=t \\ 4-x^2=t}} \frac{1}{2} \int (t-4)\sqrt{t} dt = \frac{1}{2} \int t^{\frac{3}{2}} dt - 2 \int t^{\frac{1}{2}} dt = \frac{1}{5} t^{\frac{5}{2}} - \frac{4}{3} t^{\frac{3}{2}} + C \\
 &= \frac{x^4\sqrt{4-x^2}}{5} - \frac{4x^2\sqrt{4-x^2}}{15} - \frac{32\sqrt{4-x^2}}{15} + C.
 \end{aligned}$$

(9) 法一: $\sqrt{16-x^2} = t \Rightarrow x = \pm\sqrt{16-t^2}$, $dx = \mp \frac{tdt}{\sqrt{16-t^2}}$, 故

$$\begin{aligned}
 & \text{原式} = \int \frac{-t^2}{16-t^2} dt = \int \frac{16-t^2-16}{16-t^2} dt = \int dt - 16 \int \frac{dt}{4^2-t^2} \\
 &= t - 2 \ln \left| \frac{t+4}{-t+4} \right| + C = \sqrt{16-x^2} - 2 \ln \left| \frac{-x^2+8\sqrt{16-x^2}+32}{x^2} \right| + C.
 \end{aligned}$$

法二: $x = 4 \sin t, 0 < |t| < \frac{\pi}{2}$, $dx = 4 \cos t dt$, 所以

$$\begin{aligned}
 & \text{原式} = 4 \int \frac{\cos^2 t}{\sin t} dt = 4 \int \frac{1-\sin^2 t}{\sin t} dt = 4 \int \csc t dt - 4 \int \sin t dt \\
 &= 4 \cos t - 4 \ln|\csc t + \cot t| + C = \sqrt{16-x^2} - 4 \ln \left| \frac{4+\sqrt{16-x^2}}{x} \right| + C.
 \end{aligned}$$

(10) 原式 = $\int \frac{dx}{x\sqrt{1+x-x^2}} - \int \frac{dx}{\sqrt{1+x-x^2}} + \int \frac{x dx}{\sqrt{1+x-x^2}}$, 则

$$\int \frac{dx}{x\sqrt{1+x-x^2}} \xrightarrow{\substack{\text{第二 Euler 换元} \\ \sqrt{1+x-x^2}=tx-1}} \int \frac{-2dt}{1+2t} = -\ln|1+2t| + C = -\ln \left| \frac{2\sqrt{1+x-x^2}+2+x}{x} \right| + C$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{1+x-x^2}} = \int \frac{d\left(x-\frac{1}{2}\right)}{\sqrt{\frac{5}{4}-\left(x-\frac{1}{2}\right)^2}} = \arcsin\left(\frac{2x-1}{\sqrt{5}}\right) + C$$

$$\int \frac{x dx}{\sqrt{1+x-x^2}} = \int \frac{\left(x-\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2}}{\sqrt{\frac{5}{4}-\left(x-\frac{1}{2}\right)^2}} d\left(x-\frac{1}{2}\right) = -\sqrt{1+x-x^2} + \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{2x-1}{\sqrt{5}}\right) + C$$

$$\text{故, 原式} = -\ln \left| \frac{2+x+2\sqrt{1+x-x^2}}{x} \right| + \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{1-2x}{\sqrt{5}}\right) - \sqrt{1+x-x^2} + C.$$

(11) 注意到 $\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x + C$, 那么

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int \frac{2x^3}{(x^2-1)\sqrt{1-x^2}} dx + \int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \int \frac{(x^2-1)+1}{(x^2-1)\sqrt{1-x^2}} d(x^2-1) + \arcsin x \\ &= \int \frac{d(x^2-1)}{\sqrt{1-x^2}} + \int \frac{d(x^2-1)}{(x^2-1)\sqrt{1-x^2}} + \arcsin x = \frac{2x^2-4}{\sqrt{1-x^2}} + \arcsin x + C. \end{aligned}$$

(12) 注意到 $\int \frac{x^2+1}{x\sqrt{x^4+1}} dx = \frac{\operatorname{sgn} x \cdot \left(1 + \frac{1}{x^2}\right)}{\sqrt{x^2 + \frac{1}{x^2}}} dx = \frac{\operatorname{sgn} x d\left(x - \frac{1}{x}\right)}{\sqrt{\left(x - \frac{1}{x}\right)^2 + 2}}$, 所以

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int \frac{\operatorname{sgn} x \left(1 + \frac{1}{x^2}\right)}{\sqrt{x^2 + \frac{1}{x^2}}} dx = \int \frac{\operatorname{sgn} x d\left(x - \frac{1}{x}\right)}{\sqrt{\left(x - \frac{1}{x}\right)^2 + 2}} = \operatorname{sgn} x \ln \left(x - \frac{1}{x} + \sqrt{\left(x - \frac{1}{x}\right)^2 + 2} \right) + C \\ &= \ln \left| \frac{x^2 - 1 + \sqrt{x^4 + 1}}{x} \right| + C. \end{aligned}$$

例 3.1.11. 求下列不定积分

(1) $\int \frac{1-\sqrt{x+1}}{1+\sqrt[3]{x+1}} dx.$	(2) $\int \frac{dx}{\sqrt[3]{(x+1)^2(x-1)^4}}.$	(3) $\int \frac{\sqrt{x+1}-\sqrt{x-1}}{\sqrt{x+1}+\sqrt{x-1}} dx.$
(4) $\int \frac{x^2}{\sqrt{x^2+x+1}} dx.$	(5) $\int \frac{dx}{(1-x)^2\sqrt{1-x^2}}.$	(6) $\int \frac{\sqrt{x^2+2x+2}}{x} dx.$
(7) $\int \frac{x^3}{\sqrt{1+2x-x^3}} dx.$	(8) $\int \frac{x^3-6x^2+11x-6}{\sqrt{x^2+4x+3}} dx.$	(9) $\int \frac{dx}{(x-1)^3\sqrt{x^2+3x+1}}.$

(1) 令 $\sqrt[6]{x+1} = t$, 那么 $x+1 = t^6$, $dx = 6t^5 dt$, 故

$$\begin{aligned} \text{原式} &= 6 \int \frac{t^5(1-t^3)}{1+t^2} dt = 6 \int \left(-t^6 + t^4 + t^3 - t^2 - t + 1 + \frac{t-1}{t^2+1} \right) dt \\ &= -\frac{6}{7}t^7 + \frac{6}{5}t^5 + \frac{3}{2}t^4 - 2t^3 - 3t^2 + 6t + 3\ln(t^2+1) - 6\arctan t + C \end{aligned}$$

其中 $t = \sqrt[6]{x+1}$.

(2) 令 $\sqrt[3]{\frac{x+1}{x-1}} = t$, 那么 $x = \frac{t^3+1}{t^3-1}$, $dx = -\frac{6t^2 dt}{(t^3-1)^2}$, 于是

$$\text{原式} = \int \frac{\frac{-6t^2 dt}{(t^3-1)^2}}{\left(\frac{2t^3}{t^2-1}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{2}{t^3-1}\right)^{\frac{1}{3}}} = -\frac{3}{2} \int dt = -\frac{3}{2}t + C = -\frac{3}{2}\sqrt[3]{\frac{x+1}{x-1}} + C.$$

(3) 法一: 设 $\sqrt{\frac{x+1}{x-1}} = t$, 那么 $x = \frac{t^2+1}{t^2-1}$, $dx = -\frac{4tdt}{(t^2-1)^2}$, 故

$$\begin{aligned} \text{原式} &= -4 \int \frac{t}{(t-1)(t+1)^3} dt = \int \left[-\frac{2}{(t+1)^3} + \frac{1}{(t+1)^2} + \frac{1}{2(t+1)} - \frac{1}{2(t-1)} \right] dt \\ &= \frac{1}{(t+1)^2} - \frac{1}{t+1} + \frac{1}{2} \ln \left| \frac{t+1}{t-1} \right| + C = \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{2}x\sqrt{x^2-1} + \frac{1}{2}\ln|x+\sqrt{x^2-1}| + C. \end{aligned}$$

法二: 原式 $= \int (x - \sqrt{x^2-1}) dx = \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}x\sqrt{x^2-1} + \frac{1}{2}\ln|x+\sqrt{x^2-1}| + C$.

(4) 因为原式 $= \int \frac{x^2+x+1}{\sqrt{x^2+x+1}} dx - \frac{1}{2} \int \frac{2x+1}{\sqrt{x^2+x+1}} dx - \frac{1}{2} \int \frac{dx}{\sqrt{x^2+x+1}}$, 所以

$$\text{原式} = \int \sqrt{\left(x + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}} d\left(x + \frac{1}{2}\right) - \frac{1}{2} \int \frac{d(x^2+x+1)}{\sqrt{x^2+x+1}} - \frac{1}{2} \int \frac{d\left(x + \frac{1}{2}\right)}{\sqrt{\left(x + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}}}$$

$$= \frac{2x-3}{4} \sqrt{x^2+x+1} - \frac{1}{8} \ln \left(x + \frac{1}{2} + \sqrt{x^2+x+1} \right) + C.$$

(5) 令 $\sqrt{\frac{1-x}{1+x}} = t$, 则 $x = \frac{1-t^2}{1+t^2}$, $dx = -\frac{4t}{(1+t^2)^2} dt$, $1-x = \frac{2t^2}{1+t^2}$, $\sqrt{1-x^2} = \frac{2t}{1+t^2}$, 则

$$\text{原式} = -\frac{1}{2} \int \frac{1+t^2}{t^4} dt = \frac{1}{6t^3} + \frac{1}{2t} + C = \frac{2-x}{3(1-x)^2} \sqrt{1-x^2} + C.$$

(6) 令 $\sqrt{x^2+2x+2} = t-x$, $x = \frac{t^2-2}{2(t+1)}$, $dx = \frac{t^2+2t+2}{2(t+1)^2} dt$, $\sqrt{x^2+2x+2} = \frac{t^2+2t+2}{2(t+1)}$, 则

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \frac{1}{2} \int \frac{(t^2+2t+2)^2}{(t^2-2)(t+1)^2} dt = \frac{1}{2} \int \left[1 + \frac{2}{t+1} - \frac{1}{(t+1)^2} - \frac{2\sqrt{2}}{t+\sqrt{2}} + \frac{2\sqrt{2}}{t-\sqrt{2}} \right] dt \\ &= \frac{t}{2} + \ln|t+1| + \frac{1}{2(t+1)} - \sqrt{2} \ln \left| \frac{t+\sqrt{2}}{t-\sqrt{2}} \right| + C \\ &= \sqrt{x^2+2x+2} + \ln \left(x+1 + \sqrt{x^2+2x+2} \right) - \sqrt{2} \ln \left| \frac{x+2+\sqrt{2(x^2+2x+2)}}{x} \right| + C \end{aligned}$$

(7) 设 $\int \frac{x^3 dx}{\sqrt{1+2x-x^2}} = (ax^2+bx+c)\sqrt{1+2x-x^2} + \lambda \int \frac{dx}{\sqrt{1+2x-x^2}}$, 两边对 x 求导, 得

$$\frac{x^3}{\sqrt{1+2x-x^2}} = (2ax+b)\sqrt{1+2x-x^2} + \frac{(ax^2+bx+c)(1-x)}{\sqrt{1+2x-x^2}} + \frac{\lambda}{\sqrt{1+2x-x^2}}$$

从而有

$$\begin{aligned} x^3 &\equiv (2ax+b)(1+2x-x^2) + (ax^2+bx+c)(1-x) + \lambda \\ \text{比较等式两端 } x \text{ 的系数, } \begin{cases} -3a &= 1 \\ 5a &= 0 \\ 2a &= 0 \\ +3b &= 0 \\ b &= 0 \\ -c &= 0 \\ +c &= 0 \\ +\lambda &= 0 \end{cases} &\Rightarrow a = -\frac{1}{5}, b = -\frac{5}{6}, c = -\frac{19}{6}, \lambda = 4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{原式} &= -\frac{19+5x+2x^2}{6} \sqrt{1+2x-x^2} + 4 \int \frac{dx}{\sqrt{1+2x-x^2}} \\ &= -\frac{19+5x+2x^2}{6} \sqrt{1+2x-x^2} + 4 \arcsin \left(\frac{x-1}{\sqrt{2}} \right) + C. \end{aligned}$$

(8) 设 $\int \frac{x^3-6x^2+11x-6}{\sqrt{x^2+4x+3}} dx = (ax^2+bx+c)\sqrt{x^2+4x+3} + \lambda \int \frac{dx}{\sqrt{x^2+4x+3}}$, 从而有

$$x^3-6x^2+11x-6 \equiv (2ax+b)(x^2+4x+3) + (x+2)(ax^2+bx+c) + \lambda$$

$$\begin{aligned} \text{比较等式两端 } x \text{ 的系数, } \begin{cases} 3a &= 1 \\ 10a &= -6 \\ 6a &= 11 \\ +2b &= 0 \\ +6b &= 0 \\ +c &= 0 \\ +2c &= 0 \\ +\lambda &= -6 \end{cases} &\Rightarrow a = \frac{1}{3}, b = -\frac{14}{3}, c = 37, \lambda = -66, \end{aligned}$$

$$\text{原式} = \left(\frac{1}{3}x^2 - \frac{14}{3}x + 37 \right) \sqrt{x^2+4x+3} - 66 \ln|x+2+\sqrt{x^2+4x+3}| + C.$$

(9) 设 $x-1 = \frac{1}{t}$, 则 $dx = -\frac{1}{t^2} dt$, 不妨设 $t > 0$, 则有 $\sqrt{x^2+3x+1} = \frac{\sqrt{5t^2+5t+1}}{t}$, 故

$$\text{原式} = - \int \frac{t^2}{\sqrt{5t^2+5t+1}} dt = (at+b)\sqrt{5t^2+5t+1} + \lambda \int \frac{dt}{\sqrt{5t^2+5t+1}}$$

从而有

$$-t^2 \equiv a(1+5t+5t^2) + \left(55 + \frac{5}{2} \right) (at+b) + \lambda$$

比较等式两端 t 的同次幂系数, 求得 $a = -\frac{1}{10}$, $b = \frac{3}{20}$, $\lambda = -\frac{11}{40}$, 于是

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \left(-\frac{t}{10} + \frac{3}{20} \right) \sqrt{5t^2+5t+1} - \frac{11}{40} \int \frac{dt}{\sqrt{5t^2+5t+1}} \\ &= \frac{3-2t}{20} \sqrt{5t^2+5t+1} - \frac{11}{40\sqrt{5}} \ln \left| t + \frac{1}{2} + \sqrt{t^2+t+\frac{1}{5}} \right| + C \\ &= \frac{3x-5}{20(x-1)^2} \sqrt{x^2+3x+1} - \frac{11}{40\sqrt{5}} \ln \left| \frac{\sqrt{5}(x+1)+2\sqrt{x^3+3x+1}}{x-1} \right| + C. \end{aligned}$$

二项微分式的积分 $\int x^m (ax^n + b)^p dx$, 式中 m, n 和 p 为有理数, 仅在下列三种情形可化为有理函数的积分:

- (1) p 为整数, 此时令 $x = z^N$, 其中 N 为分数 m 和 n 的公分母;
- (2) $\frac{m+1}{n}$ 为整数, 此时令 $ax^n + b = z^N$, 其中 N 为分数 p 的分母;
- (3) $\frac{m+1}{n} + p$ 为整数, 此时利用代换: $a + bx^{-n} = z^N$, 其中 N 为分数 p 的分母.

若 $n = 1$, 则这些情形等价于: (1) p 为整数. (2) m 为整数. (3) $m + p$ 为整数.

例 3.1.12. 求下列不定积分

$$(1) \int \sqrt{x^3 + x^4} dx. \quad (2) \int \frac{\sqrt{x}}{(1 + \sqrt[3]{x})^2} dx. \quad (3) \int \frac{x dx}{\sqrt{1 + \sqrt[3]{x^2}}}. \quad (4) \int \frac{x^5 dx}{\sqrt{1 - x^2}}.$$

(1) $\sqrt{x^3 + x^4} = x^{\frac{3}{2}}(1 + x)^{\frac{1}{2}}$, 则 $m = \frac{3}{2}$, $n = 1$, $p = \frac{1}{2}$, 那么 $\frac{m+1}{n} + p = 3$, 故令 $x^{-1} + 1 = z^2$, 于是

$$x = \frac{1}{z^2 - 1}, \quad dx = -\frac{2z}{(z^2 - 1)^2} dz, \quad \sqrt{x^3 + x^4} = \frac{z}{(z^2 - 1)^2}$$

$$\begin{aligned} \text{原式} &= -2 \int \frac{z^2}{(z^2 - 1)^4} dz = -2 \int \frac{dz}{(z^2 - 1)^4} - 2 \int \frac{dz}{(z^2 - 1)^3} \\ &= \frac{z}{3(z^2 - 1)^3} + \frac{z}{12(z^2 - 1)^2} - \frac{z}{8(z^2 - 1)} + \frac{1}{16} \ln \frac{z+1}{z-1} + C \\ &= \frac{1}{3} \sqrt{(x+x^2)^3} - \frac{1+2x}{8} \sqrt{x+x^2} + \frac{1}{8} \ln (\sqrt{x} + \sqrt{x+1}) + C \quad (x > 0). \end{aligned}$$

(2) $\frac{\sqrt{x}}{(1 + \sqrt[3]{x})^2} = x^{\frac{1}{2}}(1 + x^{\frac{1}{3}})^{-2}$, 则 $m = \frac{1}{2}$, $n = \frac{1}{3}$, $p = -2$, 由于 p 为整数, 故令 $x = z^6$,

$$\begin{aligned} \text{原式} &= 6 \int \frac{z^8}{(z^2 + 1)^2} dz = 6 \int \left[z^4 - 2z^2 + 3 - \frac{4}{z^2 + 1} + \frac{1}{(z^2 + 1)^2} \right] dz \\ &= \frac{6}{5} z^5 - 4z^3 + 18z - 24 \arctan z + 6 \left[\frac{z}{2(z^2 + 1)} + \frac{1}{2} \arctan z \right] + C \\ &= \frac{6}{5} x^{\frac{5}{6}} - 4x^{\frac{1}{2}} + 18x^{\frac{1}{6}} + \frac{3x^{\frac{1}{6}}}{1 + x^{\frac{1}{3}}} - 21 \arctan x^{\frac{1}{6}} + C. \end{aligned}$$

(3) $\frac{x}{\sqrt{1 + \sqrt[3]{x^2}}} = x(1 + x^{\frac{2}{3}})^{-\frac{1}{2}}$, 则 $m = 1$, $n = \frac{2}{3}$, $p = -\frac{1}{2}$, 那么 $\frac{m+1}{n} = 3$, 故令 $1 + x^{\frac{2}{3}} = z^2$,

$$\text{原式} = 3 \int (z^2 - 1)^2 dz = \frac{3}{5} z^5 - 2z^3 + 3z + C$$

其中 $z = \sqrt{1 + \sqrt[3]{x^2}}$.

(4) $\frac{x^5}{\sqrt{1 - x^2}} = x^5(1 - x^2)^{-\frac{1}{2}}$, 则 $m = 5$, $n = 2$, $p = -\frac{1}{2}$, 那么 $\frac{m+1}{n} = 3$, 故令 $1 - x^2 = z^2$,

$$\text{原式} = - \int (1 - z^2)^2 dz = -z + \frac{2}{3} z^3 - \frac{1}{5} z^5 + C$$

其中 $z = \sqrt{1 - x^2}$.

三角函数型

常用三角函数不定积分公式:

三角函数

$$(1) \int \sin x dx = -\cos x + C$$

$$(2) \int \cos x dx = \sin x + C$$

$$(3) \int \tan x dx = -\ln |\cos x| + C$$

$$(4) \int \cot x dx = \ln |\sin x| + C$$

$$(5) \int \sec x dx = \ln |\sec x + \tan x| + C$$

$$(6) \int \csc x dx = -\ln |\csc x + \cot x| + C$$

$$(7) \int \sin^2 x dx = \frac{x}{2} - \frac{\sin 2x}{4} + C$$

$$(8) \int \cos^2 x dx = \frac{x}{2} + \frac{\sin 2x}{4} + C$$

$$(9) \int \tan^2 x dx = \tan x - x + C$$

$$(10) \int \cot^2 x dx = -\cot x - x + C$$

$$(11) \int \sec^2 x dx = \tan x + C$$

$$(12) \int \csc^2 x dx = -\cot x + C$$

$$(13) \int \sin^n x dx = -\frac{\sin^{n-1} x \cos x}{n} + \frac{n-1}{n} I_{n-2}$$

$$(14) \int \cos^n x dx = \frac{\sin x \cos^{n-1} x}{n} + \frac{n-1}{n} I_{n-2}$$

$$(15) \int \tan^n x dx = \frac{\tan^{n-1} x}{n-1} - I_{n-2}$$

$$(16) \int \cot^n x dx = -\frac{\cot^{n-1} x}{n-1} - I_{n-2}$$

$$(17) \int \sec^n x dx = \frac{\sec^{n-2} x \tan x}{n-1} + \frac{n-2}{n-1} I_{n-2}$$

$$(18) \int \csc^n x dx = -\frac{\csc^{n-2} x \cot x}{n-1} + \frac{n-2}{n-1} I_{n-2}$$

$$(19) \int \sec x \tan x dx = \sec x + C$$

$$(20) \int \csc x \cot x dx = -\csc x + C$$

反三角函数

$$(21) \int \arcsin x dx = x \arcsin x + \sqrt{1-x^2} + C \quad (22) \int \arccos x dx = x \arccos x - \sqrt{1-x^2} + C$$

$$(23) \int \arctan x dx = x \arctan x - \ln \sqrt{1+x^2} + C \quad (24) \int \operatorname{arccot} x dx = x \operatorname{arccot} x + \ln \sqrt{1+x^2} + C$$

$$(25) \int \operatorname{arcsec} x dx = x \operatorname{arcsec} x - \operatorname{sgn}(x) \ln |x + \sqrt{x^2 - 1}| + C$$

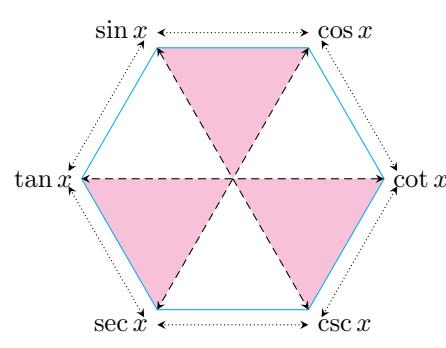
$$(26) \int \operatorname{arccsc} x dx = x \operatorname{arccsc} x + \operatorname{sgn}(x) \ln |x + \sqrt{x^2 - 1}| + C$$

各三角函数之间的关系图 下图可以很好的概括各三角函数之间的转化关系.

$$\arcsin x + \arccos x = \frac{\pi}{2}$$

$$\arctan x + \operatorname{arccot} x = \frac{\pi}{2}$$

$$\operatorname{arcsec} x + \operatorname{arccsc} x = \frac{\pi}{2}$$



邻: $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$

$\sec^2 x - \tan^2 x = 1$

$\csc^2 x - \cot^2 x = 1$

间: $\cos x = \sin \cdot \cot x$

$\cot x = \cos \cdot \csc x$

其他情况类似

对: $\cos x \cdot \sec x = 1$

$\cot x \cdot \tan x = 1$

$\csc x \cdot \sin x = 1$

图 3.1.1

例 3.1.13. 求下列不定积分

$$\begin{array}{lll} (1) \int \cos^5 x dx. & (2) \int \sin^6 x dx. & (3) \int \frac{dx}{\sin^3 x}. \\ (4) \int \frac{dx}{\cos^3 x}. & (5) \int \tan^5 x dx. & (6) \int \cot^6 x dx. \end{array}$$

(1) 法一: 因为 $\int \cos^n x dx = \frac{1}{n} \cos^{n-1} x \sin x + \frac{n-1}{n} \int \cos^{n-2} x dx + C (\forall n \geq 2)$, 所以

$$\text{原式} = \frac{1}{5} \cos^4 x \sin x + \frac{4}{5} \int \cos^3 x dx = \frac{1}{5} \cos^4 x \sin x + \frac{4}{15} \cos^2 x \sin x + \frac{8}{15} \sin x + C.$$

$$\text{法二: 原式} = \int (1 - \sin^2 x)^2 d \sin x = \sin x - \frac{2}{3} \sin^3 x + \frac{1}{5} \sin^5 x + C.$$

(2) 法一: 因为 $\int \sin^n x dx = -\frac{1}{n} \sin^{n-1} x \cos x + \frac{n-1}{n} \int \sin^{n-2} x dx + C (\forall n \geq 2)$, 所以

$$\begin{aligned} \text{原式} &= -\frac{1}{6} \sin^5 x \cos x + \frac{5}{6} \int \sin^4 x dx = -\frac{1}{6} \sin^5 x \cos x + \frac{5}{6} \left(-\frac{1}{4} \sin^3 x \cos x + \frac{3}{4} \int \sin^2 x dx \right) \\ &= -\frac{1}{6} \sin^5 x \cos x - \frac{5}{24} \sin^3 x \cos x - \frac{15}{48} \sin x \cos x + \frac{15}{48} x + C. \end{aligned}$$

法二: 用降幂公式再展开, 逐项积分,

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int \left(\frac{1 - \cos 2x}{2} \right)^3 dx = \frac{1}{8} \int (1 - 3 \cos 2x + 3 \cos^2 2x - \cos^3 2x) dx \\ &= \frac{x}{8} - \frac{3}{16} \sin 2x + \frac{3}{8} \int \frac{1 + \cos 4x}{2} dx - \frac{1}{8} \int (1 - \sin^2 2x) \cos 2x dx \\ &= \frac{x}{8} - \frac{3}{16} \sin 2x + \frac{3x}{16} + \frac{3}{64} \sin 4x - \frac{1}{16} \int (1 - \sin^2 2x) d(\sin 2x) \\ &= \frac{5x}{16} - \frac{3}{16} \sin 2x + \frac{3}{64} \sin 4x - \frac{1}{16} \sin 2x + \frac{1}{48} \sin^3 2x + C \\ &= \frac{5x}{16} - \frac{1}{4} \sin 2x + \frac{3}{64} \sin 4x + \frac{1}{48} \sin^3 2x + C. \end{aligned}$$

(3) 原式 $= \int \frac{dx}{\sin^3 x} = - \int \frac{1}{\sin x} d(\cot x) = -\frac{\cot x}{\sin x} - \int \cot x \frac{\cos x}{\sin^2 x} dx = -\frac{\cos x}{\sin^2 x} - \int \frac{1 - \sin^2 x}{\sin^3 x} dx$
 $= -\frac{\cos x}{\sin^2 x} - \int \frac{dx}{\sin^3 x} + \ln \left| \tan \frac{x}{2} \right|$, 于是 $\int \frac{dx}{\sin^3 x} = -\frac{\cos x}{2 \sin^2 x} + \frac{1}{2} \ln \left| \tan \frac{x}{2} \right| + C.$

(4) 原式 $= \int \frac{d(x + \frac{\pi}{2})}{\sin^3(x + \frac{\pi}{2})} = -\frac{\cos(x + \frac{\pi}{2})}{2 \sin^2(x + \frac{\pi}{2})} + \frac{1}{2} \ln \left| \tan \frac{x + \frac{\pi}{2}}{2} \right| + C = \frac{\sin x}{2 \cos^2 x} + \frac{1}{2} \ln \left| \tan \left(\frac{x}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right| + C.$

(5) 法一: 因为 $\int \tan^n x dx = \frac{1}{n-1} \tan^{n-1} x - \int \tan^{n-2} x dx + C (\forall n \geq 2)$, 所以

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \frac{1}{4} \tan^4 x - \int \tan^3 x dx = \frac{1}{4} \tan^4 x - \left(\frac{1}{2} \tan^2 x - \int \tan x dx \right) \\ &= \frac{1}{4} \tan^4 x - \frac{1}{2} \tan^2 x - \ln |\cos x| + C. \end{aligned}$$

法二: 注意到 $1 + \tan^2 x = \sec^2 x$, 所以

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int \tan x (\sec^2 x - 1)^2 dx = (\sec^4 x \tan x dx - 2) \sec^2 x \tan x dx + \int \tan x dx \\ &= \int \sec^3 x d(\sec x) - 2 \int \sec x d(\sec x) - \int \frac{d(\cos x)}{\cos x} = \frac{1}{4} \sec^4 x - \sec^2 x - \ln |\cos x| + C. \end{aligned}$$

(6) 法一: 因为 $\int \cot^n x dx = -\frac{1}{n-1} \cot^{n-1} x - \int \cot^{n-2} x dx + C (\forall n \geq 2)$, 所以

$$\begin{aligned} \text{原式} &= -\frac{1}{5} \cot^5 x - \int \cot^4 x dx = -\frac{1}{5} \cot^5 x - \left(-\frac{1}{3} \cot^3 x - \int \cot^2 x dx \right) \\ &= -\frac{1}{5} \cot^5 x + \frac{1}{3} \cot^3 x - \cot x - x + C. \end{aligned}$$

法二：注意到 $1 + \cot^2 x = \csc^2 x$, 所以

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int \cot^2 x (\csc^2 x - 1)^2 dx = \int \cot^2 x \csc^4 x dx - 2 \int \cot^2 x \csc^2 x dx + \int \cot^2 x dx \\ &= - \int \cot^2 x (1 + \cot^2 x) d(\cot x) + 2 \int \cot^2 x d(\cot x) + \int (\csc^2 x - 1) dx \\ &= -\frac{1}{3} \cot^3 x - \frac{1}{5} \cot^5 x + \frac{2}{3} \cot^3 x - \cot x - x + C = -\frac{1}{5} \cot^5 x + \frac{1}{3} \cot^3 x - \cot x - x + C. \end{aligned}$$

三角函数换元及万能公式 形如 $\int R(\sin x, \cos x) dx$ (R 为有理函数) 的积分在一般情形下可利用代换 $\tan \frac{x}{2} = t$ 化为有理函数的积分, 即

$$\int R(\sin x, \cos x) dx = \int R\left(\frac{2t}{1+t^2}, \frac{1-t^2}{1+t^2}\right) \frac{2dt}{1+t^2}.$$

(1) 若等式

$$R(-\sin x, \cos x) \equiv -R(\sin x, \cos x) \text{ 或 } R(\sin x, -\cos x) \equiv -R(\sin x, \cos x)$$

成立, 则最好利用相应的代换 $\cos x = t$ 或 $\sin x = t$.

(2) 若等式

$$R(-\sin x, -\cos x) \equiv R(\sin x, \cos x)$$

成立, 则最好利用代换 $\tan x = t$.

定理 3.1.1. $\int \sin^p x \cos^q x dx = \begin{cases} \sum_{k=0}^{\frac{q-1}{2}} (-1)^k C_n^k \frac{\sin^{p+2k+1} x}{p+2k+1} + C, & p, q \text{ 为正奇数} \\ \sum_{k=0}^{-\frac{p+q}{2}-1} C_{-\frac{p+q}{2}-1}^k \frac{\tan^{p+2k+1} x}{p+2k+1} + C, & p+q \text{ 为负偶数.} \end{cases}$

定理 3.1.2 (高阶幂展开式). 正弦函数与余项函数的高阶幂展开式如下:

$$\begin{aligned} \cos^n x &= \begin{cases} \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{k=0}^{\frac{n-1}{2}} C_n^k \sin((n-2k)x), & n \text{ 是奇数} \\ \frac{1}{2^{n-1}} \left[\sum_{k=0}^{\frac{n-1}{2}-1} C_n^k \sin((n-2k)x) + \frac{1}{2} C_n^{\frac{n}{2}} \right], & n \text{ 是偶数.} \end{cases} \\ \sin^n x &= \begin{cases} \frac{1}{(2i)^{n-1}} \sum_{k=0}^{\frac{n-1}{2}} (-1)^k C_n^k \cos((n-2k)x), & n \text{ 是奇数} \\ \frac{2}{(2i)^n} \left[\sum_{k=0}^{\frac{n-1}{2}} (-1)^k C_n^k \cos((n-2k)x) + \frac{(-1)^{\frac{n}{2}}}{2} C_n^{\frac{n}{2}} \right], & n \text{ 是偶数.} \end{cases} \end{aligned}$$

例 3.1.14. 求下列不定积分

$$\begin{array}{l|l|l} (1) \int \frac{dx}{3 \sin x - 4 \cos x}. & (2) \int \frac{\sin x + \cos x}{\sqrt[3]{\sin x - \cos x}} dx. & (3) \int \frac{dx}{2 \sin x - \cos x + 5}. \\ (4) \int \frac{\cos x dx}{\sin x (\sin x + \cos x)}. & (5) \int \frac{\sin x \cos x}{\sin x + \cos x} dx. & (6) \int \frac{\sin^2 x}{\sin x + 2 \cos x} dx. \end{array}$$

(1) 运用万能代换公式转为多项式函数.

$$\begin{aligned} I &\stackrel{t=\tan \frac{x}{2}}{=} \int \frac{\frac{2dt}{1+t^2}}{\frac{6t}{1+t^2} - \frac{4(1-t^2)}{1+t^2}} = \int \frac{dt}{2t^2+3t-2} = \int \frac{dt}{(t+2)(2t-1)} \\ &= -\frac{1}{5} \int \frac{dt}{t+2} + \frac{2}{5} \int \frac{dt}{2t-1} = -\frac{1}{5} \ln|t+2| + \frac{1}{5} \ln|2t-1| + C = \frac{1}{5} \ln \left| \frac{2\tan x/2 - 1}{\tan x/2 + 2} \right| + C. \end{aligned}$$

$$(2) \int \frac{\sin x + \cos x}{\sqrt[3]{\sin x - \cos x}} dx = \int \frac{d(\sin x - \cos x)}{\sqrt[3]{\sin x - \cos x}} = \frac{3}{2} (\sin x - \cos x)^{\frac{2}{3}} + C.$$

(3) 运用万能代换公式转为多项式函数.

$$\begin{aligned} I &\stackrel{t=\tan \frac{x}{2}}{=} \int \frac{\frac{2dt}{1+t^2}}{\frac{4t}{1+t^2} - \frac{1-t^2}{1+t^2} + 5} = \int \frac{dt}{3t^2+2t+2} = \frac{1}{3} \int \frac{dt}{\left(t+\frac{1}{3}\right)^2 + \frac{5}{9}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{5}} \arctan \frac{3t+1}{\sqrt{5}} + C = \frac{1}{\sqrt{5}} \arctan \frac{3\tan x/2 + 1}{\sqrt{5}} + C. \end{aligned}$$

(4) 运用万能代换公式转为多项式函数.

$$\begin{aligned} I &\stackrel{t=\tan \frac{x}{2}}{=} \int \frac{\frac{1-t^2}{1+t^2} \cdot \frac{2dt}{1+t^2}}{\frac{2t}{1+t^2} \left(\frac{2t}{1+t^2} + \frac{1-t^2}{1+t^2} \right)} = \int \frac{t^2-1}{t^3-2t^2-t} dt = \int \frac{t^2-1}{t(t+\sqrt{2}-1)(t-\sqrt{2}-1)} dt \\ &= \int \left(\frac{-\sqrt{2}/2}{t+\sqrt{2}-1} + \frac{\sqrt{2}/2}{t-\sqrt{2}-1} + \frac{1}{t} \right) dt = \frac{1}{\sqrt{2}} \ln \left| \frac{t-\sqrt{2}-1}{t+\sqrt{2}-1} \right| + \ln|t| + C \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \ln \left| \frac{\tan x/2 - \sqrt{2} - 1}{\tan x/2 + \sqrt{2} - 1} \right| + \ln \left| \tan \frac{x}{2} \right| + C. \end{aligned}$$

(5) 法一: 运用万能代换公式转为多项式函数, 再用奥斯特罗格拉德斯基法将其分解.

$$\begin{aligned} I &\stackrel{t=\tan \frac{x}{2}}{=} \int \frac{4(t^3-t)}{(1+t^2)^2(t^2-2t-1)} dt \stackrel{\text{Ost}}{=} \frac{At+B}{1+t^2} + \int \left(\frac{Dt+E}{t^2-2t-1} + \frac{Ft+G}{1+t^2} \right) dt \\ &\quad \left[\frac{At+B}{1+t^2} + \int \left(\frac{Dt+E}{t^2-2t-1} + \frac{Ft+G}{1+t^2} \right) dt \right]' = \frac{-At^2-2Bt+A}{(t^2+1)^2} + \frac{Dt+E}{t^2-2t-1} + \frac{Ft+G}{t^2+1} \\ &= \frac{4(t^3-1)}{(1+t^2)^2(t^2-2t-1)} \Rightarrow (A, B, D, E, F, G) = (1, -1, 0, 0, 0, 1) \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned} I &= \frac{t-1}{t^2+1} + \int \frac{dt}{t^2-2t-1} = \frac{t-1}{t^2+1} + \int \frac{dt}{(t-1)^2-2} \\ &= \frac{t-1}{t^2+1} + \frac{1}{2\sqrt{2}} \ln \left| \frac{t-1-\sqrt{2}}{t-1+\sqrt{2}} \right| + C = \frac{\tan x/2}{\tan^2 x/2+1} + \frac{1}{2\sqrt{2}} \ln \left| \frac{\tan x/2-1-\sqrt{2}}{\tan x/2-1+\sqrt{2}} \right| + C. \end{aligned}$$

法二:

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int \frac{\sin^2 \left(x + \frac{\pi}{4} \right) - \frac{1}{2}}{\sqrt{2} \sin \left(x + \frac{\pi}{4} \right)} dx = \frac{1}{\sqrt{2}} \int \sin \left(x + \frac{\pi}{4} \right) dx - \frac{1}{2\sqrt{2}} \int \frac{dx}{\sin \left(x + \frac{\pi}{4} \right)} \\ &= -\frac{1}{\sqrt{2}} \cos \left(x + \frac{\pi}{4} \right) - \frac{1}{2\sqrt{2}} \ln \left| \tan \left(\frac{x}{2} + \frac{\pi}{8} \right) \right| + C. \end{aligned}$$

(6) 令 $\tan \frac{x}{2} = t$, 得

$$\text{原式} = 4 \int \frac{t^2 dt}{(1+t^2)^2(1+t-t^2)} = \frac{4}{5} \int \left[\frac{1}{1+t^2} + \frac{t-2}{(1+t^2)^2} + \frac{1}{1+t-t^2} \right] dt$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{4}{5} \int \frac{dt}{1+t^2} - \frac{8}{5} \int \frac{dt}{(1+t^2)^2} + \frac{2}{5} \int \frac{2tdt}{(1+t^1)^2} + \frac{4}{5} \int \frac{d\left(t-\frac{1}{2}\right)}{\frac{5}{4}-\left(t-\frac{1}{2}\right)^2} \\
&= \frac{4}{5} \arctan t - \frac{8}{5} \left[\frac{t}{2(1+t^2)} + \frac{1}{2} \arctan t \right] - \frac{2}{5} \cdot \frac{1}{1+t^2} + \frac{4}{5\sqrt{5}} \ln \left| \frac{\frac{\sqrt{5}}{2} + \left(t-\frac{1}{2}\right)}{\frac{\sqrt{5}}{2} - \left(t-\frac{1}{2}\right)} \right| + C \\
&= -\frac{2}{5} \cdot \frac{1+2t}{1+t^2} + \frac{4}{5\sqrt{5}} \ln \left| \frac{\frac{2}{\sqrt{5}+1} + t}{\frac{2}{\sqrt{5}+1} - t} \right| + C = -\frac{1}{5} (\cos x + 2 \sin x) + \frac{4}{5\sqrt{5}} \ln \left| \tan \left(\frac{x}{2} + \frac{\arctan 2}{2} \right) \right| + C.
\end{aligned}$$

例 3.1.15. 求下列不定积分

$$\begin{array}{lll}
(1) \int \frac{dx}{\sin^4 x + \cos^4 x}. & (2) \int \frac{\sin x \cos x}{1 + \sin^4 x} dx. & (3) \int \frac{\sin^2 x - \cos^2 x}{\sin^4 x + \cos^4 x} dx. \\
(4) \int \frac{\sin x dx}{\sin^3 x + \cos^3 x}. & (5) \int \frac{\tan^{\frac{1}{3}} x dx}{(\sin x + \cos x)^2}. & (6) \int \frac{\cos^2 x dx}{\csc^2 x + \cot^4 x}.
\end{array}$$

$$(1) \text{ 原式} = \int \frac{2dx}{2 - \sin^2 2x} = \int \frac{d(\tan 2x)}{2 \sec^2 2x - \tan^2 2x} = \int \frac{d(\tan 2x)}{2 + \tan^2 2x} = \frac{1}{\sqrt{2}} \arctan \frac{\tan 2x}{\sqrt{2}} + C.$$

$$(2) \text{ 原式} = \int \frac{\tan x \sec^2 x}{\sec^4 x + \tan^4 x} dx = \frac{1}{2} \int \frac{d(\tan^2 x)}{2 \tan^4 x + 2 \tan^2 x + 1} = \frac{1}{2} \arctan(1 + 2 \tan^2 x) + C.$$

$$(3) \text{ 原式} = \int \frac{-\cos 2x}{1 - \frac{1}{2} \sin^2 2x} dx = \frac{-1}{2\sqrt{2}} \int \left(\frac{2 \cos 2x}{\sqrt{2} - \sin 2x} + \frac{2 \cos 2x}{\sqrt{2} + \sin 2x} \right) dx = \frac{\sqrt{2}}{4} \ln \frac{\sqrt{2} - \sin 2x}{\sqrt{2} + \sin 2x} + C.$$

(4) 法一：因为 $\sin x = \tan x \cdot \cos x$, 所以

$$\begin{aligned}
\text{原式} &= \int \frac{\tan x}{\cos^2 x (\tan^3 x + 1)} dx \stackrel{t=\tan x}{=} \int \frac{tdt}{t^3 + 1} = \int \frac{tdt}{(t+1)(t^2 - t + 1)} \\
&= \frac{1}{3} \int \frac{t+1}{t^2 - t + 1} dt - \frac{1}{3} \int \frac{dt}{t+1} = \frac{1}{6} \int \frac{d(t^2 - t + 1)}{t^2 - t + 1} + \frac{1}{2} \int \frac{dt}{\left(t - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}} - \frac{1}{3} \int \frac{dt}{1+t} \\
&= \frac{1}{6} \ln(t^2 - t + 1) + \frac{1}{\sqrt{3}} \arctan \frac{2t-1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{3} \ln |t+1| + C \\
&= \frac{1}{6} \ln(\tan^2 x - \tan x + 1) + \frac{1}{\sqrt{3}} \arctan \frac{2 \tan x - 1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{3} \ln |\tan x + 1| + C.
\end{aligned}$$

法二：因为 $a^3 + b^3 = (a+b)(a^2 + b^2 - ab)$, 所以

$$\begin{aligned}
\text{原式} &= \int \frac{\sin x dx}{(\sin x + \cos x)(1 - \sin x \cos x)} = \frac{1}{2} \int \frac{(\sin x - \cos x) dx}{(\sin x + \cos x)(1 - \sin x \cos x)} + \frac{1}{2} \int \frac{dx}{1 - \sin x \cos x} \\
&= \frac{1}{3} \int \frac{-(\cos x - \sin x) dx}{\sin x + \cos x} + \frac{1}{6} \int \frac{\sin^2 x - \cos^2 x}{1 - \sin x \cos x} dx + \frac{1}{2} \int \frac{dx}{1 - \sin x \cos x} \\
&= -\frac{1}{3} \int \frac{d(\sin x + \cos x)}{\sin x + \cos x} + \frac{1}{6} \int \frac{d(1 - \sin x \cos x)}{1 - \sin x \cos x} - \frac{1}{2} \int \frac{d(\cot x)}{\left(\cot x - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}} \\
&= -\frac{1}{6} \ln \frac{(\sin x + \cos x)^2}{1 - \sin x \cos x} - \frac{1}{\sqrt{3}} \arctan \left(\frac{2 \cos x - \sin x}{\sqrt{3} \sin x} \right) + C.
\end{aligned}$$

(5) 注意到 $(\tan x)' = \sec^2 x$, 则有

$$\begin{aligned}
\text{原式} &= \int \frac{\tan^{\frac{1}{3}} x \cdot \sec^2 x}{(\tan x + 1)^2} dx \stackrel{\tan x=t}{=} \int \frac{t^{\frac{1}{3}}}{(t+1)^2} dt \stackrel{t=z^3}{=} 3 \int \frac{z^3}{(z^3+1)^2} dz \\
&= \frac{1}{3} \int \frac{3-z}{z^2 - z + 1} dz + \int \frac{z-1}{(z^2 - z + 1)^2} dz + \frac{1}{3} \int \frac{dz}{z+1} - \frac{1}{3} \int \frac{dz}{(z+1)^2}
\end{aligned}$$

其中

$$\int \frac{dz}{z+1} = \ln|z+1| + C, \quad \int \frac{dz}{(z+1)^2} = -\frac{1}{z+1} + C$$

$$\begin{aligned}\int \frac{3-z}{z^2-z+1} dz &= -\frac{1}{2} \int \frac{d(z^2-z+1)}{z^2-z+1} + \frac{5}{2} \int \frac{d\left(z-\frac{1}{2}\right)}{\left(z-\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} \\ &= -\frac{1}{2} \ln(z^2-z+1) + \frac{5}{\sqrt{3}} \arctan \frac{2z-1}{\sqrt{3}} + C\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\int \frac{z-1}{(z^2-z+1)^2} dz &= \int \frac{z-1}{\left[\left(z-\frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}\right]} dz \xrightarrow{z-\frac{1}{2}=u} \int \frac{u-\frac{1}{2}}{\left(u^2+\frac{3}{4}\right)^2} du = \underbrace{\frac{1}{2} \int \frac{2u}{\left(u^2+\frac{3}{4}\right)} du}_{u^2+\frac{3}{4}=v} - \underbrace{\frac{1}{2} \int \frac{du}{\left(u^2+\frac{3}{4}\right)}}_{u=\frac{\sqrt{3}}{2}\tan\theta} \\ &= \frac{1}{2} \int \frac{dv}{v^2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{8\sqrt{3}}{9} \int \cos^2 \theta d\theta = -\frac{z+1}{3(z^2-z+1)} - \frac{2}{3\sqrt{3}} \arctan \frac{2z-1}{\sqrt{3}} + C\end{aligned}$$

综上,

$$\text{原式} = \frac{1}{\sqrt{3}} \arctan \left(\frac{2\tan^{\frac{1}{3}}x - 1}{\sqrt{3}} \right) - \frac{1}{6} \ln \left(\tan^{\frac{2}{3}}x - \tan^{\frac{1}{3}}x + 1 \right) + \frac{1}{3} \ln \left(\tan^{\frac{1}{3}}x + 1 \right) - \frac{\cos x \tan^{\frac{1}{3}}x}{\sin x + \cos x} + C.$$

(6) 分子分母同时乘以 $\sec^4 x \tan^4 x$, 有

$$\begin{aligned}\text{原式} &= \int \frac{\sec^2 x \tan^4 x dx}{\sec^6 x \tan^2 x + \sec^4 x} = \int \frac{\sec^2 x \tan^4 x dx}{(1+\tan^2 x)^2(1+\tan^2 x + \tan^4 x)} \\ &\xrightarrow{\tan x=t} \int \frac{t^4 dt}{(1+t^2)^2(t^2+t+1)(t^2-t+1)} \xrightarrow{\text{Ost'}} \frac{at+b}{1+t^2} + \int \left(\frac{ct+d}{1+t^2} + \frac{et+f}{t^2+t+1} + \frac{gt+h}{t^2-t+1} \right) dt\end{aligned}$$

则

$$\left[\int \frac{t^4 dt}{(1+t^2)^2(t^2-t+1)(t^2+t+1)} \right]' = \left[\frac{at+b}{1+t^2} + \int \left(\frac{ct+d}{1+t^2} + \frac{et+f}{t^2+t+1} + \frac{gt+h}{t^2-t+1} \right) dt \right]'$$

通分, 并对比等式两边分子的系数, 有

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{array}{ccccccc} c & +e & +g & & = & 0 \\ -2b & +2c & +d & +e & +f & -g & +h \\ & & & +3e & +f & +3g & -h \\ & & & 2d & +2e & +3f & -2g \\ & & & -2b & +2c & +3e & +2f \\ & & & & 2d & +e & +3f \\ & & & a & -2b & +c & +d \end{array} & \Rightarrow \begin{array}{l} a = \frac{1}{2} \\ b = 0 \\ c = 0 \\ d = -\frac{1}{2} \\ e = \frac{1}{2} \\ f = 0 \\ g = -\frac{1}{2} \\ h = 0 \end{array} \end{array} \right.$$

因此,

$$\begin{aligned}\text{原式} &= \frac{t}{2(t^2+1)} + \frac{1}{2} \int \frac{tdt}{t^2-t+1} - \frac{1}{2} \int \frac{tdt}{t^2+t+1} - \frac{1}{2} \int \frac{dt}{t^2+1} \\ &= \frac{1}{2} \frac{t}{t^2+1} + \frac{1}{4} \ln \frac{t^2-t+1}{t^2+t+1} + \frac{1}{2\sqrt{3}} \left[\arctan \frac{2t+1}{\sqrt{3}} + \arctan \frac{2t-1}{\sqrt{3}} \right] - \frac{1}{2} \arctan t + C \\ &= \frac{\tan x}{2\sec^2 x} + \frac{1}{4} \ln \frac{\tan^2 x - \tan x + 1}{\tan^2 x + \tan x + 1} + \frac{1}{2\sqrt{3}} \left[\arctan \frac{2\tan x + 1}{\sqrt{3}} + \arctan \frac{2\tan x - 1}{\sqrt{3}} \right] - \frac{x}{2} + C.\end{aligned}$$

指类型

常用指数函数不定积分公式:

$$\begin{array}{ll} (1) \int e^x dx = e^x + C. & (2) \int \alpha^x dx = \frac{\alpha^x}{\ln \alpha} + C. \\ \hline (3) \int xe^{ax} dx = \frac{1}{a^2}(ax - 1)e^{ax} + C. & (4) \int x^n e^{ax} dx = \frac{1}{a} x^n e^{ax} - \frac{n}{a} \int x^{n-1} e^{ax} dx. \end{array}$$

例 3.1.16. 求下列不定积分

$$\begin{array}{l|l|l|l} (1) \int \frac{dx}{e^x + e^{-x}}. & (2) \int \frac{dx}{\sqrt{1 + e^{2x}}}. & (3) \int \frac{x e^x}{\sqrt{e^x - 1}} dx. & (4) \int \frac{e^x (1 + e^x)}{\sqrt{1 - e^{2x}}} dx. \\ (5) \int \frac{1+x}{x(1+xe^x)} dx. & (6) \int \frac{\ln(e^x + 1)}{e^x} dx. & (7) \int \frac{dx}{(1+e^x)^2}. & (8) \int \frac{1}{(1+e^{\frac{x}{4}})^2} dx. \end{array}$$

(1) 法一: 令 $e^x = t$, 那么原式 $= \int \frac{dt}{1+t^2} = \arctan e^x + C$.

法二: 原式 $= \int \frac{de^x}{1+e^{2x}} = \arctan e^x + C$.

(2) 法一: 令 $e^x = \tan t$, 那么原式 $= \int \frac{\sec t}{\tan t} dt = \int \frac{dt}{\sin t} = \int \csc t dt = -\ln |\csc x + \cot x| + C$.

法二: 原式 $\stackrel{e^x=t}{=} \int \frac{dt}{t\sqrt{1+t^2}} \stackrel{1+t^2=v^2}{=} \int \frac{dv}{v^2-1} = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{v-1}{v+1} \right| + C = \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{e^{2x}+1}-1}{\sqrt{e^{2x}+1}+1} + C$.

(3) 原式 $\stackrel{e^x=t}{=} \int \frac{\ln t dt}{\sqrt{t-1}} = 2 \int \ln t d\sqrt{t-1} = 2\sqrt{t-1} \ln t - 2 \int \frac{\sqrt{t-1}}{t} dt$,

其中 $\int \frac{\sqrt{t-1}}{t} dt \stackrel{\sqrt{t-1}=u}{=} \int \frac{2u^2}{u^2+1} du = 2u - 2 \arctan u + C = 2\sqrt{t-1} - 2 \arctan \sqrt{t-1} + C$, 综上, 原式 $= 2x\sqrt{e^x-1} - 4\sqrt{e^x-1} + 4 \arctan \sqrt{e^x-1} + C$.

(4) 法一: 指数代换, 结合三角代换.

$$\begin{aligned} \text{原式 } &\stackrel{e^x=t}{=} \int \frac{1+t}{\sqrt{1-t^2}} dt \stackrel{\frac{\sqrt{1-t^2}}{1+t}=u}{=} -4 \int \frac{du}{(u^2+1)^2} \stackrel{u=\tan v}{=} -4 \int \cos^2 v dv \\ &= -2 \int (1+\cos 2v) dv = -2v - \sin 2v + C = -2 \arctan \frac{\sqrt{1-e^{2x}}}{e^x+1} - \sqrt{1-e^{2x}} + C. \end{aligned}$$

法二: 指数代换, 结合 Euler 代换和 Ostrogradsky 法.

$$\begin{aligned} \text{原式 } &\stackrel{e^x=t}{=} \int \frac{1+t}{\sqrt{1-t^2}} dt \stackrel{\text{第二 Euler 代换}}{\stackrel{\sqrt{1-t^2}=ut+1}{=}} \int \frac{1-\frac{2u}{u^2+1}}{1-\frac{2u^2}{u^2+1}} \cdot \frac{2u^2-2}{(u^2+1)^2} du = -2 \int \frac{(u-1)^2}{(u^2+1)^2} du \\ &\stackrel{Ost'}{=} -2 \left(\frac{Au+B}{u^2+1} + \int \frac{Du+E}{u^2+1} du \right) \stackrel{(A,B,D,E)=(0,1,0,1)}{=} -2 \left(\frac{1}{u^2+1} + \int \frac{du}{u^2+1} \right) \\ &= \frac{-2}{u^2+1} - 2 \arctan u + C = \frac{e^{2x}}{e^x-1} - 2 \arctan \frac{\sqrt{1-e^{2x}}-1}{e^x} + C. \end{aligned}$$

(5) 原式 $\stackrel{xe^x=t}{=} \int \frac{dt}{t(1+t)} = \int \frac{dt}{t} - \int \frac{dt}{1+t} = \ln \left| \frac{t}{1+t} \right| + C = \ln \left| \frac{xe^x}{1+xe^x} \right| + C$.

(6) 指数代换.

$$\begin{aligned} \text{原式 } &\stackrel{e^x=t}{=} \int \frac{\ln(t+1)}{t^2} dt = - \int \ln(t+1) dt^{-1} = -\frac{\ln(t+1)}{t} + \int \frac{dt}{t(t+1)} \\ &= \ln \left| \frac{t}{t+1} \right| - \frac{\ln(t+1)}{t} + C = \ln \frac{e^x}{e^x+1} - \frac{\ln(e^x+1)}{e^x} + C. \end{aligned}$$

(7) 指数代换, 注意需要整体代换.

$$\begin{aligned} \text{原式 } & \stackrel{1+e^x=t}{=} \int \frac{dt}{t^2(t-1)} = -\int \frac{t+1}{t^2} dt + \int \frac{dt}{t-1} = -\int \frac{dt}{t} - \int \frac{dt}{t^2} + \int \frac{dt}{t-1} \\ &= \frac{1}{t} + \ln \left(1 - \frac{1}{t} \right) + C = \frac{1}{1+e^x} + \ln \frac{e^x}{1+e^x} + C. \end{aligned}$$

$$(8) \text{ 原式 } \stackrel{e^{\frac{x}{4}}=t}{=} 4 \int \frac{1+t^2}{t(1+t)^2} dt = 4 \int \left[\frac{1}{t} - \frac{2}{(1+t)^2} \right] dt = 4 \ln t + \frac{8}{1+t} + C = x + \frac{8}{1+e^{\frac{x}{4}}} + C.$$

对数型

常用对数函数不定积分公式:

$$\begin{array}{ll} (1) \int \ln x dx = x \ln x - x + C. & (2) \int \log_{\alpha} x dx = \frac{1}{\ln \alpha} (x \ln x - x) + C. \\ \hline (3) \int x^n \ln x dx = \frac{x^{n+1}}{(n+1)^2} [(n+1) \ln x - 1] + C. & (4) \int \frac{1}{x \ln x} dx = \ln(\ln x) + C. \end{array}$$

例 3.1.17. 求下列不定积分

$$\begin{array}{l|l|l} (1) \int \frac{\ln x}{(1+x^2)^{\frac{3}{2}}} dx. & (2) \int x \ln \frac{1+x}{1-x} dx. & (3) \int x \ln(4+x^4) dx. \\ (4) \int x^3 \ln^3 x dx. & (5) \int \left(\frac{\ln x}{x} \right)^3 dx. & (6) \int \ln^2 \left(x + \sqrt{1+x^2} \right) dx. \end{array}$$

$$(1) \text{ 原式} = \int \ln x d \left(\frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \right) = \frac{x \ln x}{\sqrt{1+x^2}} - \int \frac{dx}{\sqrt{1+x^2}} = \frac{x \ln x}{\sqrt{1+x^2}} - \ln \left(x + \sqrt{1+x^2} \right) + C.$$

$$(2) \text{ 原式} = \frac{1}{2} \int \ln \frac{1+x}{1-x} dx^2 = \frac{x^2}{2} \ln \frac{1+x}{1-x} - \int \frac{x^2 dx}{1-x^2} = \frac{x^2-1}{2} \ln \frac{1+x}{1-x} + x + C.$$

(3) 由分部积分法得,

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \frac{1}{2} \int \ln(4+x^4) dx^2 = \frac{x^2}{2} \ln(4+x^4) - 2 \int \frac{x^5 dx}{4+x^4} \\ &= \frac{x^2}{2} \ln(4+x^4) - 2 \int \left(x - \frac{4x}{4+x^2} \right) dx = \frac{x^2}{2} \ln(4+x^4) + 2 \arctan \left(\frac{x^2}{2} \right) - x^2 + C. \end{aligned}$$

(4) 多次利用分部积分法,

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \frac{1}{4} \int \ln^3 x d(x^4) = \frac{1}{4} x^4 \ln^3 x - \frac{3}{4} \int x^3 \ln^2 x dx = \frac{1}{4} x^4 \ln^3 x - \frac{3}{16} \int \ln^2 x d(x^4) \\ &= \frac{1}{4} x^4 \ln^3 x - \frac{3}{16} x^4 \ln^2 x + \frac{3}{8} \int x^3 \ln x dx = \frac{1}{4} x^4 \ln^3 x - \frac{3}{16} x^4 \ln^2 x + \frac{3}{32} \int \ln x d(x^4) \\ &= \frac{1}{4} x^4 \ln^3 x - \frac{3}{16} x^4 \ln^2 x + \frac{3}{32} x^4 \ln x - \frac{3}{32} \int x^3 dx \\ &= \frac{1}{4} x^4 \left(\ln^3 x - \frac{3}{4} \ln^2 x + \frac{3}{8} \ln x - \frac{3}{32} \right) + C. \end{aligned}$$

(5) 同样的, 多次利用分部积分法,

$$\begin{aligned} \text{原式} &= -\frac{1}{2} \int \ln^3 x d \left(\frac{1}{x^2} \right) = -\frac{1}{2x^2} \ln^3 x + \frac{3}{2} \int \frac{\ln^2 x}{x^3} dx = -\frac{1}{2x^2} \ln^3 x - \frac{3}{4} \int \ln 2x d \left(\frac{1}{x^2} \right) \\ &= -\frac{1}{2x^2} \ln^3 x - \frac{3}{4x^2} \ln^2 x + \frac{3}{2} \int \frac{\ln x}{x^3} dx = -\frac{1}{2x^2} \ln^3 x - \frac{3}{4x^2} \ln^2 x - \frac{3}{4} \int \ln x d \left(\frac{1}{x^2} \right) \\ &= -\frac{1}{2x^2} \ln^3 x - \frac{3}{4x^2} \ln^2 x - \frac{3}{4x^2} \ln x + \frac{3}{4} \int \frac{dx}{x^3} = -\frac{1}{2x^2} \left(\ln^3 x + \frac{3}{2} \ln^2 x + \frac{3}{2} \ln x + \frac{3}{4} \right) + C. \end{aligned}$$

(6) 利用分部积分法, 得

$$\begin{aligned} \text{原式} &= x \ln^2(x + \sqrt{1+x^2}) - 2 \int \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \ln(x + \sqrt{1+x^2}) dx \\ &= x \ln^2(x + \sqrt{1+x^2}) - 2 \int \ln(x + \sqrt{1+x^2}) d(\sqrt{1+x^2}) \\ &= x \ln^2(x + \sqrt{1+x^2}) - 2\sqrt{1+x^2} \ln(x + \sqrt{1+x^2}) + 2x + C. \end{aligned}$$

3.1.2 隐函数类型

例 3.1.18. 设 $y = y(x)$ 是方程 $y^2(x-y) = x^2$ 所确定的隐函数, 求 $\int \frac{dx}{y^2}$.

设齐次变换 $y = tx$ 由 $y^2(x-y) = x^2$ 可得 $x = \frac{1}{t^2(1-t)}$, $y = \frac{1}{t(1-t)}$, $dx = \frac{3t-2}{t^2(1-t)^2} dt$ 于是

$$I = \int \frac{dx}{y^2} = \int t^2(1-t)^2 \cdot \frac{(3t-2)}{t^3(1-t)^2} dt = \int \frac{3t-2}{t} dt = 3t - 2 \ln|t| + C = \frac{3y}{x} - 2 \ln\left|\frac{y}{x}\right| + C.$$

3.1.3 复合类型

表格积分法

求解不定积分时, 需要多次使用分部积分时的简化运算方法. 亦可认为是分部积分法的推广公式.

设 $g_{(k+1)}$ 表示 $g_{(k)}$ ($k = 0, 1, 2, \dots, g_{(0)} = g$) 积分后得到的某一个函数表达式, 则

$$\int f g dx = \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k f^{(k)} g_{(k+1)} + (-1)^n \int f^{(n)} g_{(n)} dx$$

表格积分法常用来处理 $\int P(x)g(x)dx$ 类型的积分 (其中 $P(x)$ 表示多项式函数), 也可以得出递推表达式, 具体求解过程看以下例题.

例 3.1.19. 求不定积分 $\int (x^3 + 2x + 3)e^x dx$.

由表格积分法得以下表格:

f'	$x^3 + 2x + 3$	$3x^2 + 2$	$6x$	6	0
	$+ \searrow$	$- \searrow$	$+ \searrow$	$- \searrow$	
\int	e^x	e^x	e^x	e^x	e^x

故原式 $= (x^3 + 2x + 3)e^x - (3x^2 + 2)e^x + 6xe^x - 6e^x + C = (x^3 - 3x^2 + 8x - 5)e^x + C$.

例 3.1.20. 证明: 若 $P(x)$ 为 n 次多项式, 则 $\int P(x)e^{ax} dx = e^{ax} \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{P^{(k)}(x)}{a^{k+1}} + C$.

证 由表格积分法:

f'	$P(x)$	$P'(x)$	$P''(x)$	\dots	$P^{(n)}(x)$	$P^{(n+1)}(x) = 0$
	$+ \searrow$	$- \searrow$	$+ \searrow$	\dots	$(-1)^n \searrow$	
\int	e^{ax}	$\frac{1}{a}e^{ax}$	$\frac{1}{a^2}e^{ax}$	\dots	$\frac{1}{a^n}e^{ax}$	$\frac{1}{a^{n+1}}e^{ax}$

故, 原式 = $e^{ax} \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{P^{(k)}(x)}{a^{k+1}} + C$.

例 3.1.21. 求不定积分 $\int e^x \sin x dx$.

由表格积分法:

$$\begin{array}{c|ccc} f' & e^x & e^x & e^x \\ \hline & + \searrow & - \searrow & | \\ \int & \sin x & -\cos x & -\sin x \end{array} \quad \text{故 } \int e^x \sin x dx = -e^x \cos x + e^x \sin x - \int e^x \sin x dx \\ \Rightarrow \text{原式} = \frac{e^x}{2} (\sin x - \cos x).$$

推论 3.1.1. 重要结论:

$$\int e^{ax} \sin bx dx = \frac{\begin{vmatrix} (e^{ax})' & (\sin bx)' \\ e^{ax} & \sin bx \end{vmatrix}}{a^2 + b^2} + C, \quad \int e^{ax} \cos bx dx = \frac{\begin{vmatrix} (e^{ax})' & (\cos bx)' \\ e^{ax} & \cos bx \end{vmatrix}}{a^2 + b^2} + C.$$

例 3.1.22. 求不定积分 $\int \frac{\sin(\ln x)}{x^2} dx$.

令 $\ln x = t$, 则原式化为 $\int e^{-t} \sin t dt = -\frac{1}{2}(e^{-t} \sin t + e^t \cos t) + C = -\frac{\sin \ln x + \cos \ln x}{2x} + C$.

多初等函数复合型

组合积分法

例 3.1.23. 求不定积分 $I = \int \frac{\cos x}{3 \sin x + 2 \cos x} dx$.

记 $J = \int \frac{\sin x}{3 \sin x + 2 \cos x} dx$, 于是

$$\begin{cases} 2I + 3J = \int dx = x + C \\ 3I - 2J = \int \frac{3 \cos x - 2 \sin x}{3 \sin x + 2 \cos x} dx = \ln |3 \sin x + 2 \cos x| + C \\ \Rightarrow I = \frac{3 \ln(3 \sin(x) + 2 \cos(x))}{13} + \frac{2x}{13} + C. \end{cases}$$

例 3.1.24. 求不定积分 $\int x e^x \sin x dx$.

法一: 由表格积分法:

$$\begin{array}{c|ccc} f' & x & 1 & 0 \\ \hline & + \searrow & - \searrow & \\ \int & e^x \sin x & \frac{e^x}{2} (\sin x - \cos x) & -\frac{e^x}{2} \cos x \end{array}$$

故原式 = $\frac{x e^x}{2} (\sin x - \cos x) + \frac{e^x}{2} \cos x + C$.

法二: 由分部积分法得,

$$I = \int x e^x \sin x dx = \int x \sin x d e^x = x e^x \sin x - \int e^x d(x \sin x)$$

$$\begin{aligned}
&= xe^x \sin x - \int (\sin x + x \cos x) de^x = xe^x \sin x - \int x \cos x de^x - \int e^x \sin x dx \\
&= xe^x (\sin x - \cos x) + \int e^x (\cos x - \sin x) dx - I \\
&\Rightarrow \frac{xe^x}{2} (\sin x - \cos x) + \frac{1}{2} \int e^x (\cos x - \sin x) dx = \frac{xe^x}{2} (\sin x - \cos x) + \frac{e^x}{2} \cos x + C.
\end{aligned}$$

法三：由 $\int e^x \sin x dx = \frac{e^x}{2} (\sin x - \cos x) + C$, 所以

$$\text{原式} = \int x d \left(\frac{e^x}{2} (\sin x - \cos x) \right) = \frac{xe^x}{2} (\sin x - \cos x) - \int \frac{e^x}{2} (\sin x - \cos x) dx = \frac{xe^x}{2} (\sin x - \cos x) + \frac{e^x}{2} \cos x + C.$$

法四：令 $I = \int xe^x \sin x dx$, $J = \int xe^x \cos x dx$, 则有

$$(xe^x \sin x)' = e^x \sin x + xe^x \sin x + xe^x \cos x$$

$$(xe^x \cos x)' = e^x \cos x + xe^x \cos x - xe^x \sin x$$

两边积分, 得

$$I + J = xe^x \sin x - \int e^x \sin x dx$$

$$-I + J = xe^x \cos x - \int e^x \cos x dx$$

两式相减, 得

$$\begin{aligned}
I &= \frac{1}{2} xe^x (\sin x - \cos x) - \frac{1}{2} \int e^x \sin x dx + \frac{1}{2} \int e^x \cos x dx = \frac{1}{2} xe^x (\sin x - \cos x) - \frac{1}{2} \int e^x (\sin x - \cos x) dx \\
&= \frac{xe^x}{2} (\sin x - \cos x) + \frac{e^x}{2} \cos x + C.
\end{aligned}$$

法五：由 $e^x \sin x = \operatorname{Im}(e^{(1+i)x})$,

$$\begin{aligned}
\text{原式} &= \int x \operatorname{Im}(e^{(1+i)x}) dx = \operatorname{Im} \left(\int xe^{(1+i)x} dx \right) = \operatorname{Im} \left(\int x d \left(\frac{e^{(1+i)x}}{1+i} \right) \right) \\
&= \operatorname{Im} \left(\frac{xe^{(1+i)x}}{1+i} - \int \frac{e^{(1+i)x}}{1+i} dx \right) = \operatorname{Im} \left(\frac{xe^{(1+i)x}}{1+i} - \frac{e^{(1+i)x}}{(1+i)^2} \right) + C \\
&= \operatorname{Im} \left(\left(\frac{x}{2} - i \left(\frac{x}{2} - \frac{1}{2} \right) \right) e^x (\cos x + i \sin x) \right) + C \\
&= \frac{xe^x}{2} (\sin x - \cos x) + \frac{e^x}{2} \cos x + C.
\end{aligned}$$

例 3.1.25. 计算不定积分 $\int \frac{x \arctan x}{\sqrt{1-x^2}} dx$.

令 $x = \sin t$, 则

$$\begin{aligned}
I &= \int \frac{\sqrt{1-x^2}}{1+x^2} dx = \int \frac{\cos^2 t}{1+\sin^2 t} dt = \int \frac{\sec^2 t}{\sec^4 t + \tan^2 t \sec^2 t} dt \\
&= \int \frac{\sec^2 t}{2\tan^4 t + 3\tan^2 t + 1} dt \stackrel{\tan t = u}{=} \int \frac{du}{2u^4 + 3u^2 + 1} = \int \left(\frac{2}{2u^2+1} - \frac{1}{u^2+1} \right) du \\
&= \sqrt{2} \arctan(\sqrt{2}u) - \arctan u + C = \sqrt{2} \arctan \left(\frac{\sqrt{2}x}{\sqrt{1-x^2}} \right) - \arcsin x + C.
\end{aligned}$$

例 3.1.26 (2023 合肥工业大学). 计算不定积分 $I = \int \frac{x \ln(x + \sqrt{1+x^2})}{(1-x^2)^2} dx$.

注意到 $\frac{d}{dx} \frac{1}{1-x^2} = \frac{2x}{(1-x^2)^2}$, 所以原积分有

$$I = \frac{1}{2} \int \ln(x + \sqrt{1+x^2}) d \frac{1}{1-x^2} = \frac{1}{2} \left[\frac{\ln(x + \sqrt{1+x^2})}{1-x^2} - \int \frac{dx}{\sqrt{1+x^2}(1-x^2)} \right]$$

现计算 $J = \int \frac{dx}{\sqrt{1+x^2}(1-x^2)}$, 运用三角代换 $1+\tan^2 x = \sec^2 x$, 有

$$\begin{aligned} J &= \int \frac{\sec t dt}{1-\tan^2 t} = \int \frac{\csc t \cot t}{\cot^2 t - 1} dt = \int \frac{\csc t \cot t}{\csc^2 t - 2} dt \stackrel{\csc t=s}{=} \int \frac{ds}{2-s^2} \\ &= \frac{1}{2} \int \frac{ds}{1-\left(\frac{s}{\sqrt{2}}\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \arctan \frac{s}{\sqrt{2}} + C = \frac{1}{\sqrt{2}} \arctan \frac{\csc t}{\sqrt{2}} + C = \frac{1}{\sqrt{2}} \arctan \frac{\sqrt{1+x^2}}{\sqrt{2}x} + C \end{aligned}$$

故原式等于 $\frac{\ln(x+\sqrt{1+x^2})}{2(1-x^2)} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \arctan \frac{\sqrt{1+x^2}}{\sqrt{2}x} + C$.

例 3.1.27 (第四届数学竞赛决赛). 求 $\int x \arctan x \ln(1+x^2) dx$.

令 $x \ln(1+x^2) dx = dt$, 则

$$\begin{aligned} t &= \int x \ln(1+x^2) dx = \frac{1}{2} \int \ln(1+x^2) d(1+x^2) = \frac{1}{2} \left[(1+x^2) \ln(1+x^2) - \int 2x dx \right] \\ &= \frac{1}{2} [(1+x^2) \ln(1+x^2) - x^2] + C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \frac{1}{2} \int \arctan x d[(1+x^2) \ln(1+x^2) - x^2] \\ &= \frac{1}{2} \arctan x [(1+x^2) \ln(1+x^2) - x^2] - \frac{1}{2} [x \ln(1+x^2) - 3x + 3 \arctan x] + C \\ &= \frac{1}{2} [(1+x^2) \ln(1+x^2) - x^2 - 3] \arctan x - \frac{1}{2} [x \ln(1+x^2) - 3x] + C \end{aligned}$$

形式待定法

(1) 对于 $\int \frac{f(x)}{g^2(x)} dx$ 型, 存在 $h(x)$, 使得

$$\int \frac{f(x)}{g^2(x)} dx = \frac{h(x)}{g(x)} + C$$

其中 $f(x) = h'(x)g(x) - h(x)g'(x)$, $h(x)$ 要通过具体的等式结构另求出.

(2) 对于 $\int f(x)e^{g(x)} dx$ 型, 存在 $h(x)$, 使得

$$\int f(x)e^{g(x)} dx = h(x)e^{g(x)} + C$$

其中 $f(x) = h'(x) + h(x)g'(x)$, 同样 $h(x)$ 要通过具体的等式结构另求出.

例 3.1.28. 求下列不定积分.

(1) $\int \frac{e^{-\sin x} \cdot \sin 2x}{(1-\sin x)^2} dx.$	(2) $\int e^{-\frac{x}{2}} \frac{\cos x - \sin x}{\sqrt{\sin x}} dx.$	(3) $\int \frac{x^2 dx}{(x \sin x + \cos x)^2}.$
(4) $\int e^{\sin x} \frac{x \cos^3 x - \sin x}{\cos^2 x} dx.$	(5) $\int \left(1+x-\frac{1}{x}\right) e^{x+\frac{1}{x}} dx.$	(6) $\int \frac{x + \sin x \cos x}{(\cos x - x \sin x)^2} dx.$

(1) 令 $f(x) = e^{-\sin x} \cdot \sin 2x$, $g(x) = 1 - \sin x$, 由

$$f(x) = h'(x)g(x) - h(x)g'(x) = h'(x) - h'(x)\sin x + h(x)\cos x$$

设 $h(x) = Ae^{-\sin x}$, 那么 $h'(x) = -A \cos x e^{-\sin x}$, 所以

$$h'(x) - h'(x)\sin x + h(x)\cos x = A \sin x \cos x e^{-\sin x} = \frac{A}{2} \sin 2x e^{-\sin x} = e^{-\sin x} \sin 2x$$

解得 $A = 2$, 所以 $h(x) = 2e^{-\sin x}$.

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int \frac{2 \sin x \cos x e^{-\sin x}}{(1 - \sin x)^2} dx = \int \frac{2e^{-\sin x}(-\cos x)(1 - \sin x) + 2 \cos x e^{-\sin x}}{(1 - \sin x)^2} dx \\ &= \int \frac{h'(x)(1 - \sin x) - (1 - \sin x)'h(x)}{(1 - \sin x)^2} dx = \int d\left(\frac{h(x)}{1 - \sin x}\right) = \frac{2e^{-\sin x}}{1 - \sin x} + C. \end{aligned}$$

(2) 令 $f(x) = \frac{\cos x - \sin x}{\sqrt{\sin x}}$, $g(x) = -\frac{x}{2}$, 由

$$f(x) = h'(x) + h(x) \cdot g'(x) = h'(x) - \frac{1}{2}h(x) = \frac{\cos x}{\sqrt{\sin x}} - \sqrt{\sin x}$$

设 $h(x) = 2\sqrt{\sin x} + A$, 那么 $h'(x) = \frac{\cos x}{\sqrt{\sin x}}$, 所以

$$h'(x) - \frac{1}{2}h(x) = \frac{\cos x}{\sqrt{\sin x}} - \sqrt{\sin x} - \frac{A}{2} = \frac{\cos x}{\sqrt{\sin x}} - \sqrt{\sin x}$$

解得 $A = 0$, 所以 $h(x) = 2\sqrt{\sin x}$.

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int \left(e^{-\frac{x}{2}} \frac{\cos x}{\sqrt{\sin x}} - e^{-\frac{x}{2}} \sqrt{\sin x} \right) dx = \int \left[e^{-\frac{x}{2}} h'(x) - \frac{1}{2} e^{-\frac{x}{2}} h(x) \right] dx \\ &= \int d\left(h(x)e^{-\frac{x}{2}}\right) = 2\sqrt{\sin x} e^{-\frac{x}{2}} + C. \end{aligned}$$

(3) 法一: 注意到 $1 = \sin^2 x + \cos^2 x$, 所以

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int \frac{x^2 (\sin^2 x + \cos^2 x)}{(x \sin x + \cos x)^2} dx = \int \frac{x^2 \cos^2 x - x \sin x \cos x}{(x \sin x + \cos x)^2} dx + \int \frac{x^2 \sin^2 x + x \sin x \cos x}{(x \sin x + \cos x)^2} dx \\ &= \int \frac{x \cos x (x \cos x - \sin x)}{(x \sin x + \cos x)^2} dx + \int \frac{x \sin x dx}{x \sin x + \cos x} \\ &= \int (\sin x - x \cos x) d\left(\frac{1}{x \sin x + \cos x}\right) + \int \frac{x \sin x dx}{x \sin x + \cos x} \\ &= \frac{\sin x - x \cos x}{x \sin x + \cos x} - \int \frac{x \sin x dx}{x \sin x + \cos x} + \int \frac{x \sin x dx}{x \sin x + \cos x} = \frac{\sin x - x \cos x}{x \sin x + \cos x} + C. \end{aligned}$$

法二: 令 $f(x) = x^2$, $g(x) = x \sin x + \cos x$, 由

$$f(x) = h'(x)g(x) - h(x)g'(x) = h'(x)(x \sin x + \cos x) - h(x)x \cos x = x^2 = x^2 (\sin^2 x + \cos^2 x)$$

设 $h(x) = Ax^a \sin x + Bx^b \cos x$, 那么 $h'(x) = Aax^{a-1} \sin x + Ax^a \cos x + Bbx^{b-1} \cos x - Bx^b \sin x$, 代入上式, 对比系数得 $A = 1, a = 0, B = -1, b = 1$, 于是 $h(x) = \sin x - x \cos x$,

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int \frac{x^2 \sin^2 x + x^2 \cos^2 x}{(x \sin x + \cos x)^2} dx = \int \frac{x \sin x (x \sin x + \cos x) - x \cos x (\sin x - x \cos x)}{(x \sin x + \cos x)^2} dx \\ &= \int \frac{h'(x)(x \sin x + \cos x) - h(x) \cdot (x \sin x + \cos x)'}{(x \sin x + \cos x)^2} d = \int d\left(\frac{h(x)}{x \sin x + \cos x}\right) = \frac{\sin x - x \cos x}{x \sin x + \cos x} + C. \end{aligned}$$

(4) 令 $f(x) = \frac{x \cos^3 x - \sin x}{\cos^2 x}$, $g(x) = \sin x$, 由

$$f(x) = h'(x) + h(x) \cdot g'(x) = h'(x) + h(x) \cdot \cos x = x \cos x - \frac{\sin x}{\cos^2 x}$$

设 $h(x) = \frac{A}{\cos x} + P(x)$, 那么 $h'(x) = \frac{A \sin x}{\cos^2 x} + P'(x)$, 所以

$$h'(x) + h(x) \cdot \cos x = \frac{A \sin x}{\cos^2 x} + P'(x) + A + P(x) \cos x = x \cos x - \frac{\sin x}{\cos^2 x}$$

各项一一对应, 得 $A = -1, P(x) = x$, 所以 $h(x) = x - \sec x$.

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int e^{\sin x} \left(1 - \frac{\sin x}{\cos^2 x} + x \cos x - 1 \right) dx = \int [h'(x)e^{\sin x} + e^{\sin x} \cdot \cos x h(x)] dx \\ &= \int d[h(x)e^{\sin x}] = (x - \sec x)e^{\sin x} + C. \end{aligned}$$

(5) 令 $f(x) = 1 + x - \frac{1}{x}$, $g(x) = 1 + \frac{1}{x}$, 由

$$f(x) = h'(x) + h(x)g'(x) = h'(x) + h(x)\left(1 - \frac{1}{x^2}\right) = 1 + x - \frac{1}{x}$$

$$\text{于是 } h(x) = x, \text{ 故原式} = \int e^{x+\frac{1}{x}} \left[1 + x\left(1 - \frac{1}{x^2}\right)\right] dx = \int d\left(h(x)e^{x+\frac{1}{x}}\right) = xe^{x+\frac{1}{x}} + C.$$

(6) 令 $f(x) = x + \sin x \cos x$, $g(x) = \cos x - x \sin x$, 由

$$f(x) = h'(x)g(x) - h(x)g'(x) = h'(x)(\cos x - x \sin x) + h(x)(2 \sin x + x \cos x) = x + \sin x \cos x$$

$$\text{于是 } h(x) = x \sin x, \text{ 故原式} = \frac{x \sin x}{\cos x - x \sin x} + C.$$

例 3.1.29. 求 $\int \frac{x^2 + 6}{(x \cos x - 3 \sin x)^2} dx$.

法一: 令 $f(x) = x^2 + 6$, $g(x) = x \cos x - 3 \sin x$, 由

$$f(x) = h'(x)g(x) - h(x)g'(x) = h'(x)(x \cos x - 3 \sin x) + h(x)(x \sin x + 2 \cos x)$$

$$(x^2 + 6)(\sin^2 x + \cos^2 x) = h'(x)(x \cos x - 3 \sin x) + h(x)(x \sin x + 2 \cos x)$$

可知, $h(x)$ 中存在 $x \sin x$ 项和 $3 \cos x$; $h'(x)$ 中存在 $x \cos x$ 项和 $-2 \sin x$, 于是不妨取 $h(x) = x \sin x + 3 \cos x$, 故原积分等于 $\frac{x \sin x + 3 \cos x}{x \cos x - 3 \sin x} + C$, 经检验该函数是原积分的原函数.

法二: 运用 $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$, 则有

$$\begin{aligned} I &= \int \frac{(x^2 + 6)(\sin^2 x + \cos^2 x)}{(x \cos x - 3 \sin x)^2} dx = \int \begin{vmatrix} x & 3 \\ -2 & x \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos x & \sin x \\ -\sin x & \cos x \end{vmatrix} \frac{dx}{(x \cos x - 3 \sin x)^2} \\ &= \int \begin{vmatrix} x \cos x - 3 \sin x & x \sin x + 3 \cos x \\ -2 \cos x - x \sin x & -2 \sin x + x \cos x \end{vmatrix} \frac{dx}{(x \cos x - 3 \sin x)^2} \\ &= \int \frac{-2 \sin x + x \cos x}{x \cos x - 3 \sin x} dx + \int \frac{(x \sin x + 3 \cos x)(2 \cos x + \sin x)}{(x \cos x - 3 \sin x)^2} dx \end{aligned}$$

注意到 $\frac{d}{dx}(x \cos x - 3 \sin x) = -(2 \cos x + x \sin x)$, 故可对上式第二个积分利用分部积分公式, 得

$$\begin{aligned} I_1 &= \int \frac{(x \sin x + 3 \cos x)(2 \cos x + \sin x)}{(x \cos x - 3 \sin x)^2} dx = \int (x \sin x + 3 \cos x) d\left(\frac{1}{x \cos x - 3 \sin x}\right) \\ &= \frac{x \sin x + 3 \cos x}{x \cos x - 3 \sin x} - \int \frac{d(x \sin x + 3 \cos x)}{x \cos x - 3 \sin x} = \frac{x \sin x + 3 \cos x}{x \cos x - 3 \sin x} - \int \frac{x \cos x - 2 \sin x}{x \cos x - 3 \sin x} dx \end{aligned}$$

$$\text{所以 } I = \int \frac{x \cos x - 2 \sin x}{x \cos x - 3 \sin x} + I_1 = \frac{x \sin x + 3 \cos x}{x \cos x - 3 \sin x} + C.$$

利用行列式来表述较为复杂的计算式子, 具有过程简洁, 结构紧凑, 规律性强等明显优点.

双变量代换法

例 3.1.30. 求下列不定积分.

$$(1) \int \frac{(x^2 + 1) \cos x + \sin^2 x + 1}{(x^2 - 1) \cos^2 x + 4x \sin x} dx. \quad (2) \int \frac{e^{2x} - x^2 + e^x(1 - x) \cos 2x}{(e^x \cos x + x \sin x) \sqrt{(e^{2x} - x^2) \cos 2x}} dx.$$

(1) 令 $p = x + \sin x$, $q = 1 - x \sin x$, 那么 $p^2 - q^2 = (x + \sin x)^2 - (1 - x \sin x)^2 = (x^2 - 1) \cos^2 x + 4x \sin x$, 并且

$$d\left(\frac{p}{q}\right) = \frac{q dp - p dq}{q^2} = \frac{(x^2 + 1) \cos x + \sin^2 x + 1}{q^2} dx \Rightarrow [(x^2 + 1) \cos x + \sin^2 x + 1] dx = q^2 d\left(\frac{p}{q}\right)$$

$$\text{因此 } I = \int \frac{q^2}{p^2 - q^2} d\left(\frac{p}{q}\right) = \int \frac{1}{\left(\frac{p}{q}\right)^2 - 1} d\left(\frac{p}{q}\right) \stackrel{u=\frac{p}{q}}{\longrightarrow} \frac{1}{2} \int \left(\frac{1}{u-1} - \frac{1}{u+1}\right) du = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{u-1}{u+1} \right| + C, \text{ 即}$$

$$I = \frac{1}{2} [\ln(-x - (x+1) \sin x + 1) - \ln(x - x \sin x + \sin x + 1)] + C.$$

(2) 令 $p = e^x \cos x + x \sin x$, $q = e \sin x + x \cos x$, 那么

$$p^2 - q^2 = (e^x \cos x + x \sin x)^2 - (e \sin x + x \cos x)^2 = (e^{2x} - x^2) \cos 2x$$

并且

$$d\left(\frac{q}{p}\right) = \frac{pdq - qdp}{p^2} = \frac{1}{p^2} [e^{2x} - x^2 + e^x(1-x)\cos 2x]dx \Rightarrow [e^{2x} - x^2 + e^x(1-x)\cos 2x]dx = p^2 d\left(\frac{q}{p}\right)$$

$$\text{因此 } I = \int \frac{p}{\sqrt{p^2 - q^2}} d\left(\frac{q}{p}\right) \stackrel{u=\frac{q}{p}}{=} \int \frac{1}{\sqrt{1-u^2}} du = \arcsin u + C, \text{ 即 } I = \arcsin \left(\frac{e^x \sin x + x \cos x}{e^x \cos x + x \sin x} \right) + C.$$

3.2 定积分

定积分是微积分中的一个重要概念, 它表示在一个区间上对一个函数进行积分, 得到的结果是一个数值, 表示函数在该区间上的面积或者累积量.

3.2.1 求出不定积分后计算

根式积分

定理 3.2.1. 若 $a < b$, 则 $\int_a^b \sqrt{(x-a)(b-x)} dx = \frac{\pi}{8}(b-a)^2$.

例 3.2.1. 计算 $\int_3^5 \sqrt{(x-3)(5-x)} dx$.

由定理 3.2.1 可知原积分等于 $\frac{\pi}{2}$.

三角函数积分

例 3.2.2. 计算定积分 $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin x}{(\sin x + \cos x)^3} dx$.

注意到 $\sin x = \frac{\sin x + \cos x}{2} - \frac{\cos x - \sin x}{2}$, 于是 $\int \frac{\sin x}{(\sin x + \cos x)^3} dx = \frac{1}{2} \int \frac{dx}{(\sin x + \cos x)^2} - \frac{1}{2} \int \frac{\cos x - \sin x}{(\sin x + \cos x)^3} dx$, 其中

$$\begin{aligned} \int \frac{dx}{(\sin x + \cos x)^2} &= \int \frac{\sec^2 x dx}{\tan^2 x + 2 \tan x + 1} \stackrel{\tan x=t}{=} \int \frac{dt}{(t+1)^2} = -(t+1)^{-1} + C = -(\tan x + 1)^{-1} + C \\ \int \frac{\cos x - \sin x}{(\sin x + \cos x)^3} dx &= \int \frac{d(\sin x + \cos x)}{(\sin x + \cos x)^3} = -\frac{1}{2} (\sin x + \cos x)^{-2} + C \\ \text{故 } \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin x}{(\sin x + \cos x)^3} dx &= -\frac{1}{2} (\tan x + 1)^{-1} + \frac{1}{4} (\sin x + \cos x)^{-2} \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

含绝对值类型

例 3.2.3. 计算定积分 $\int_{-2}^3 |x^2 + 2|x| - 3| dx$.

由于 $|x^2 + 2|x| - 3| = \operatorname{sgn}(x^2 + 2\operatorname{sgn}(x) \cdot x - 3) \cdot (x^2 + 2\operatorname{sgn}(x) \cdot x - 3)$, 于是, 当 $x \in [-2, -1]$ 时,

$$\operatorname{sgn}(x) = -1, \operatorname{sgn}(x^2 - 2x - 3) = 1$$

当 $x \in [-1, 0)$ 时,

$$\operatorname{sgn}(x) = -1, \operatorname{sgn}(x^2 - 2x - 3) = -1$$

当 $x \in [0, 1)$ 时,

$$\operatorname{sgn}(x) = 1, \operatorname{sgn}(x^2 - 2x - 3) = -1$$

当 $x \in [1, 3)$ 时,

$$\operatorname{sgn}(x) = 1, \operatorname{sgn}(x^2 - 2x - 3) = 1$$

所以

$$I = \int_{-2}^{-1} (x^2 - 2x - 3) dx - \int_{-1}^0 (x^2 - 2x - 3) dx - \int_0^1 (x^2 + 2x - 3) dx + \int_1^3 (x^2 + 2x - 3) dx = \frac{49}{3}.$$

复合类型

例 3.2.4. 计算 $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin 2x \cdot \ln \sin x \cdot \ln \cos x dx$.

令 $t = \sin^2 x$, 那么 $dt = 2 \sin x \cos x dx = \sin 2x dx$

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin 2x \cdot \ln \sin x \cdot \ln \cos x dx = \frac{1}{4} \int_0^1 \ln t \ln(1-t) dt \\ &= \frac{1}{4} t \ln t \ln(1-t) \Big|_0^1 - \frac{1}{4} \int_0^1 \left[\ln(1-t) + \frac{t \ln t}{t-1} \right] dt = \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \int_0^1 \frac{t \ln t}{t-1} dt \end{aligned}$$

其中 $\int_0^1 \frac{t \ln t}{t-1} dt = \int_0^1 \frac{(t-1+1) \ln t}{t-1} dt = \int_0^1 \ln t dt + \int_0^1 \frac{\ln t}{t-1} dt = \frac{\pi^2}{6} - 1$, 所以原式 $= \frac{1}{2} - \frac{\pi^2}{24}$ 另解见例题 7.2.32.

例 3.2.5. 计算 $\int_0^1 x \arcsin(2\sqrt{x(1-x)}) dx$.

因为

$$\left[\arcsin(2\sqrt{x(1-x)}) \right]' = \frac{\frac{1-2x}{\sqrt{x(1-x)}}}{\sqrt{1-4x(1-x)}} = \frac{\frac{\sqrt{1-x}}{\sqrt{x}} - \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{1-x}}}{\sqrt{1-4x(1-x)}}$$

所以

$$\begin{aligned} \int x \arcsin(2\sqrt{x(1-x)}) dx &= \int \arcsin(2\sqrt{x(1-x)}) d\frac{x^2}{2} \\ &= \frac{1}{2} x^2 \arcsin(2\sqrt{1-x}\sqrt{x}) - \int \frac{\left(\frac{\sqrt{1-x}}{\sqrt{x}} - \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{1-x}}\right) x^2}{2\sqrt{1-4x(1-x)}} dx \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} I &= \int \frac{\left(\frac{\sqrt{1-x}}{\sqrt{x}} - \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{1-x}}\right) x^2}{2\sqrt{1-4x(1-x)}} dx = \int \frac{\left(\frac{\sqrt{1-x}}{\sqrt{x}} - \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{1-x}}\right) x^2}{2|2x-1|} dx = \int \frac{\left(\frac{\sqrt{1-x}}{\sqrt{x}} - \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{1-x}}\right) x^2}{2(2x-1)\operatorname{sgn}(2x-1)} dx \\ &= \frac{1}{2\operatorname{sgn}(2x-1)} \int -\frac{x^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{1-x}} dx \stackrel{\sqrt{x}=t}{=} -\frac{1}{\operatorname{sgn}(2x-1)} \int \frac{t^4}{\sqrt{1-t^2}} dt \\ &\stackrel{\substack{(A,B,C,D,E) \\ (-\frac{1}{4}, 0, -\frac{3}{8}, 0, \frac{3}{8})}}{=} \sqrt{1-t^2} \left(-\frac{t^3}{4} - \frac{3t}{8} \right) + \frac{3}{8} \arcsin t \end{aligned}$$

故

$$\begin{aligned} I &= -\frac{1}{\operatorname{sgn}(2x-1)} \left[\sqrt{1-t^2} \left(-\frac{t^3}{4} - \frac{3t}{8} \right) + \frac{3}{8} \arcsin t \right] \\ &= \frac{\sqrt{1-x}\sqrt{x}(4x^2+4x-3)-6\arcsin\sqrt{x}+3\arcsin\sqrt{x}}{8|2x-1|} \\ \text{原式} &= \left[\frac{1}{2} x^2 \arcsin(2\sqrt{1-x}\sqrt{x}) - I \right] \Big|_0^1 = \frac{3\pi}{16}. \end{aligned}$$

3.2.2 运用定积分性质进行相关计算

定积分的换元变换

例 3.2.6. 设 $F(a) = \int_0^\pi \ln(1 - 2a \cos x + a^2) dx$, 求 $F(-a)$, $F(a^2)$.

作定积分的换元变化, 令 $t = \pi - x$, 则

$$\begin{aligned} F(-a) &= \int_0^\pi \ln(1 + 2a \cos x + a^2) dx \xrightarrow{t=\pi-x} -\int_\pi^0 \ln(1 - 2a \cos t + a^2) dt \\ &= \int_0^\pi \ln(1 - 2a \cos t + a^2) dt = F(a) \end{aligned}$$

且 $F(a^2) = \int_0^\pi \ln(1 - 2a^2 \cos x + a^4) dx$, 注意到

$$\begin{aligned} 2F(a) &= F(a) + F(-a) = \int_0^\pi [\ln(1 - 2a \cos x + a^2) + \ln(1 + 2a \cos x + a^2)] dx \\ &= \int_0^\pi \ln[(1 + a^2)^2 - 4a^2 \cos^2 x] dx = \int_0^\pi \ln(1 - 2a^2 \cos 2x + a^4) dx \\ &\xrightarrow{2x=t} \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \ln(1 - 2a^2 \cos t + a^4) dt \\ &= \frac{1}{2} \left[\int_0^\pi \ln(1 - 2a^2 \cos t + a^4) dt + \int_\pi^{2\pi} \ln(1 - 2a^2 \cos t + a^4) dt \right] \\ &\xrightarrow{\substack{u=2\pi-t \\ \text{第二项}}} \frac{1}{2} \left[\int_0^\pi \ln(1 - 2a^2 \cos t + a^4) dt + \int_0^\pi \ln(1 - 2a^2 \cos u + a^4) du \right] \\ &= \int_0^\pi \ln(1 - 2a^2 \cos x + a^4) dx = F(a^2). \end{aligned}$$

对称区间上的积分公式

定理 3.2.2. 函数 $f(x)$ 在区间 $[-a, a]$, $a > 0$ 上连续, 则 $\int_{-a}^a f(x) dx = \int_0^a [f(x) + f(-x)] dx$.

证 因为 $\int_{-a}^a f(x) dx = \int_{-a}^0 f(x) dx + \int_0^a f(x) dx$, 而令 $x = -t$, 有

$$\int_{-a}^0 f(x) dx = - \int_a^0 f(-t) dt = \int_0^a f(-t) dt = \int_0^a f(-x) dx$$

所以 $\int_{-a}^a f(x) dx = \int_0^a [f(x) + f(-x)] dx$.

推论 3.2.1. 设函数 $f(x), g(x)$ 在 $[-a, a]$, $a > 0$ 上连续, 且 $g(x)$ 为偶函数, 则

$$\int_{-a}^a f(x)g(x) dx = \int_0^a [f(-x) + f(x)]g(x) dx.$$

例 3.2.7. 计算下列定积分,

(1) $\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos^2 x}{1 + e^{-x}} dx.$ (3) $\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \cos x \left(\ln \frac{1+x}{1-x} + \sin^2 x \right) dx.$ (5) $\int_{-\pi}^{\pi} \frac{x \sin x \arctan e^x}{1 + \cos^2 x} dx.$	(2) $\int_{-2}^2 x \ln(1 + e^x) dx.$ (4) $\int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{1 + 2^x} \cdot \frac{\sin(2n+1)x}{\sin x} dx.$ (6) $\int_{-1}^1 x (1 + x^{2023}) (e^x - e^{-x}) dx.$
--	---

$$(1) \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos^2 x}{1+e^{-x}} dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{1}{1+e^x} + \frac{1}{1+e^{-x}} \right) \cos^2 x dx = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1+\cos 2x) dx = \frac{\pi}{4}.$$

$$(2) \text{原式} = \frac{1}{2} x^2 \ln(1+e^x) \Big|_{-2}^2 - \frac{1}{2} \int_{-2}^2 \frac{x^2 e^x}{1+e^x} dx = 2 \ln \frac{1+e^2}{1+e^{-2}} - \frac{1}{2} \int_0^2 \left(\frac{1}{1+e^{-x}} + \frac{1}{1+e^x} \right) x^2 dx = 2 \ln \frac{1+e^2}{1+e^{-2}} - \frac{4}{3}.$$

$$(3) \text{原式} = \int_0^{\frac{1}{2}} \left(\ln \frac{1+x}{1-x} + \sin^2 x + \ln \frac{1-x}{1+x} + \sin^2 x \right) d \sin x = 2 \int_0^{\frac{1}{2}} \sin^2 x d \sin x = \frac{2}{3} \sin^3 \frac{1}{2}.$$

$$(4) \text{因为 } \frac{\sin(2n+1)x}{\sin x} = 1 + \sum_{k=1}^n \cos 2kx, \text{ 所以}$$

$$\text{原式} = \int_0^\pi \left(\frac{1}{1+2^x} + \frac{1}{1+2^{-x}} \right) \frac{\sin(2n+1)}{\sin x} dx = \int_0^\pi \left(1 + 2 \sum_{k=1}^n \cos 2kx \right) dx = \pi.$$

$$(5) \text{注意到 } \arctan x + \arctan \frac{1}{x} = \frac{\pi}{2}, x > 0, \text{且 } \int_0^\pi x f(\sin x) dx = \frac{\pi}{2} \int_0^\pi f(\sin x) dx, \text{所以}$$

$$\begin{aligned} I &= \int_0^\pi (\arctan e^x + \arctan e^{-x}) \frac{x \sin x}{1+\cos^2 x} dx = \frac{\pi}{2} \int_0^\pi \frac{x \sin x}{1+\cos^2 x} dx = -\frac{\pi^2}{4} \int_0^\pi \frac{d \cos x}{1+\cos^2 x} \\ &= -\frac{\pi^2}{4} \cdot \arctan \cos x \Big|_0^\pi = \frac{\pi^3}{8}. \end{aligned}$$

$$(6) I = \int_0^1 [1+x^{2023}+1+(-x)^{2023}] x (e^x - e^{-x}) dx = 2 \int_0^1 x (e^x - e^{-x}) dx = \frac{4}{e}.$$

例 3.2.8. (2023 合肥工业大学) 计算 $I = \int_{-\pi}^{\pi} x \sin^5 x \arctan e^x dx$.

由推论 3.2.1 可知,

$$I = \int_0^\pi (\arctan e^x + \arctan e^{-x}) x \sin^5 x dx = \frac{\pi}{2} \int_0^\pi x \sin^5 x dx = \frac{\pi^2}{4} \int_0^\pi \sin^5 x dx = \frac{\pi^2}{4} \cdot 2 \cdot \frac{4!!}{5!!} = \frac{4\pi^2}{15}.$$

例 3.2.9. 设 $a > 0$, $f(x)$ 是 $[-a, a]$ 上的连续偶函数, 证明: $\int_{-a}^a \frac{f(x)}{1+e^x} dx = \int_0^a f(x) dx$.

$$\text{证 左} = \int_{-a}^0 \frac{f(x)}{1+e^x} dx + \int_0^a \frac{f(x)}{1+e^x} dx \stackrel{x=-t}{=} - \int_a^0 \frac{f(-t)}{1+e^{-t}} dt + \int_0^a \frac{f(x)}{1+e^x} dx = \int_0^a \left(\frac{1}{1+e^x} + \frac{1}{1+e^{-x}} \right) f(x) dx = \text{右}.$$

例 3.2.10. 设函数 $f(x)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 上连续, 且对任何 x, y , 有 $f(x+y) = f(x) + f(y)$, 计算

$$\int_{-1}^1 (x^2 + 1) f(x) dx.$$

$$\int_{-1}^1 (x^2 + 1) f(x) dx = \int_0^1 (f(x) + f(-x)) (x^2 + 1) dx = f(0) \int_0^1 (x^2 + 1) dx = \frac{4}{3} f(0).$$

周期函数的定积分

定理 3.2.3 (周期函数的定积分公式). 设 $f(x)$ 是连续的周期函数, 最小正周期为 T , 则有

$$(1) \int_a^{a+T} f(x) dx = \int_0^T f(x) dx;$$

$$(2) \int_a^{a+nT} f(x) dx = n \int_0^T f(x) dx.$$

例 3.2.11. 计算定积分 $\int_0^{n\pi} |x| \sin x dx$, 其中 n 为正整数.

由 $\int_a^b f(x)dx = \int_a^{\frac{a+b}{2}} [f(x) + f(a+b-x)]dx$, 得

$$\int_0^{nx} x |\sin x| dx = \int_0^{\frac{n\pi}{2}} [x |\sin x| + (n\pi - x) |\sin(n\pi - x)|] dx = n\pi \int_0^{\frac{n\pi}{2}} |\sin x| dx$$

又因为 $|\sin x| = \sqrt{\sin^2 x} = \sqrt{\frac{1 - \cos 2x}{2}}$ 的周期为 $T = \frac{2\pi}{2} = \pi$, 且 $\int_0^{\frac{\pi}{2}} |\sin x| dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin x dx = 1$, $\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} |\sin x| dx = 1$,
所以 $\int_0^{\frac{n\pi}{2}} |\sin x| dx = n$, 故 $\int_0^{n\pi} x |\sin x| dx = n^2 \pi$.

例 3.2.12. 已知数列 $\{a_n\}, \{b_n\}$ 满足

$$a_n = \int_0^{n^2\pi} (|\cos t| + |\sin t|) dt, b_n = \int_0^{\frac{1}{n}} (e^{-t} \sin t) dt$$

求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \cdot (a_n b_n - 2)$.

因为 $|\cos t|, |\sin t|$ 都是周期为 $T = \pi$ 的周期函数, 那么

$$\begin{aligned} a_n &= \sum_{k=0}^{n^2-1} \int_{k\pi}^{(k+1)\pi} (|\cos t| + |\sin t|) dt = \sum_{k=0}^{n^2-1} \int_0^\pi (|\cos t| + |\sin t|) dt = 4n^2 \\ b_n &= -\frac{e^{-t}}{2} (\sin t + \cos t) \Big|_0^{\frac{1}{n}} = \frac{1}{2} - \frac{e^{-\frac{1}{n}}}{2} \left(\sin \frac{1}{n} + \cos \frac{1}{n} \right) \end{aligned}$$

那么

$$\begin{aligned} I &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \cdot (a_n b_n - 2) = \lim_{n \rightarrow \infty} n \cdot \left[2n^2 - 2n^2 e^{-\frac{1}{n}} \left(\sin \frac{1}{n} + \cos \frac{1}{n} \right) - 2 \right] \xrightarrow{\frac{1}{n}=t} \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{2e^t - 2(\sin t + \cos t) - 2t^2 e^t}{t^3 e^t} \\ &= \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{2 \left(1 + t + \frac{1}{2}t^2 + \frac{1}{6}t^3 + o(t^3) \right) - 2 \left(x - \frac{1}{6}x^3 + 1 - \frac{1}{2}x^2 + o(x^3) \right) - 2t^2(1 + t + o(t))}{t^3} = -\frac{4}{3}. \end{aligned}$$

区间再现公式

定理 3.2.4 (区间再现公式). 若 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上连续¹, 则

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &= \int_a^b f(a+b-x) dx = \frac{1}{2} \int_a^b [f(x) + f(a+b-x)] dx \\ &= \int_a^{\frac{a+b}{2}} [f(a) + f(a+b-x)] dx. \end{aligned}$$

特别地, 当 $f(x) = xg(x)$ ($g(x) = g(a+b-x)$) 时, $\int_a^b xg(x) dx = \frac{a+b}{2} \int_a^b g(x) dx$;

当 $f(x) = \frac{g(x)}{g(x) + g(a+b-x)}$ 时, $\int_a^b \frac{g(x)}{g(x) + g(a+b-x)} dx = \frac{1}{2}(b-a)$.

例 3.2.13. 求 $\int_0^1 \frac{\arcsin \sqrt{x}}{\sqrt{x^2 - x + 1}} dx$.

¹事实上 $\int_a^b f(x) dx = \int_a^{\frac{a+b}{2}} f(x) dx + \int_{\frac{a+b}{2}}^b f(x) dx$, 令 $x = a+b-t$, 则

$$\int_{\frac{a+b}{2}}^b f(x) dx = \int_{\frac{a+b}{2}}^a f(a+b-t) d(-t) = \int_a^{\frac{a+b}{2}} f(a+b-t) dt = \int_a^{\frac{a+b}{2}} f(a+b-x) dx$$

所以有 $\int_a^b f(x) dx = \int_a^{\frac{a+b}{2}} [f(x) + f(a+b-x)] dx$.

由定理 3.2.4 得,

$$I = \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{\arcsin \sqrt{x} + \arcsin \sqrt{1-x}}{\sqrt{x^2 - x + 1}} dx = \frac{\pi}{4} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{x^2 - x + 1}} = \frac{\pi}{4} \ln 3$$

其中 $\int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{x^2 - x + 1}} = \int_0^1 \frac{d\left(x - \frac{1}{2}\right)}{\sqrt{\left(x - \frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2}} = \ln \left[\left(x - \frac{1}{2}\right) + \sqrt{x^2 - x + 1} \right] \Big|_0^1 = \ln 3.$

例 3.2.14. 计算 $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dx}{1 + \tan^{\sqrt{2}} x}.$

法一: 令 $x = \frac{\pi}{2} - t$, 那么 $dx = -dt$, 所以

$$\text{原式} = \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \frac{-dt}{1 + \cot^{\sqrt{2}} t} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\tan^{\sqrt{2}} t}{1 + \tan^{\sqrt{2}} t} dt = \int_0^{\frac{\pi}{2}} dt - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dx}{1 + \tan^{\sqrt{2}} x} = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} dt = \frac{\pi}{4}.$$

法二: 原式 $= \int_0^{\frac{\pi}{4}} \left[\frac{1}{1 + \tan^{\sqrt{2}} x} + \frac{1}{1 + \tan^{\sqrt{2}} \left(\frac{\pi}{2} - x\right)} \right] dx = \int_0^{\frac{\pi}{4}} dx = \frac{\pi}{4}.$

推论 3.2.2. 一般地, 设 α 为任意正整数, 则 $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dx}{1 + \tan^\alpha x} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dx}{1 + \cot^\alpha x} = \frac{\pi}{4}.$

例 3.2.15. 计算 $I = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{x}} f(x) dx$, 其中 $f(x) = \int_{\sqrt{\frac{\pi}{2}}}^{\sqrt{x}} \frac{du}{1 + \tan^{\sqrt{2}} u^2}$.

$$f(x) \xrightarrow{u^2=t} \int_{\frac{\pi}{2}}^x \frac{dt}{2\sqrt{t}(1 + \tan^{\sqrt{2}} t)},$$

$$I = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(x) d\sqrt{x} = 2\sqrt{x} f(x) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} - 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{x} df(x) = - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dx}{1 + \tan^{\sqrt{2}} x} = -\frac{\pi}{4}.$$

例 3.2.16. 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt[n]{n!}} \left(\ln \frac{2n+k}{2n-k} + \ln \frac{n+k}{3n-k} \right).$

由引理 1.3.2, 可知原式 $= e \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\ln \frac{2 + \frac{k}{n}}{2 - \frac{k}{n}} + \ln \frac{1 + \frac{k}{n}}{3 - \frac{k}{n}} \right) = e \int_0^1 \ln \frac{(2+x)(1+x)}{(2-x)(3-x)} dx$, 若用分部积分法求解则显得复杂, 不妨采用定理 3.2.4, 则

$$\int_0^1 \ln \frac{(2+x)(1+x)}{(2-x)(3-x)} dx \xrightarrow{1+0-x=t} \frac{1}{2} \int_0^1 \left[\ln \frac{(2+x)(1+x)}{(2-x)(3-x)} + \ln \frac{(3-t)(2-t)}{(1+t)(2+t)} \right] dx = \frac{1}{2} \int_0^1 \ln 1 dx = 0$$

故原极限等于 0.

3.2.3 积分作为上下限的函数

定理 3.2.5. 若 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上可积, 则 $F(x) = \int_a^x f(t) dt$ 在 $[a, b]$ 上连续.

定理 3.2.6. 在区间 I 上, 若函数 f 连续, $\varphi(x)$ 和 $\psi(x)$ 可导, 则 $F(x) = \int_{\varphi(x)}^{\psi(x)} f(t) dt$ 也可导, 且

$$F'(x) = f(\varphi(x)) \cdot \varphi'(x) - f(\psi(x)) \cdot \psi'(x).$$

例 3.2.17. 设 $y = y(x)$ 由 $x = \int_1^{y-x} \sin^2\left(\frac{\pi t}{4}\right) dt$ 所确定, 求 $\left.\frac{dy}{dx}\right|_{x=0}$.

易知 $y(0) = 1$, 两边对 x 求导, 得

$$1 = \sin^2\left[\frac{\pi}{4}(y-x)\right](y'-1) \Rightarrow y' = \csc^2\left[\frac{\pi}{4}(y-x)\right] + 1$$

将 $x = 0$ 代入, 得 $y' = 3$.

例 3.2.18. 设 $f(x) = \int_x^{x^2} \frac{1}{t} \ln \frac{t}{2} dt$ ($x \in (1, +\infty)$), 问函数 $f(x)$ 在何处取最小值.

$f'(x) = \frac{1}{x^2} \ln \frac{x^2}{2} \cdot 2x - \frac{1}{x} \ln \frac{x}{2} = \frac{\ln x}{x}$, 令 $f'(x) = 0$, 解得 $x = 1$, 并且当从左到右穿过 $x = 1$ 时, $f'(x)$ 由负变正, 故 $f(1)$ 是 f 的最小值 $f_{min} = \int_1^1 \frac{1}{t} \ln \frac{t}{2} dt = 0$.

例 3.2.19. 求积分的极限 $\lim_{x \rightarrow +\infty} x^m \int_0^{\frac{1}{x}} \sin t^2 dt$ (其中 m 为任意整数).

令 $\frac{1}{x} = u$, 则

$$\text{原式} = \lim_{u \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^u \sin t^2 dt}{u^m} \stackrel{L'H}{=} \lim_{u \rightarrow 0^+} \frac{\sin u^2}{mu^{m-1}} = \lim_{u \rightarrow 0^+} \frac{u^{3-m}}{m} = \begin{cases} 0, & m = 1, 2 \text{ 或 } m \leq 0, \\ \frac{1}{3}, & m = 3, \\ +\infty, & m > 3. \end{cases}$$

例 3.2.20. 设函数 $f(x) = \begin{cases} x^2, & 0 \leq x \leq 1 \\ 2-x, & 1 < x \leq 2 \end{cases}$, 记 $F(x) = \int_0^x f(t) dt$, $0 \leq x \leq 2$, 求 $F(x)$.

当 $0 \leq x \leq 1$ 时, $F(x) = \int_0^x f(t) dt = \int_0^x t^2 dt = \frac{1}{3}x^3$;

当 $1 < x \leq 2$ 时, $F(x) = \int_0^1 t^2 dt + \int_1^x (2-t) dt = -\frac{7}{6} + 2x - \frac{1}{2}x^2$,

所以 $F(x) = \begin{cases} \frac{x^3}{3}, & 0 \leq x \leq 1 \\ -\frac{7}{6} + 2x - \frac{1}{2}x^2, & 1 < x \leq 2 \end{cases}$.

例 3.2.21. 设函数 $f(x)$ 在 $(0, +\infty)$ 内连续, $f(1) = \frac{5}{2}$, 且对所有 $x, t \in (0, +\infty)$, 满足条件

$$\int_1^{xt} f(u) du = t \int_1^x f(u) du + x \int_1^t f(u) du$$

求 $f(x)$ 的表达式.

等式两边同时对 t 求导, 得

$$xf(xt) = \int_1^x f(u) du + xf(t)$$

由上式可知 f 是 $(0, +\infty)$ 内的可导函数, 两边再对 x 求导, 得

$$f(xt) + txf'(xt) = f(x) + f(t)$$

令 $t = 1$, 得 $f(x) + xf'(x) = f(x) + f(1) \Rightarrow f'(x) = \frac{5}{2x} \Rightarrow f(x) = \frac{5}{2} \ln x + C$, 又 $f(1) = \frac{5}{2}$, 所以

$$f(x) = \frac{5}{2}(\ln x + 1).$$

例 3.2.22. 设函数 $f(x)$ 和 $g(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上连续, 且 $f(x)$ 单调增加, $0 \leq g(x) \leq 1$, 证明:

$$(1) \quad 0 \leq \int_a^x g(t)dt \leq x - a, x \in [a, b];$$

$$(2) \quad \int_a^{a+\int_a^b g(t)dt} f(x)dx \leq \int_a^b f(x)g(x)dx.$$

证

(1) 由定积分保序性可得:

$$0 \leq \int_a^x g(t)dt \leq \int_a^x dt = x - a (x \in [a, b]).$$

(2) 令 $b = x$, 构造辅助函数

$$F(x) = \int_a^x f(t)g(t)dt - \int_a^{a+\int_a^x g(t)dt} f(t)dt$$

则 $F(a) = 0$,

$$F'(x) = f(x)g(x) - f\left(a + \int_a^x g(t)dt\right)g(x) = g(x)\left[f(x) - f\left(a + \int_a^x g(t)dt\right)\right]$$

因为 $a + \int_a^x g(t)dt \in [0, x]$, 且 $f(x) \nearrow$, 所以 $f(x) - f\left(a + \int_a^x g(t)dt\right) \geq 0$, 所以 $F'(x) \geq 0$, 故 $F(x) \nearrow$, 所以 $F(x) \geq F(a) = 0 \Rightarrow F(b) \geq 0 \Rightarrow \int_a^{a+\int_a^b g(t)dt} f(x)dx \leq \int_a^b f(x)g(x)dx$.

3.2.4 积分中值定理

第一积分中值定理

定理 3.2.7 (第一积分中值定理). 设 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, $g(x)$ 在 $[a, b]$ 上可积, 且不变号, 则 $\exists \xi \in (a, b)$ 使得

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = f(\xi) \int_a^b g(x)dx.$$

例 3.2.23. 设 $a_n, b_n > 0$, $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ 且 $\int_{\sin a_n}^{a_n} e^{x^2} dx = b_n \ln(1 + b_n)$, 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^3}{b_n^2}$.

由题意当 $n \rightarrow \infty$ 时 $b_n = 0$, 故 $\int_{\sin a_n}^{a_n} e^{x^2} dx = b_n \ln(1 + b_n) = b_n^2$, 于是

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^3}{b_n^2} = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{t^3}{\int_{\sin t}^t e^{x^2} dx} = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{1}{e^{\xi^2}} \frac{t^3}{t - \sin t} = 6$$

其中 $\sin t < \xi < t$.

例 3.2.24. 设 $f(x) \in D(0, 1)$, $f(0) = f(1) = -2$, $\int_0^1 f(x)dx = 0$, 证明: $\exists \xi \in (0, 1)$, 使得 $f'(\xi) - f(\xi) = \xi$.

证 令 $F(x) = e^{-x}(f(x) + x + 1)$, 有 $F(0) = -1$, $F(1) = 0$, 因为 $\int_0^1 f(x)dx = 0$, 由积分中值定理知, $\exists \eta \in (0, 1)$, 使得

$$\int_0^1 f(x)dx = f(\eta) \int_0^1 dx = f(\eta) = 0$$

而 $F(\eta) = e^{-\eta}(f(\eta) + \eta + 1) > 0$, 因此 $\exists \xi \in (0, 1)$, 使得 $F(x) \leq F(\xi)$, 即 $F(x)$ 的最大值一定在区间 $(0, 1)$ 内取到, 由 Fermat 引理知, $F'(\xi) = 0$, 即

$$-e^{-x}(f(x) + x + 1) + e^{-x}(f'(x) + 1) \Big|_{x=\xi} = f'(\xi) - f(\xi) = \xi.$$

例 3.2.25 (2019 数二). 已知函数 $f(x)$ 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 (1) $\exists \xi \in (0, 1)$, 使得 $f'(\xi) = 0$; (2) $\exists \eta \in (0, 1)$, 使得 $f''(\eta) < -2$.

证

(1) 令 $F(x) = \int_0^x f(t)dt$, 则 $F'(x) = f(x)$, 且

$$1 = \int_0^1 f(x)dx = F(1) - F(0) = F'(c)(1 - 0) = f'(c)$$

于是 $f(c) = f(1) = 1$, 故由 Rolle 中值定理知, $\exists \xi \in (c, 1) \subset (0, 1)$, 使得 $f'(\xi) = 0$.

(2) 法一: 反证法令 $g(x) = f(x) + x^2$, 则 $g(0) = 0, g(1) = 2$, 假设 $\nexists \eta \in (0, 1)$, 使得 $g''(\eta) < 0$, 即 $\forall x \in (0, 1), g''(x) \geq 0$, 则 $g(x)$ 为下凹函数, 则有

$$\int_0^1 (f(x) + x^2)dx = \int_0^1 g(x)dx \leq \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 2 = 1$$

但 $\int_0^1 (f(x) + x^2)dx = 1 + \frac{1}{3} = \frac{4}{3}$, 而 $\frac{4}{3} > 1$, 矛盾, 故假设不成立, 即 $\exists \eta \in (0, 1)$, 使得 $f''(\eta) < -2$.

法二: 令 $g(x) = f(x) + ax^2 + bx + c$, 使得 $g(0) = 0, g(1) = 0, \int_0^1 g(x)dx = 0$, 故

$$\begin{cases} c = 0 \\ 1 + a + b + c = 0 \\ 1 + \frac{a}{3} + \frac{b}{2} + c = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = 3 \\ b = -4 \\ c = 0 \end{cases}$$

即 $g(x) = f(x) + 3x^2 - 4x$, 由第一积分中值定理知, $\exists c \in (0, 1)$ 使得 $\int_0^1 g(x)dx = g(c) = 0$, 又 $g(0) = 0, g(1) = 0$, 故 $\exists \xi_1 \in (0, c)$, 使得 $g'(\xi_1) = 0, \exists \xi_2 \in (c, 1)$, 使得 $g'(\xi_2) = 0$, 再由 Rolle 中值定理知 $\exists \eta \in (\xi_1, \xi_2) \subset (0, 1)$, 使得 $g''(\eta) = 0 \Rightarrow f''(\eta) + 6 = 0 \Rightarrow f''(\eta) < -2$.

例 3.2.26. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续且单调递增, 证明 $\int_a^b xf(x)dx \geq \frac{a+b}{2} \int_a^b f(x)dx$.

证法一 要证不等式成立, 即要证 $\int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right) f(x)dx \geq 0$, 因为 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上单调递增, 所以

$$\left(x - \frac{a+b}{2}\right) \left(f(x) - f\left(\frac{a+b}{2}\right)\right) \geq 0$$

两边积分, 得 $\int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right) \left(f(x) - f\left(\frac{a+b}{2}\right)\right) dx \geq 0$, 而

$$\int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right) f\left(\frac{a+b}{2}\right) dx = f\left(\frac{a+b}{2}\right) \int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right) dx = 0$$

所以 $\int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right) f(x)dx \geq 0$, 故得证.

证法二 由第一积分中值定理,

$$\begin{aligned} \int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right) f(x)dx &= \int_a^{\frac{a+b}{2}} \left(x - \frac{a+b}{2}\right) dx + \int_{\frac{a+b}{2}}^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right) f(x)dx \\ &= f(\xi_1) \int_a^{\frac{a+b}{2}} \left(x - \frac{a+b}{2}\right) dx + f(\xi_2) \int_{\frac{a+b}{2}}^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right) dx \\ &= \frac{(b-a)^2}{8} (f(\xi_2) - f(\xi_1)) \end{aligned}$$

其中 $\xi \in \left(a, \frac{a+b}{2}\right), \xi_2 \in \left(\frac{a+b}{2}, b\right)$, 而 $f(x)$ 单调递增 $\xi_1 < \xi_2$, 所以 $f(\xi_1) \leq f(\xi_2)$, 从而 $\int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right) f(x)dx \geq 0$, 故得证.

第二积分中值定理

定理 3.2.8 (第二积分中值定理 A). 在 $[a, b]$ 上, 若 $f(x)$ 非负单调递减, $g(x)$ 可积, 则 $\exists \xi \in [a, b]$ 使得

$$I = \int_a^b f(x)g(x)dx = f(a) \int_a^\xi g(x)dx.$$

定理 3.2.9 (第二积分中值定理 B). 在 $[a, b]$ 上, 若 $f(x)$ 非负单调递增, $g(x)$ 可积, 则 $\exists \xi \in [a, b]$ 使得

$$I = \int_a^b f(x)g(x)dx = f(b) \int_\xi^b g(x)dx.$$

定理 3.2.10 (第二积分中值定理 C). 在 $[a, b]$ 上, 若 $f(x)$ 单调, $g(x)$ 可积, 则 $\exists \xi \in [a, b]$ 使得

$$I = \int_a^b f(x)g(x)dx = f(a) \int_a^\xi g(x)dx + f(b) \int_\xi^b g(x)dx.$$

例 3.2.27. 求极限 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x \sqrt{t} \cos t dt}{x}$.

错解.

- (1) 直接使用 L'Hospital 法则.
- (2) 使用第一积分中值定理.

错因: 使用 L'Hospital 法则后极限振荡不存在, 故 L'Hospital 法则失效; 第一积分中值定理

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = f(\xi) \int_a^b g(x)dx$$

其中 f 在 $[a, b]$ 上连续, g 在 $[a, b]$ 上可导, 并且 g 不变号, 因为 $\cos t$ 在 $[0, +\infty)$ 周期性变号, 故不能使用积分中值定理.

法一: 对分子使用分部积分公式, 有

$$\int_0^x \sqrt{t} \cos t dt = \int_0^x \sqrt{t} d \sin t = \sqrt{t} \sin x \Big|_0^x - \int_0^x \sin t d \sqrt{t} \stackrel{\sqrt{t}=u}{=} \sqrt{x} \sin x - \int_0^{\sqrt{x}} \sin u^2 du$$

于是原极限可化为

$$I = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt{x}} \sin x - \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \int_0^{\sqrt{x}} \sin u^2 du = 0 - 0 = 0$$

其中 $\frac{1}{\sqrt{x}} \sin x \rightarrow 0$ ($x \rightarrow +\infty$) (无穷小量乘以有界量), $\int_0^{+\infty} \sin u^2 du = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2}}$ (Fresnel 积分).

法二: 运用第二积分中值定理: $\int_a^b f(x)g(x)dx = f(a) \int_a^\xi g(x)dx + f(b) \int_\xi^b g(x)dx$, 其中 f 在 $[a, b]$ 上单调, g 在 $[a, b]$ 上可积, $\xi \in [a, b]$, 于是原式可化为

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \left(0 + \sqrt{x} \int_\xi^x \cos t dt \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt{x}} \int_\xi^x \cos t dt = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt{x}} \sin x - \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt{x}} \sin \xi = 0 - 0 = 0$$

其中 $\frac{1}{\sqrt{x}} \sin x \rightarrow 0$ ($x \rightarrow +\infty$), 同理可得 $\frac{1}{\sqrt{x}} \sin \xi \rightarrow 0$ ($x \rightarrow +\infty$).

例 3.2.28. 试用第二积分中值定理证明例 3.2.26.

证 因为 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上单调递增, 所以由第二积分中值定理知, 存在 $\xi \in [a, b]$, 使得

$$\begin{aligned} \int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2} \right) f(x)dx &= f(a) \int_a^\xi \left(x - \frac{a+b}{2} \right) dx + f(b) \int_\xi^b \left(x - \frac{a+b}{2} \right) dx \\ &= f(a) \int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2} \right) dx + (f(b) - f(a)) \int_\xi^b \left(x - \frac{a+b}{2} \right) dx \\ &= (f(b) - f(a)) \frac{(b-\xi)(\xi-a)}{2} \geqslant 0 \end{aligned}$$

故得证.

3.2.5 定积分的几何应用

平面图形的面积

定理 3.2.11 (平面图形面积公式). 平面图形由曲线 $y_1 = f_1(x)$, $y_2 = f_2(x)$ 和直线 $x = a$, $x = b$ ($a < b$) 所围成, 那么围成的面积计算公式为:

$$A = \int_a^b |f_1(x) - f_2(x)| dx.$$

若由曲线 $r = r(\theta)$ ($\alpha \leq \theta \leq \beta$) 围成, 则其面积为:

$$A = \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\beta} r^2(\theta) d\theta.$$

例 3.2.29. 设封闭曲线 L 的极坐标方程为 $r = \cos 3\theta$ ($-\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{6}$), 求 L 所围平面图形的面积.

所求平面图形的面积为

$$S = \frac{1}{2} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} r^2(\theta) d\theta = \frac{1}{2} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \cos^2 3\theta d\theta = \int_0^{\frac{\pi}{6}} \frac{1 + \cos 6\theta}{2} d\theta = \frac{\pi}{12}.$$

例 3.2.30 (2012 数一). 已知曲线

$$L : \begin{cases} x = f(t) \\ y = \cos t \end{cases} \quad \left(0 \leq t < \frac{\pi}{2}\right)$$

其中函数 $f(t)$ 具有连续导数, 且 $f(0) = 0$, $f'(t) > 0$ ($0 < t < \frac{\pi}{2}$), 若曲线 L 的切线与 x 轴的交点到切点的距离恒为 1, 求函数 $f(t)$ 的表达式, 并求以曲线 L 及 x 轴和 y 轴为边界的区域的面积.

旋转体的侧面积和体积

定理 3.2.12 (旋转体的侧面积公式). 由 xOy 平面上的曲线 $y = f(x)$ ($a \leq x \leq b$) 绕 x 轴旋转而成的旋转曲面的面积为:

$$A = 2\pi \int_a^b f(x) \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx.$$

例 3.2.31. 求抛物线的一段 $y = \sqrt{2x}$ ($0 \leq x \leq 1$), 绕 x 轴旋转一周所得的旋转体体积以及所得旋转面的侧面积.

设旋转体体积为 V , 旋转面的侧面积为 S , 那么

$$\begin{aligned} V &= \int_0^1 \pi y^2 dx = 2\pi \cdot \frac{1}{2} x^2 \Big|_0^1 = \pi \\ S &= 2\pi \int_0^1 \sqrt{2x} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\sqrt{2x}}\right)^2} dx = 2\pi \int_0^1 \sqrt{2x+1} dx = \frac{2\pi}{3} (2x+1)^{\frac{3}{2}} \Big|_0^1 = \frac{2\pi}{3} (3\sqrt{3}-1). \end{aligned}$$

定理 3.2.13 (旋转体的体积公式). 由 xOy 平面上的曲线 $y = f(x)$ 与直线 $x = a, x = b$ 以及 x 轴所围成的曲边梯形绕 x 轴旋转而成的旋转体体积为:

$$V_x = \pi \int_a^b f^2(x) dx.$$

绕 y 轴旋转而成的旋转体体积为:

$$V_y = 2\pi \int_a^b x f(x) dx.$$

例 3.2.32. 设 $D : x^2 + y^2 \leq 4x, y \leq -x$, 在 D 的边界 $y = -x$ 上任取一点 P , 设 P 到原点的距离为 t , 作 PQ 垂直 $y = -x$, 交 D 的边界 $x^2 + y^2 = 4x$ 于点 Q .

(1) 试将 P, Q 的距离 $|PQ|$ 表示为 t 的函数;

(2) 求 D 绕 $y = -x$ 旋转一周的旋转体的体积.

(1) P 点的坐标为 $\left(\frac{t}{\sqrt{2}}, -\frac{t}{\sqrt{2}}\right)$, 所以直线 PQ 的方程为

$$y = x - \sqrt{2} (0 \leq t \leq 2\sqrt{2})$$

由 $\begin{cases} y = x - \sqrt{2} \\ x^2 + y^2 = 4x \end{cases}$ 解得点 Q 的横坐标为

$$x_Q = 1 + \frac{t}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2}\sqrt{4 + 4\sqrt{2}t - 2t^2}$$

$$\text{所以 } |PQ| = \sqrt{2} \left(\frac{t}{\sqrt{2}} - x_Q \right) = \sqrt{2} \left(\frac{1}{2}\sqrt{4 + 4\sqrt{2}t - 2t^2} - 1 \right).$$

(2) 所求旋转体体积为

$$\begin{aligned} V &= \pi \int_0^{2\sqrt{2}} |PQ|^2 dt = 2\pi \int_0^{2\sqrt{2}} \left(\frac{1}{2}\sqrt{4 + 4\sqrt{2}t - 2t^2} - 1 \right)^2 dt \\ &= \frac{20}{3}\sqrt{2}\pi - 2\sqrt{2}\pi^2. \end{aligned}$$

例 3.2.33. 求曲线 $y = e^{-x}\sqrt{\sin x}$ ($x \geq 0$) 与 x 轴围成区域绕 x 轴旋转一周所得旋转体体积.

由曲线可知定义域 $x \in [2n\pi, (2n+1)\pi]$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), 那么体积为

$$\begin{aligned} V_n &= \sum_{n=0}^{\infty} \int_{2n\pi}^{(2n+1)\pi} \pi y^2 dx = \sum_{n=0}^{\infty} \int_{2n\pi}^{(2n+1)\pi} \pi e^{-2x} \sin x dx = -\frac{\pi}{5} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-2x} (2 \sin x + \cos x) \Big|_{2n\pi}^{(2n+1)\pi} \\ &= \frac{\pi}{5} \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-(4n+2)\pi} + e^{-4n\pi}) = \frac{\pi}{5} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-2n\pi} = \frac{\pi}{5} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - e^{-2n\pi}}{1 - e^{-2\pi}} = \frac{\pi}{5(1 - e^{-2\pi})}. \end{aligned}$$

平面曲线的弧长

定理 3.2.14 (平面曲线弧长公式). 若平面曲线的方程为 $y = f(x)$ ($a \leq x \leq b$), 则 x 介于 a 与 b 之间的曲线弧长为:

$$s = \int_a^b \sqrt{1 + (y')^2} dx = \int_a^b \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx.$$

若方程由极坐标给出: $r = r(\theta)$ ($\alpha \leq \theta \leq \beta$), 则 θ 介于 α 与 β 之间的曲线弧长为:

$$s = \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{r^2(\theta) + [r'(\theta)]^2} d\theta.$$

若方程由参数方程给出: $x = \varphi(t)$, $y = \psi(t)$ ($\alpha \leq t \leq \beta$), 则 t 介于 α 与 β 之间的曲线弧长为:

$$s = \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{[\varphi'(t)]^2 + [\psi'(t)]^2} dt.$$

例 3.2.34. 计算 $\int_L |y| ds$, 其中 L 为双纽线 $(x^2 + y^2)^2 = a^2(x^2 - y^2)$ ($a > 0$).

令 $\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \end{cases}$ 代入直角坐标系方程, 得 $r^2 = a^2(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) = a^2 \cos 2\theta$, 由 $r = 0$ 得 $\theta = \frac{\pi}{4}$, 从而双纽线在第一象限部分的方程为 $r^2 = a^2 \cos 2\theta$, $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{4}$, 并且

$$ds = \sqrt{r^2 + (r')^2} d\theta = \sqrt{a^2 \cos 2\theta + \frac{a^4 \sin^2 2\theta}{r^2}} d\theta = \frac{a}{\sqrt{\cos 2\theta}} d\theta$$

$$\text{由对称性 } \int_L |y| ds = 4 \int_0^{\frac{\pi}{4}} r \sin \theta \cdot \frac{a}{\sqrt{\cos 2\theta}} d\theta = 4a^2 \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin \theta d\theta = 4a^2 \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right).$$

例 3.2.35 (2010 数二). 当 $0 \leq \theta \leq \pi$ 时, 求对数螺线 $r = e^\theta$ 的弧长.

$$s = \int_0^{\pi} \sqrt{r^2 + (r')^2} d\theta = \sqrt{2} \int_0^{\pi} e^\theta d\theta = \sqrt{2}(e^\pi - 1).$$

例 3.2.36 (2011 数一). 求曲面 $y = \int_0^x \tan t dt$ ($0 \leq x \leq \frac{\pi}{4}$) 的弧长 s .

因为 $y' = \tan x$, 所以

$$s = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sqrt{1 + \tan^2 x} dx = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sec x dx = \ln |\sec x + \tan x| \Big|_0^{\frac{\pi}{4}} = \ln(1 + \sqrt{2}).$$

例 3.2.37 (2019 数二). 求曲线 $y = \ln \cos x$ ($0 \leq x \leq \frac{\pi}{6}$) 的弧长.

$$\text{与例题 3.2.36 同样地, } s = \int_0^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{1 + \tan^2 x} dx = \frac{1}{2} \ln 3.$$

例 3.2.38. 点 P 在曲线 $\begin{cases} x = a \cos^3 t \\ y = a \sin^3 t \end{cases}$ ($t \in [0, \frac{\pi}{2}]$, $a > 0$) 上两点 $A(a, 0)$ 与 $B(0, a)$ 之间, 并且曲线 BP 的长度是曲线 AP 长度的 3 倍, 求 P 点坐标.

设 P 点坐标为 $(a \cos^3 t_0, a \sin^3 t_0)$, 并且弧微分

$$ds = \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2} dt = \sqrt{(-3a \cos^2 t \cdot \sin t)^2 + (3a \sin^2 t \cdot \cos t)^2} dt = \sqrt{9a^2 \sin^2 t \cos^2 t} dt = \frac{3a}{2} |\sin 2t| dt$$

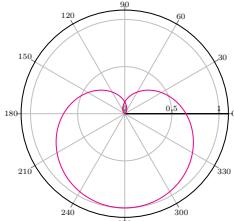
则曲线 AP 的长度是曲线 AB 长度的 $\frac{1}{4}$, 因此有

$$\int_0^{t_0} ds = \frac{1}{4} \int_0^{\frac{\pi}{2}} ds \Rightarrow \int_0^{t_0} \sin 2t dt = \frac{1}{4} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin 2t dt \Rightarrow \cos 2t_0 = \frac{1}{2} \Rightarrow t_0 = \frac{\pi}{6}$$

于是 P 点坐标为 $\left(\frac{3\sqrt{3}a}{8}, \frac{a}{8}\right)$.

例 3.2.39. 求曲线弧 $r = a \sin^3 \frac{\theta}{3}$ ($a > 0$) 的全长.

错解. 弧微分 $ds = \sqrt{r^2(\theta) + [r'(\theta)]^2} d\theta = \sqrt{a^2 \sin^6 \frac{\theta}{3} + a^2 \sin^4 \frac{\theta}{3} \cos^2 \frac{\theta}{3}} d\theta = a \sin^2 \frac{\theta}{3} d\theta$, 那么弧长为



$$l = \int_0^{2\pi} a \sin^2 \frac{\theta}{3} d\theta = a \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\theta}{3} \right) d\theta = \frac{a}{2} \left(\theta - \frac{3}{2} \sin \frac{2\theta}{3} \right) \Big|_0^{2\pi} = \pi a + \frac{3\sqrt{3}a}{8}.$$

错因: θ 的变化范围并不是 $[0, 2\pi]$, 事实上, 当 $\theta = 0$ 时 $r = 0$, 当 θ 从 0 开始增大时, r 也从 0 开始增大, 当 $\theta = \frac{3\pi}{2}$ 时, $r = a$ 达到最大; 根据对称性, 当 θ 继续增大时, θ 减少, 当 θ 增大到 3π 时, r 减少到 0, 此时, 点 (r, θ) 的轨迹已经形成一条封闭曲线, 可见, θ 的变化范围是 $[0, 3\pi]$.

图 3.2.1

$$l = \int_0^{3\pi} a \sin^2 \frac{\theta}{3} d\theta = \frac{a}{2} \left(\theta - \frac{3}{2} \sin \frac{2\theta}{3} \right) \Big|_0^{3\pi} = \frac{3a\pi}{2}.$$

3.2.6 定积分的物理应用

例 3.2.40. 设心形线为 $r = a(1 + \cos \theta)$ ($a > 0$), 试用定积分计算:

- (1) 它所围成的图形的面积 A ; (2) 它的长度 L ; (3) 它所围成的图形 D 的重心 (D 的密度为 1); (4) 它自身的重心 C ; (5) 它绕极轴旋转所得闭曲面所围立体的体积 V ; (6) 它绕极轴旋转所得闭曲面的面积 S ; (7) 它对极轴的转动惯量 I (线密度为 1).

$$(1) A = 2 \cdot \frac{1}{2} \int_0^\pi a^2 (1 + \cos \theta)^2 d\theta = a^2 \int_0^\pi (1 + 2 \cos \theta + \cos^2 \theta) d\theta = \frac{3\pi}{2} a^2.$$

$$(2) L = 2 \int_0^\pi \sqrt{r^2(\theta) + [r'(\theta)]^2} d\theta = 2\sqrt{2}a \int_0^\pi \sqrt{1 + \cos \theta} d\theta = 4a \int_0^\pi \cos \frac{\theta}{2} d\theta = 8a.$$

(3) 设重心坐标 C 为 (ξ, η) , D 在极轴上方的一半区域为 D_1 , 由对称性知 $\eta = 0$, 下求 ξ ,

法一: 用静力矩微元法, 这里从略.

法二: 利用二重积分求 ξ ,

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{1}{M} \iint_{D_1} \rho x d\sigma = \frac{1}{M} \int_0^\pi d\theta \int_0^{a(1+\cos\theta)} r^2 \cos \theta dr = \frac{a^3}{3M} \int_0^\pi (1 + \cos \theta)^3 \cos \theta d\theta \\ &= \frac{a^3}{3M} \int_0^\pi (\cos \theta + 3 \cos^2 \theta + 3 \cos^3 \theta + \cos^4 \theta) d\theta = \frac{5a}{6} \end{aligned}$$

$$\text{其中 } M = \frac{1}{2} A \cdot \rho = \frac{1}{2} A = \frac{3\pi}{4} a^2.$$

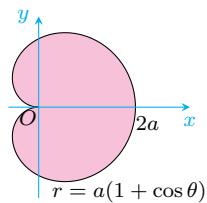


图 3.2.2

- (4) 设心形线 Γ 的上半条为 Γ_1 , 设 Γ, Γ_1 的重心分别为 (ξ, η) 和 (ξ_1, η_1) , 由对称性知 $\xi = \xi_1, \eta = \eta_1 = 0$, 因为 Γ_1 对 y 轴的静力矩微元为

$$dM_y = r(\theta) \cos \theta \cdot \rho ds = r(\theta) \cos \theta \sqrt{r^2(\theta) + [r'(\theta)]^2} d\theta$$

从而, 有

$$\begin{aligned} M_y &= \int_0^\pi dM_y = \int_0^\pi r(\theta) \cos \theta \sqrt{r^2(\theta) + [r'(\theta)]^2} d\theta = \sqrt{2}a^2 \int_0^\pi (1 + \cos \theta)^{\frac{3}{2}} \cos \theta d\theta \\ &= 4a^2 \int_0^\pi \left(2 \cos^5 \frac{\theta}{2} - \cos^3 \frac{\theta}{2} \right) d\theta \stackrel{\frac{\theta}{2}=t}{=} 8a^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} (2 \cos^5 t - \cos^3 t) dt = \frac{16a^2}{5} \end{aligned}$$

由有 (2) 知, Γ 的长度为 $8a$, 于是 Γ 的质量为 $M = \frac{L}{2} \cdot \rho = 4a$ 所以 $\xi = \frac{M_y}{M_1} = \frac{4a}{5}$, 从而知 $C\left(\frac{4a}{5}, 0\right)$.

(5) 由 $r = a(1 + \cos \theta)$ 可得

$$x = a(1 + \cos \theta) \cos \theta = a \left[\left(\cos \theta + \frac{1}{2} \right)^2 - \frac{1}{4} \right] \geq -\frac{a}{4}, \quad y = a(1 + \cos \theta) \sin \theta$$

体积元 $dV = \pi y^2(\theta) dx(\theta)$, 于是

$$\begin{aligned} V &= \int_{\frac{2\pi}{3}}^0 \pi y^2(\theta) dx(\theta) - \int_{\frac{2\pi}{3}}^\pi \pi y^2(\theta) dx(\theta) = \int_\pi^0 y^2(\theta) dx(\theta) \\ &= \int_\pi^0 \pi [a(1 + \cos \theta)]^2 [a(1 + \cos \theta) \cos \theta]' d\theta = \pi a^3 \int_0^\pi \sin^3 \theta (1 + \cos \theta)^2 (1 + 2 \cos \theta) d\theta \\ &\stackrel{\cos \theta = t}{=} \pi a^3 \int_1^{-1} (t^2 - 1)(1+t)^2(1+2t) dt = \pi a^3 \int_{-1}^1 (1+4t^2-5t^4) dt = \frac{8\pi}{3} a^3. \end{aligned}$$

(6) 因为 $dS = 2\pi y(\theta) ds(\theta) = 2\pi r(\theta) \sin \theta \sqrt{r^2(\theta) + [r'(\theta)]^2} d\theta$, 所以, 有

$$\begin{aligned} S &= \int_0^\pi 2\pi r(\theta) \sin \theta \sqrt{r^2(\theta) + [r'(\theta)]^2} d\theta = 2\sqrt{2}\pi a^2 \int_0^\pi \sin \theta (1 + \cos \theta)^{\frac{3}{2}} d\theta \\ &= -2\sqrt{2}\pi a^3 \int_0^\pi (1 + \cos \theta)^{\frac{3}{2}} d(1 + \cos \theta) = \frac{32\pi}{5} a^2. \end{aligned}$$

(7) 因为 $dI = y^2(\theta) \rho ds(\theta) = r^2(\theta) \sin^2 \theta \sqrt{r^2(\theta) + [r'(\theta)]^2} d\theta$, 所以, 有

$$\begin{aligned} I &= 2 \int_0^\pi r^2(\theta) \sin^2 \theta \sqrt{r^2(\theta) + [r'(\theta)]^2} d\theta = 2\sqrt{2}a^3 \int_0^\pi \sin^2 \theta (1 + \cos \theta)^{\frac{5}{2}} d\theta \\ &= 64a^3 \int_0^\pi \sin^2 \frac{\theta}{2} \cos^7 \frac{\theta}{2} d\theta \stackrel{\frac{\theta}{2}=t}{=} 128a^3 \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\cos^7 t - \cos^9 t) dt = \frac{2048}{315} a^3. \end{aligned}$$

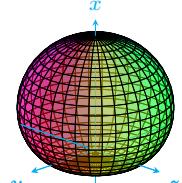


图 3.2.3

3.2.7 定积分综合性问题

积分等式命题的证明

例 3.2.41. 设 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上有二阶导数, 且 $f''(x)$ 在 $[a, b]$ 上黎曼可积, 证明:

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \int_a^x (x-t)f''(t)dt, \forall x \in [a, b].$$

证法一 由 $N-L$ 公式,

$$\begin{aligned} f(x) &= f(a) + \int_a^x f'(t)dt = f(a) + \int_a^x f'(a)dt + \int_a^x dt \int_a^t f''(u)du \\ &= f(a) + f'(a)(x-a) + \int_a^x dt \int_t^x f''(u)du = f(a) + f'(a)(x-a) + \int_a^x (x-t). \end{aligned}$$

证法二 即证 $\int_a^x (x-t)f''(t)dt = f(x) - f(a) - f'(a)(x-a)$, 由表格积分法:

$$\begin{array}{c|ccc} f' & | & (x-t) & 1 & 0 \\ \hline & | & + \searrow & - \searrow & \\ \int & | & f''(t) & f'(t) & f(t) \end{array}$$

于是 $\int_a^x (x-t)f''(t)dt = [(x-t)f'(t) - f(t)]_a^x = -f(x) - (x-a)f'(a) + f(a)$, 整理得证.

例 3.2.42. 设 $f(x) \in D(0, 1)$, $f(0) = f(1) = -2$, $\int_0^1 f(x)dx = 0$, 证明: $\exists \xi \in (0, 1)$, 使得 $f'(\xi) - f(\xi) = \xi$.

证 令 $F(x) = e^{-x}(f(x) + x + 1)$, 有 $F(0) = -1$, $F(1) = 0$, 因为 $\int_0^1 f(x)dx = 0$, 由积分中值定理知, $\exists \eta \in (0, 1)$, 使得

$$\int_0^1 f(x)dx = f(\eta) \int_0^1 dx = f(\eta) = 0$$

而 $F(\eta) = e^{-\eta}(f(\eta) + \eta + 1) > 0$, 因此 $\exists \xi \in (0, 1)$, 使得 $F(x) \leq F(\xi)$, 即 $F(x)$ 的最大值一定在区间 $(0, 1)$ 内取到, 由 Fermat 引理知, $F'(\xi) = 0$, 即

$$-\frac{d}{dx}(e^{-x}(f(x) + x + 1))|_{x=\xi} = f'(\xi) - f(\xi) = \xi.$$

例 3.2.43. 设 $f(x)$ 在 $[2, 4]$ 上二阶连续可导, $f(3) = 0$, 证明: $\exists \xi \in (2, 4)$, 使得 $f''(\xi) = 3 \int_2^4 f(x)dx$.

证 构造 $F(x) = \int_2^x f(t)dt$, 那么将 $F(2), F(4)$ 分别在 $x = 3$ 处 Taylor 展开, 有

$$\begin{aligned} F(2) &= F(3) + F'(3)(2-3) + \frac{1}{2!}F''(3)(2-3)^2 + \frac{1}{3!}F'''(\xi_1)(2-3)^3 \\ F(4) &= F(3) + F'(3)(4-3) + \frac{1}{2!}F''(3)(4-3)^2 + \frac{1}{3!}F'''(\xi_2)(4-3)^3 \end{aligned}$$

注意到 $F(2) = F'(3) = 0$, 那么上式化为 $\begin{cases} 0 = F(3) + \frac{1}{2}F''(3) - \frac{1}{6}F'''(\xi_1) \\ F(4) = F(3) + \frac{1}{2}F''(3) + \frac{1}{6}F'''(\xi_2) \end{cases}$ 即

$$F(4) = \frac{1}{6}(F'''(\xi_1) + F'''(\xi_2))$$

因为 $F'''(x) = f''(x)$ 在 $[2, 4]$ 上连续, 故 $F'''(x)$ 在 $[2, 4]$ 上有最大值 M 和最小值 m , 使得

$$m \leq \frac{1}{2}(F'''(\xi_1) + F'''(\xi_2)) \leq M$$

又由连续函数的介值定理知 $\exists \xi \in (\xi_1, \xi_2) \subset (2, 4)$, 使得

$$F'''(\xi) = \frac{1}{2}(F'''(\xi_1) + F'''(\xi_2))$$

故 $F(4) = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2}(F'''(\xi_1) + F'''(\xi_2)) = \frac{1}{3}F'''(\xi)$, 则

$$F'''(\xi) = 3F(4) \Rightarrow f''(\xi) = 3 \int_2^4 f(x)dx.$$

例 3.2.44. 设 $f(x)$ 在 $[-1, 1]$ 二阶导函数连续, 证明: $\exists \xi \in [-1, 1]$, 使得

$$\int_{-1}^1 xf(x)dx = \frac{1}{3}[2f'(\xi) + \xi f''(\xi)].$$

证 构造 $F(x) = xf(x)$, 那么 $F(x)$ 在 $[-1, 1]$ 二阶导函数连续, 并且

$$F'(x) = f(x) + xf'(x), \quad F''(x) = 2f'(x) + xf''(x)$$

又由 Taylor 展开得,

$$F(x) = F(0) + F'(0)x + \frac{1}{2!}F''(\theta x)x^2 \quad \theta \in (0, 1)$$

且 $F(0) = 0, F'(0) = f(0)x$, 于是 $F(x) = f(0)x + \frac{1}{2}F''(\theta x)x^2$, 两边对 x 积分, 则有,

$$\int_{-1}^1 F(x)dx = \int_{-1}^1 f(0)x dx + \frac{1}{2} \int_{-1}^1 F''(\theta x)x^2 dx = \frac{F''(\theta x)}{2} \int_{-1}^1 x^2 dx$$

记 $m = \min_{0 \leq x \leq 1} F''(x)$, $M = \max_{0 \leq x \leq 1} F''(x)$, 于是

$$m \int_{-1}^1 x^2 dx \leq \int_{-1}^1 F''(\theta x)x^2 dx \leq M \int_{-1}^1 x^2 dx$$

即 $\frac{2}{3}m \leq \int_{-1}^1 F''(\theta x)x^2 dx \leq \frac{2}{3}M$, 因此有 $m \leq \int_{-1}^1 F(x)dx \leq M$, 对 $F''(x)$ 利用连续函数的介值定理, 即 $\exists \xi \in [-1, 1]$, 使得 $3 \int_{-1}^1 F(x)dx = F''(\xi)$, 即得证.

例 3.2.45. 已知 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上二阶可导, $f(a) = f(b) = 0$, 试证: $\exists \xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{1}{12}f''(\xi)(a-b)^3.$$

证 令 $F(x) = \int_a^x f(t)dt - \frac{1}{2}(x-a)f(x)$, $G(x) = -\frac{1}{12}(x-a)^3$, 在 $[a, b]$ 上连续两次应用 Cauchy 中值定理,

$$\begin{aligned} \frac{\int_a^b f(x)dx - 0}{-\frac{1}{12}(b-a)^3 - 0} &= \frac{F(b) - F(a)}{G(b) - G(a)} \xrightarrow[a \leq \xi_1 \leq b]{Cauchy \text{ 中值定理}} \frac{F''(\xi_1)}{G'(\xi_1)} \\ &= \frac{\frac{1}{2}f(\xi_1) - \frac{1}{2}(\xi_1 - a)f'(\xi) - 0}{-\frac{1}{4}(\xi_1 - a)^2 - 0} \xrightarrow[a \leq \xi \leq \xi_1]{Cauchy \text{ 中值定理}} \frac{-\frac{1}{2}f''(\xi)(\xi - a)}{-\frac{1}{2}(\xi - a)} = f''(\xi). \end{aligned}$$

此式同乘 $-\frac{1}{12}(b-a)^3 = \frac{1}{12}(b-a)^3$, 即得所求.

例 3.2.46. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上二阶可导, 证明至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = f(b)(b-a) - f'(b)\frac{(b-a)^2}{2} + \frac{1}{6}(b-a)^3f''(\xi).$$

证 令 k 为使 $\int_a^b f(x)dx = f(b)(b-a) - f'(b)\frac{(b-a)^2}{2} + \frac{1}{6}(b-a)^3k$ 成立的实常数, 构造辅助函数

$$F(x) = \int_a^x f(t)dt - f(x)(x-a) + f'(x)\frac{(x-a)^2}{2} - \frac{1}{6}(x-a)^3k$$

则 $F(a) = F(b) = 0$, 故由 Rolle 定理知 $\exists \xi \in (a, b)$, 使 $F'(\xi) = 0$, 即

$$F'(\xi) = f''(\xi)\frac{(\xi-a)^2}{2} - \frac{1}{2}(\xi-a)^2k = 0$$

得证 $k = f''(\eta)$, 故得证.

例 3.2.47. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上具有二阶连续的导数, 证明存在 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = (b-a)f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{1}{24}(b-a)^3f''(\xi).$$

证法一 将 $f(x)$ 在 $\frac{a+b}{2}$ 处进行 Taylor 展开, 有

$$f(x) = f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f'\left(\frac{a+b}{2}\right)\left(x - \frac{a+b}{2}\right) + \frac{f''(\xi_1)}{2!}\left(x - \frac{a+b}{2}\right)$$

因为 $f''(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 所以存在最小值 m 和最大值 M , 使 $\forall x \in [a, b]$, $m \leq f''(x) \leq M$, 于是

$$m \int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2 dx \leq \int_a^b f''(\xi_1) \left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2 dx \leq M \int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2 dx$$

从而 $m \leq \frac{\int_a^b f''(\xi_1) \left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2 dx}{\int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2 dx} \leq M$, 故由介值定理知, 存在 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$f''(\xi) = \frac{\int_a^b f''(\xi_1) \left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2 dx}{\int_a^b \left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2 dx}$$

即得证 $\int_a^b f(x)dx = (b-a)f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{1}{24}(b-a)^3f''(\xi)$.

证法二 令 $F(x) = \int_a^x f(t)dt$, 将 $F(x)$ 在 $x_0 = \frac{a+b}{2}$ 处 Taylor 展开得

$$F(x) = F(x_0) + F'(x_0)(x - x_0) + \frac{F''(x)}{2!}(x - x_0)^2 + \frac{F'''(\xi)}{3!}(x - x_0)^3$$

其中 ξ 介于 x_0 与 x 之间, 将 $x = a$ 和 $x = b$ 代入上式, 并相减得

$$F(b) - F(a) = (b-a)f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{1}{24}(b-a)^3 \frac{f''(\xi_1) + f''(\xi_2)}{2}$$

其中 $a < \xi_2 < \frac{a+b}{2} < \xi_1 < b$, 不妨设 $f''(\xi_1) \leq f''(\xi_2)$, 则 $f''(x_1) \leq \frac{f''(\xi_1) + f''(\xi_2)}{2} \leq f''(\xi_2)$, 由导函数 $f''(x)$

的 Darboux 定理或 $f''(x)$ 的连续性及介值定理知, $\exists \xi \in (\xi_1, \xi_2)$ 或 $(\xi_2, \xi_1) \subset (a, b)$, 使 $f''(\xi) = \frac{f''(\xi_1) + f''(\xi_2)}{2}$, 故

$$\int_a^b f(x)dx = (b-a)f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{1}{24}(b-a)^3 f''(\xi).$$

证法三 设 k 为使 $\int_a^b f(x)dx = (b-a)f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{1}{24}(b-a)^3 k$ 成立的实数, 要证结论成立, 只需证 $k = f''(\xi)$, 为此构造辅助函数

$$F(x) = \int_a^x f(t)dt - (x-a)f\left(\frac{a+x}{2}\right) - \frac{1}{24}(x-a)^3 k$$

则 $F(a) = F(b) = 0$, 故由 Rolle 定理, $\exists \eta \in (a, b)$, 使 $F'(\eta) = 0$, 即

$$f(\eta) - f\left(\frac{a+\eta}{2}\right) - \frac{\eta-a}{2} f'\left(\frac{a+\eta}{2}\right) - \frac{k}{8}(\eta-a)^2 = 0$$

又将 $f(\eta)$ 在 $x = \frac{a+\eta}{2}$ 处进行 Taylor 展开, 有

$$f(\eta) = f\left(\frac{a+\eta}{2}\right) + f'\left(\frac{a+\eta}{2}\right) \frac{\eta-a}{2} + \frac{f''(\xi)}{2!} \left(\frac{\eta-a}{2}\right)^2$$

其中 $\xi \in \left(\frac{a+\eta}{2}, \eta\right) \subset (a, b)$, 比较上述两式, 得 $k = f''(\xi)$ 故得证.

证法四 取 $\rho \equiv 1$, 首先构造数值求积公式 $\int_a^b f(x)dx \approx A_0 f\left(\frac{a+b}{2}\right)$, 使其具有尽可能高的代数精度, 为此, 取 $f(x) = 1$ 使求积公式精确成立, 则有

$$A_0 = b - a$$

把 A_0 代入求积公式, 取 $f(x) = x$, 代入验算知求积公式精确成立; 再取 $f(x) = x^2$, 求积公式不精确成立, 故求积公式 $\int_a^b f(x)dx \approx (b-a)f\left(\frac{a+b}{2}\right)$ 的代数精度为 1; 其次, 构造一次插值多项式

$$P_1\left(\frac{a+b}{2}\right) = f\left(\frac{a+b}{2}\right), P'_1\left(\frac{a+b}{2}\right) = f'\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

那么 $W_2(x) = \left(x - \frac{a+b}{2}\right)^2$ 且不恒为 0, 又

$$K = \int_a^b W_2(x)dx = \frac{1}{12}(b-a)^3$$

那么至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = (b-a)f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{f''(\xi)}{2!} \cdot \frac{1}{12}(b-a)^3$$

即得待证等式.

例 3.2.48. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上具有二阶连续的导数, 证明存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{2}(f(a) + f(b)) - \frac{1}{12}f''(\xi)(b-a)^3.$$

证法一 设 k 为使 $\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{2}(f(a) + f(b)) - \frac{1}{12}k(b-a)^3$ 成立的实常数, 则证 $k = f''(\xi)$, 为此构造辅助函数

$$F(x) = \int_a^x f(t)dt - \frac{x-a}{2}(f(a) + f(x)) + \frac{1}{12}k(x-a)^3$$

那么 $F(a) = F(b) = 0$, 由 Rolle 定理知, $\exists \xi_1 \in (a, b)$, 使得 $F'(\xi_1) = 0$, 又

$$F'(x) = f(x) - \frac{1}{2}(f(x) + f(a)) - \frac{x-a}{2}f'(x) + \frac{1}{4}k(x-a)^2$$

并且注意到 $F'(a) = F'(\xi_1) = 0$, 再由 Rolle 定理知, $\exists \xi \in (a, \xi_1) \subset (a, b)$, 使得 $F''(\xi) = 0$, 并且

$$F''(\xi) = -\frac{\xi-a}{2}f''(\xi) + \frac{1}{2}k(\xi-a) = 0$$

即得证 $k = f''(\xi)$.

证法二 取 $\rho(x) \equiv 1$, 首先构造数值求积公式 $\int_a^b f(x)dx \approx A_0 f(a) + A_1 f(b)$, 使其具有尽可能高的代数精度, 为此, 分别取 $f(x) = 1, x$ 使求积公式精确成立, 则有

$$\begin{cases} A_0 + A_1 = \frac{b-a}{2} \\ aA_0 + bA_1 = \frac{b^2-a^2}{2} \end{cases} \Rightarrow A_0 = A_1 = \frac{b-a}{2}$$

把 A_0, A_1 代入求积公式, 取 $f(x) = x^2$, 代入验算知求积公式精确成立; 再取 $f(x) = x^3$, 求积公式不精确成立, 故求积公式 $\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{2}(f(a) + f(b))$ 的代数精度为 2; 其次, 构造二次插值多项式 $P_1(x)$, 使满足

$$P_1(a) = f(a), P'_1(b) = f'(b)$$

那么 $W_2(x) = (x-a)(x-b) \geq 0$ 且不恒为 0, 又

$$K = \int_a^b W_2(x)dx = -\frac{1}{6}(b-a)^3$$

那么至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{2}(f(a) + f(b)) - \frac{f''(\xi)}{2!} \cdot \frac{1}{6}(b-a)^3$$

即得待证等式.

例 3.2.49. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上有三阶连续的导数, 证明至少存在一点 $\eta \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{4} \left[f(a) + 3f\left(\frac{a+2b}{3}\right) \right] + \frac{(b-a)^4}{216} f'''(\eta).$$

证 令 k 为使 $\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{4} \left[f(a) + 3f\left(\frac{a+2b}{3}\right) \right] + \frac{(b-a)^4}{216} k$ 成立的实常数, 要证结论成立, 只需证 $k = f'''(\eta)$, 为此, 将上式右端移到左端, 并将 b 改写为 x , 构造辅助函数

$$F(x) = \int_a^x f(t)dt - \frac{x-a}{4} \left[f(a) + 3f\left(\frac{a+2x}{3}\right) \right] - \frac{(x-a)^4}{216} k, \quad x \in [a, b]$$

则 $F(a) = F(b) = 0$, $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续且可导, 由 Rolle 定理, $\exists \xi_1 \in (a, b)$, 使得 $F'(\xi_1) = 0$, 又

$$F'(x) = f(x) - \frac{1}{4} \left[f(a) + 3f\left(\frac{a+2x}{3}\right) \right] - \frac{x-a}{2} f'\left(\frac{a+2x}{3}\right) - \frac{(x-a)^3}{54} k$$

得 $F'(a) = F'(\xi_1) = 0$, 故对 $F'(x)$ 在 $[a, \xi_1]$ 上用 Rolle 定理, 得 $\exists \xi_2 \in (a, \xi_1) \subset (a, b)$, 使得 $F''(\xi_2) = 0$, 即

$$F''(\xi_2) = f'(\xi_2) - f'\left(\frac{a+2\xi_2}{3}\right) - \frac{\xi_2-a}{3} f''\left(\frac{a+2\xi_2}{3}\right) - \frac{(\xi_2-a)^2}{18} k = 0$$

再将 $f'(\xi_2)$ 在 $x = \frac{a+2\xi_2}{3}$ 处 Taylor 展开, 有

$$f'(\xi_2) = f'\left(\frac{a+2\xi_2}{3}\right) + f''\left(\frac{a+2\xi_2}{3}\right) \left(\xi_2 - \frac{a+2\xi_2}{3}\right) + \frac{1}{2!} f'''(\eta) \left(\xi_2 - \frac{a+2\xi_2}{3}\right)^2$$

其中 $\eta \in \left(\frac{a+2\xi_2}{3}, a\right) \subset (a, b)$, 比较上述两式, 即得 $k = f'''(\eta)$, 故得证.

例 3.2.50. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上有三阶连续的导数, 证明至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{4} \left[3f\left(\frac{2a+b}{3}\right) + f(b) \right] - \frac{(b-a)^4}{216} f'''(\xi).$$

证 令 k 为使 $\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{4} \left[3f\left(\frac{2a+b}{3}\right) + f(b) \right] - \frac{(b-a)^4}{216}k$ 成立的实常数, 要证结论成立, 只需证 $k = f'''(\eta)$, 为此, 构造辅助函数

$$F(x) = \int_x^b f(t)dt - \frac{b-x}{4} \left[3f\left(\frac{2x+b}{3}\right) + f(b) \right] + \frac{(b-x)^4}{216}k$$

则 $F(a) = F(b) = 0$, $F(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续且可导, 由 Rolle 定理, $\exists \xi_1 \in (a, b)$, 使得 $F'(\xi_1) = 0$, 又

$$F'(x) = -f(x) + \frac{1}{4} \left[3f\left(\frac{2x+b}{3}\right) + f(b) \right] - \frac{b-x}{2} f'\left(\frac{2x+b}{3}\right) - \frac{(b-x)^3}{54}k$$

得 $F'(\xi_1) = F'(b) = 0$, 故对 $F'(x)$ 在 $[\xi_1, b]$ 上用 Rolle 定理, 得 $\exists \xi_2 \in (\xi_1, b) \subset (a, b)$, 使得 $F''(\xi_2) = 0$, 即

$$F''(\xi_2) = -f'(\xi_2) + f'\left(\frac{2\xi_2+b}{3}\right) - \frac{b-\xi_2}{3} f''\left(\frac{2\xi_2+b}{3}\right) + \frac{(b-\xi_2)^2}{18}k$$

再将 $f'(\xi_2)$ 在 $x = \frac{2\xi_2+b}{3}$ 处 Taylor 展开, 有

$$f'(\xi_2) = f'\left(\frac{2\xi_2+b}{3}\right) + f''\left(\frac{2\xi_2+b}{3}\right)\left(\xi_2 - \frac{2\xi_2+b}{3}\right) + \frac{1}{2!} f'''(\eta)\left(\xi_2 - \frac{2\xi_2+b}{3}\right)^2$$

其中 $\eta \in \left(\frac{2\xi_2+b}{3}\right) \subset (a, b)$, 比较上述两式, 即得 $k = f'''(\eta)$, 故得证.

例 3.2.51. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上具有四阶连续导数, 证明存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{6} \left[f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right] - \frac{(b-a)^5}{2880} f^{(4)}(\xi).$$

证法一 令 $\begin{cases} a = c-h \\ b = c+h \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c = \frac{a+b}{2} \\ h = \frac{b-a}{2} \end{cases}$ 那么原式等价于

$$\int_{c-h}^{c+h} f(x)dx = \frac{h}{3} [f(c-h) + 4f(c) + f(c+h)] - \frac{h^5}{90} f^{(4)}(\xi)$$

设 k 为使上式成立的实常数, 并构造

$$F(x) = \int_{c-x}^{c+x} f(t)dt - \frac{x}{3} [f(c-x) + 4f(c) + f(c+x)] + \frac{x^5}{90} k$$

下证 $k = f^{(4)}(\xi)$, 因为 $F(0) = F(x) = 0$, 由 Rolle 定理得, $\exists \xi_1 \in (0, x)$, 使得 $F'(\xi_1) = 0$ 又

$$\begin{aligned} F'(x) &= f(c+x) + f(c-x) - \frac{1}{3} [f(c-x) + 4f(c) + f(c+x)] - \frac{x}{3} [-f'(c-x) + f'(c+x)] + \frac{x^4}{18} k \\ &= \frac{2}{3} [f(c+x) + f(c-x)] + \frac{x}{3} [f'(c-x) - f'(c+x)] + \frac{x^4}{18} k - \frac{4}{3} f(c) \end{aligned}$$

因为 $F'(0) = F'(\xi_1)$, 由 Rolle 定理得, $\exists \xi_2 \in (0, \xi_1)$, 使得 $F''(\xi_2) = 0$, 且

$$\begin{aligned} F''(x) &= \frac{2}{3} [f'(c+x) - f'(c-x)] + \frac{1}{3} [f'(c-x) - f'(c+x)] + \frac{x}{3} [-f''(c-x) - f''(c+x)] + \frac{2x^3}{9} k \\ &= \frac{1}{3} [f'(c+x) - f'(c-x)] - \frac{x}{3} [f''(c-x) + f''(c+x)] + \frac{2x^3}{9} k \end{aligned}$$

又因为 $F''(0) = F''(\xi_2)$, 由 Rolle 定理得, $\exists \xi_3 \in (0, \xi_2)$, 使得 $F'''(\xi_3) = 0$, 且

$$\begin{aligned} F'''(x) &= \frac{1}{3} [f''(c+x) + f''(c-x)] - \frac{1}{3} [f''(c-x) + f''(c+x)] - \frac{x}{3} [-f'''(c-x) + f'''(c+x)] + \frac{2x^2}{3} k \\ &= \frac{x}{3} [f'''(c-x) - f'''(c+x)] + \frac{2x^2}{3} k \end{aligned}$$

由 Lagrange 中值定理得, $\exists \xi \in (c-\xi_3, c+\xi_3)$, 使得 $f'''(c-\xi_3) - f'''(c+\xi_3) = -2\xi_3 f^{(4)}(\xi)$, 那么

$$-\frac{2}{3} \xi_3^2 f^{(4)}(\xi) + \frac{2}{3} \xi_3^2 k = 0 \Rightarrow k = f^{(4)}(\xi)$$

得证 $k = f^{(4)}(x)$, 即原命题成立.

证法二 取 $\rho(x) \equiv 1$, 首先构造数值求积公式 $\int_a^b f(x)dx \approx A_0 \cdot f(a) + A_1 \cdot f\left(\frac{a+b}{2}\right) + A_2 \cdot f(b)$, 使其具有尽可能高的代数精度, 为此, 分别取 $f(x) = 1, x, x^2$ 使求积公式精确成立, 则有

$$\begin{cases} A_0 + A_1 + A_2 = \frac{b-a}{b^2-a^2} \\ aA_0 + \frac{a+b}{2}A_1 + bA_2 = \frac{2}{b^3-a^3} \\ a^2A_0 + \left(\frac{a+b}{2}\right)^2A_1 + b^2A_2 = \frac{3}{b^3-a^3} \end{cases}$$

那么有增广矩阵

$$\begin{aligned} (\mathbf{A} : \mathbf{B}) &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & : & b-a \\ a & \frac{a+b}{2} & b & : & \frac{b^2-a^2}{2} \\ a^2 & \left(\frac{a+b}{2}\right)^2 & b^2 & : & \frac{b^3-a^3}{3} \end{pmatrix} \xrightarrow[r_2-ar_1]{r_3-a^2r_1} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & : & b-a \\ 0 & \frac{b-a}{2} & b-a & : & \frac{(-b+a)^2}{2} \\ 0 & \frac{(b+a)^2-a^2}{4} & b^2-a^2 & : & \frac{(-b+a)^2(b+2a)}{3} \end{pmatrix} \\ &\xrightarrow[r_3-\frac{2[\frac{1}{4}(a+b)^2-a^2]}{b-a}r_2]{r_3 \times \frac{2}{(a-b)^2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & : & b-a \\ 0 & \frac{b-a}{2} & b-a & : & \frac{(-b+a)^2}{2} \\ 0 & 0 & 1 & : & \frac{b-a}{6} \end{pmatrix} \xrightarrow[r_2+(a-b)r_3]{r_1-r_3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & : & \frac{(-5)(-b+a)}{6} \\ 0 & \frac{b-a}{2} & 0 & : & \frac{(-b+a)^2}{3} \\ 0 & 0 & 1 & : & \frac{b-a}{6} \end{pmatrix} \\ &\xrightarrow[r_2 \times \frac{2}{b-a}]{r_1-r_2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & : & \frac{b-a}{6} \\ 0 & 1 & 0 & : & \frac{(-2)(-b+a)}{3} \\ 0 & 0 & 1 & : & \frac{b-a}{6} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

取 $f(x) = x^3$, 代入验算知求积公式精确成立; 再令 $f(x) = x^4$, 求积公式不精确成立, 于是

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{6} \left[f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right]$$

其次, 构造三次插值多项式 $P_3(x)$, 使满足

$$P_3(a) = f(a), P_3\left(\frac{a+b}{2}\right) = f\left(\frac{a+b}{2}\right), P_3(b) = f(b), P'_3(b) = f'(b)$$

那么 $W_4(x) = (x-a)\left(x - \frac{a+b}{2}\right)(x-b)^2 \geq 0$ 且不恒为 0, 又

$$K = \int_a^b W_4(x)dx = -\frac{1}{120}(b-a)^5$$

那么至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{6} \left[f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right] - \frac{f^{(4)}(\xi)}{4!} \cdot \frac{(b-a)^5}{120}$$

即得待证等式.

例 3.2.52. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上三阶可导, 证明至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{3}(2f(a) + f(b)) + \frac{(b-a)^2}{6}f'(a) - \frac{f'''(\xi)}{72}(b-a)^4.$$

证 取 $\rho \equiv 1$, 首先构造数值求积公式 $\int_a^b f(x)dx \approx A_0 \cdot f(a) + A_1 \cdot f(b) + B_0 \cdot f'(a)$, 使其具有尽可能高的代数精度, 为此, 分别取 $f(x) = 1, x, x^2$ 使求积公式精确成立, 则有

$$\begin{cases} A_0 + A_1 = b-a \\ aA_0 + bA_1 + B_0 = \frac{b^2-a^2}{2} \\ a^2A_0 + b^2A_1 + 2aB_0 = \frac{b^3-a^3}{3} \end{cases}$$

那么有增广矩阵

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{A} : \mathbf{B}) &= \left(\begin{array}{ccc|cc} 1 & 1 & 0 & b-a \\ a & b & 1 & \frac{b^2-a^2}{2} \\ a^2 & b^2 & 2a & \frac{b^3-a^3}{3} \end{array} \right) \xrightarrow{\substack{r_2-ar_1 \\ r_3-a^2r_1}} \left(\begin{array}{ccc|cc} 1 & 1 & 0 & b-a \\ 0 & b-a & 1 & \frac{1}{2}(-b+a)^2 \\ 0 & b^2-a^2 & 2a & \frac{1}{3}(-b+a)^2(b+2a) \end{array} \right) \\
 &\xrightarrow{\substack{r_3-\frac{b^2-a^2}{b-a}r_2 \\ r_3 \times \frac{1}{a-b}}} \left(\begin{array}{ccc|cc} 1 & 1 & 0 & b-a \\ 0 & b-a & 1 & \frac{1}{2}(-b+a)^2 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{6}(-b+a)^2 \end{array} \right) \xrightarrow{\substack{r_2-r_3 \\ r_2 \times \frac{1}{b-a} \\ r_1-r_2}} \left(\begin{array}{ccc|cc} 1 & 0 & 0 & \frac{1}{3}(-2)(-b+a) \\ 0 & 1 & 0 & \frac{b-a}{3} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{6}(-b+a)^2 \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

取 $f(x) = x^3$, 代入验算知求积公式精确成立; 再令 $f(x) = x^4$, 求积公式不精确成立, 于是

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{3}(2f(a)+f(b))+\frac{(b-a)^2}{6}f'(a)$$

其次, 构造二次插值多项式 $P_2(x)$, 使满足

$$P_2(a) = f(a), P'_2(a) = f'(a), P_2(b) = f(b)$$

那么 $W_3(x) = (x-a)^2(x-b) \leq 0$ 且不恒为 0, 又

$$K = \int_a^b W_3(x)dx = -\frac{1}{12}(b-a)^4$$

那么至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{3}(2f(a)+f(b))+\frac{(b-a)^2}{6}f'(a)-\frac{f'''(\xi)}{3!} \cdot \frac{1}{12}(b-a)^4$$

即得待证等式.

例 3.2.53. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上四阶可导, 证明至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{2}(f(a)+f(b))-\frac{(b-a)^2}{12}(f'(b)-f'(a))+\frac{f^{(4)}(\xi)}{720}(b-a)^5.$$

证法一 由定理 2.5.3, 以及插值定理知, $f(x) = H_3(x) + R(x)$, 其中

$$H_3(x) = \left(1+2\frac{x-a}{b-a}\right)\left(\frac{x-b}{a-b}\right)^2 f(a) + \left(1+2\frac{x-b}{a-b}\right)\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 f(b) + (x-a)\left(\frac{x-b}{a-b}\right)^2 f'(a) + (x-b)\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 f'(b)$$

以及

$$R(x) = \frac{f^{(4)}(\xi)}{720}(b-a)^4 x$$

并且可以证明

$$\int_a^b \left(1+2\frac{x-a}{b-a}\right)\left(\frac{x-b}{a-b}\right)^2 dx = \int_a^b \left(1+2\frac{x-b}{a-b}\right)\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 dx = \frac{b-a}{2}$$

以及

$$\int_a^b (x-a)\left(\frac{x-b}{a-b}\right)^2 dx = -\int_a^b (x-b)\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 dx = \frac{(b-a)^2}{12}$$

于是

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^b H_3(x)dx + \int_a^b R(x)dx = \frac{b-a}{2}(f(a)+f(b))-\frac{(b-a)^2}{12}(f'(b)-f'(a))+\frac{f^{(4)}(\xi)}{720}(b-a)^5.$$

证法二 取 $\rho \equiv 1$, 首先构造数值求积公式 $\int_a^b f(x)dx \approx A_0 \cdot f(a) + A_1 \cdot f(b) + B_0 \cdot f'(a) + B_1 \cdot f'(b)$, 使其具有尽可能高的代数精度, 为此, 分别取 $f(x) = 1, x, x^2, x^3$ 使求积公式精确成立, 则有增广矩阵

$$(\mathbf{A} : \mathbf{B}) = \left(\begin{array}{cccc|cc} 1 & 1 & 0 & 0 & b-a \\ a & b & 1 & 1 & \frac{b^2-a^2}{2} \\ a^2 & b^2 & 2a & 2b & \frac{b^3-a^3}{3} \\ a^3 & b^3 & 3a^2 & 3b^2 & \frac{b^4-a^4}{4} \end{array} \right) \xrightarrow{i=1,2,3} \left(\begin{array}{cccc|cc} 1 & 1 & 0 & 0 & b-a \\ 0 & b-a & 1 & 1 & \frac{(b-a)^2}{2} \\ 0 & b^2-a^2 & 2a & 2b & \frac{(b-a)^2(b+2a)}{3} \\ 0 & b^3-a^3 & 3a^2 & 3b^2 & \frac{(b^4-4a^3b+3a^4)}{4} \end{array} \right)$$

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{ccccc|c}
1 & 1 & 0 & 0 & b-a \\
0 & b-a & 1 & 1 & \frac{(b-a)^2}{2} \\
0 & 0 & -b+a & b-a & \frac{(b-a)^3}{6} \\
0 & 0 & -b^2-ab+2a^2 & 2b^2-ab-a^2 & \frac{(b-a)^3(b+a)}{4}
\end{array} \\
\stackrel{r_3 - \frac{b^2-a^2}{b-a} r_2}{\longrightarrow} \\
\begin{array}{ccccc|c}
1 & 1 & 0 & 0 & b-a \\
0 & b-a & 1 & 1 & \frac{(b-a)^2}{2} \\
0 & 0 & a-b & b-a & \frac{(b-a)^3}{6} \\
0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{(b-a)^2}{12}
\end{array} \\
\stackrel{r_4 - \frac{2a^2-ab-b^2}{a-b} r_3}{\longrightarrow} \\
\begin{array}{ccccc|c}
1 & 1 & 0 & 0 & b-a \\
0 & b-a & 1 & 1 & \frac{(b-a)^2}{2} \\
0 & 0 & a-b & b-a & \frac{(b-a)^3}{6} \\
0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{(b-a)^2}{12}
\end{array} \\
\stackrel{r_4 \times \frac{1}{(a-b)^2}}{\longrightarrow} \\
\begin{array}{ccccc|c}
1 & 1 & 0 & 0 & b-a \\
0 & b-a & 0 & 0 & \frac{(b-a)^2}{2} \\
0 & 0 & 1 & 0 & \frac{(b-a)^2}{12} \\
0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{(b-a)^2}{12}
\end{array} \\
\stackrel{r_3 \times \frac{1}{a-b}}{\longrightarrow} \\
\begin{array}{ccccc|c}
1 & 1 & 0 & 0 & b-a \\
0 & b-a & 0 & 0 & \frac{(b-a)^2}{2} \\
0 & 0 & 1 & 0 & \frac{(b-a)^2}{12} \\
0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{(b-a)^2}{12}
\end{array} \\
\stackrel{r_2-r_3}{\longrightarrow} \\
\begin{array}{ccccc|c}
1 & 1 & 0 & 0 & b-a \\
1 & 1 & 0 & 0 & \frac{b-a}{2} \\
1 & 1 & 0 & 0 & \frac{b-a}{2} \\
1 & 1 & 0 & 0 & -\frac{b-a}{12}
\end{array} \\
\stackrel{r_2 \times \frac{1}{b-a}}{\longrightarrow} \\
\begin{array}{ccccc|c}
1 & 1 & 0 & 0 & b-a \\
1 & 1 & 0 & 0 & \frac{b-a}{2} \\
1 & 1 & 0 & 0 & \frac{b-a}{2} \\
1 & 1 & 0 & 0 & -\frac{b-a}{12}
\end{array}
\end{array}$$

取 $f(x) = x^4$, 代入验算知求积公式精确成立; 再令 $f(x) = x^5$, 求积公式不精确成立, 于是

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{2}(f(a) + f(b)) - \frac{(b-a)^2}{12}(f'(b) - f'(a))$$

其次, 构造三次插值多项式 $P_3(x)$, 使满足

$$P_3^{(l)}(a) = f^{(l)}(a), P_3^{(l)}(b) = f^{(l)}(b) (l = 0, 1)$$

那么 $W_4(x) = (x-a)^2(x-b)^2 \geq 0$ 且不恒为 0, 又

$$K = \int_a^b W_4(x)dx = \frac{1}{30}(b-a)^5$$

那么至少存在一点 $\xi \in (a, b)$, 使得

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{2}(f(a) + f(b)) - \frac{(b-a)^2}{12}(f'(b) - f'(a)) + \frac{f^{(4)}(\xi)}{4!} \cdot \frac{1}{30}(b-a)^5$$

即得待证等式.

例 3.2.54. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上具有连续导数, 证明:

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

证 将区间 $[a, b]$ 等分为 n 份, 记 $h = \frac{b-a}{n}$, $x_k = a + kh$, $k = 0, 1, \dots, n$, 则

$$I = \lim_{n \rightarrow \infty} n \left[\int_a^b f(x)dx - \frac{b-a}{n} \sum_{k=1}^n f\left(a + \frac{k(b-a)}{n}\right) \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} n \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} (f(x) - f(x_k))dx$$

由 Lagrange 中值定理, $\exists \xi_k(x) \in (x, x_k)$, 使得 $f(x) - f(x_k) = (x-x_k)f'(\xi_k(x))$, 于是

$$I = -\lim_{n \rightarrow \infty} n \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} f'(\xi_k(x))(x_k - x)dx$$

由 $f'(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 故由最值定理知, $\exists m_k, M_k \in [x_{k-1}, x_k]$, 使得 $m_k \leq f'(\xi_k(x)) \leq M_k$, 故

$$\frac{1}{2}m_k h^2 = m_k \int_{x_{k-1}}^{x_k} (x_k - x)dx \leq \int_{x_{k-1}}^{x_k} f'(\xi_k(x))(x_k - x)dx \leq M_k \int_{x_{k-1}}^{x_k} (x_k - x)dx = \frac{1}{2}M_k h^2$$

即 $m_k \leq \frac{2}{h^2} \int_{x_{k-1}}^{x_k} f'(\xi_k(x))(x_k - x)dx \leq M$, 又有介值定理 $\exists \eta_k \in [x_{k-1}, x_k]$, 使得

$$f'(\eta_k) = \frac{2}{h^2} \int_{x_{k-1}}^{x_k} f'(\xi_k(x))(x_k - x)dx \Rightarrow \frac{h^2}{2} f'(\eta_k) = \int_{x_{k-1}}^{x_k} f'(\xi_k(x))(x_k - x)dx$$

即

$$I = -\lim_{n \rightarrow \infty} n \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} f'(\xi_k(x))(x_k - x)dx = -\lim_{n \rightarrow \infty} n \sum_{k=1}^n \frac{h^2}{2} f'(\eta_k) = -\frac{b-a}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n f'(\eta_k) h$$

又因为 $f'(x)$ 在 $[a, b]$ 上可积, 应用定积分的定义, 即得

$$I = -\frac{b-a}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n f'(\eta_k) h = -\frac{b-a}{2} \int_a^b f'(x)dx = -\frac{b-a}{2} (f(b) - f(a)).$$

例 3.2.55 (2012 东南大学). 已知函数 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上有二阶连续导数, 记

$$B_n = \int_a^b f(x)dx - \frac{b-a}{n} \sum_{i=1}^n f\left(a + \frac{2i-1}{2} \cdot \frac{b-a}{n}\right),$$

试证:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n^2 B_n = \frac{(b-a)^2}{24} (f'(b) - f'(a)).$$

证 将 $[a, b]$ 进行 n 等分, $h = \frac{b-a}{n}$, $x_0 = a, x_1 = a+h, \dots, x_i = a+ih, \dots, x_n = a+nh = b$, 则

$$B_n = \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} \left[f(x) - f\left(a + \frac{2i-1}{2} h\right) \right] dx$$

在 $[x_{i-1}, x_i]$ 上应用 $f(x)$ 在 $a + \frac{2i-1}{2} h$ 处 Taylor 展开, 则在 x 与 $a + \frac{2i-1}{2} h$ 之间必存在 ξ_i , 使得

$$f(x) = f\left(a + \frac{2i-1}{2} h\right) + f'\left(a + \frac{2i-1}{2} h\right) \left(x - a - \frac{2i-1}{2} h\right) + \frac{1}{2} f''(\xi_i) \left(x - a - \frac{2i-1}{2} h\right)^2$$

于是有

$$\begin{aligned} B_n &= \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} \left[f'\left(a + \frac{2i-1}{2} h\right) \left(x - a - \frac{2i-1}{2} h\right) + \frac{1}{2} f''(\xi_i) \left(x - a - \frac{2i-1}{2} h\right)^2 \right] dx \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} f''(\xi_i) \left(x - a - \frac{2i-1}{2} h\right)^2 dx \end{aligned}$$

因为 $f''(x)$ 在 $[x_{i-1}, x_i]$ 上连续, 应用最值定理, $f''(x)$ 在 $[x_{i-1}, x_i]$ 上必存在最大值 M_i 和最小值 m_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 于是

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f''(\xi_i) \left(x - a - \frac{2i-1}{2} h\right)^2 dx \leq M_i \int_{x_{i-1}}^{x_i} \left(x - a - \frac{2i-1}{2} h\right)^2 dx = \frac{M_i h^3}{12}$$

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f''(\xi_i) \left(x - a - \frac{2i-1}{2} h\right)^2 dx \geq m_i \int_{x_{i-1}}^{x_i} \left(x - a - \frac{2i-1}{2} h\right)^2 dx = \frac{m_i h^3}{12}$$

则

$$m_i \leq \frac{12}{h^3} \int_{x_{i-1}}^{x_i} f''(\xi_i) \left(x - a - \frac{2i-1}{2} h\right)^2 dx \leq M_i$$

又有介值定理, 必存在 $\eta_i \in [x_{i-1}, x_i]$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 使得

$$\frac{12}{h^3} \int_{x_{i-1}}^{x_i} f''(\xi_i) \left(x - a - \frac{2i-1}{2} h\right)^2 dx = f''(\eta_i)$$

由于 $f''(x)$ 在 $[a, b]$ 上可积, 应用定积分的定义, 则有

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} n^2 B_n &= \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{12} f''(\eta_i) h^3 = \frac{(b-a)^2}{24} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f''(\eta_i) \frac{b-a}{n} \\ &= \frac{(b-a)^2}{24} \int_a^b f''(x)dx = \frac{(b-a)^2}{24} (f'(b) - f'(a)). \end{aligned}$$

例 3.2.56. 设 $f(x) \in C^4[0, 1]$, 且满足 $\int_0^1 f(x)dx + 3f\left(\frac{1}{2}\right) = 8 \int_{\frac{1}{4}}^{\frac{3}{4}} f(x)dx$, 证明: $\exists c \in (0, 1)$, 使得 $f^{(4)}(c) = 0$.

证 因为 $\int_0^1 f(x)dx \xlongequal{x=t+\frac{1}{2}} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} f\left(t + \frac{1}{2}\right)dt$, $\int_{\frac{1}{4}}^{\frac{3}{4}} f(x)dx \xlongequal{x=\frac{t}{2}+\frac{1}{2}} \frac{1}{2} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} f\left(\frac{t}{2} + \frac{1}{2}\right)dt$, 所以

$$\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} f\left(t + \frac{1}{2}\right)dt - 4 \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} f\left(\frac{t}{2} + \frac{1}{2}\right)dt + 3f\left(\frac{1}{2}\right) = 0$$

令 $g(x) = f\left(x + \frac{1}{2}\right) + f\left(-x + \frac{1}{2}\right)$, $h(x) = g(x) - 4g\left(\frac{x}{2}\right)$, 那么

$$h(0) = -3g(0) = -6f\left(\frac{1}{2}\right) \Rightarrow f\left(\frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{2}h(0)$$

那么

$$\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} f\left(t + \frac{1}{2}\right)dt - 4 \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} f\left(\frac{t}{2} + \frac{1}{2}\right)dt - \frac{1}{2}h(0) = 0 \Rightarrow \int_0^{\frac{1}{2}} h(t)dt - \frac{1}{2}h(0) = 0 \Rightarrow \frac{1}{2} \int_0^{\frac{1}{2}} h(t)dt = h(0)$$

因为 $m = \min_{x \in [0, 1]} h(x) \leq h(0) \leq \max_{x \in [0, 1]} h(x) = M$, 所以 $\exists \xi_1 \in (0, \frac{1}{2})$, 使得 $h'(\xi_1) = 0$, 又

$$h'(x) = g'(x) - 2g'\left(\frac{x}{2}\right), g'(x) = f'\left(x + \frac{1}{2}\right) - f\left(-x + \frac{1}{2}\right)$$

所以 $h'(0) = 0 = h'(\xi_1)$, 由 Rolle 定理知, $\exists \xi_2 \in (0, \xi_1) \subset \left(0, \frac{1}{2}\right)$, 使得 $h''(\xi_2) = 0$, 又

$$h''(x) = g''(x) - g''\left(\frac{x}{2}\right), g''(x) = f''\left(x + \frac{1}{2}\right) + f''\left(-x + \frac{1}{2}\right)$$

所以 $h''(\xi_2) = g''(\xi_2) = g''\left(\frac{\xi_2}{2}\right)$, 由 Rolle 定理知, $\exists \xi_3 \in \left(\frac{\xi_2}{2}, \xi_2\right) \subset \left(0, \frac{1}{2}\right)$, 使得 $g'''(\xi_3) = 0$, 而

$$g'''(x) = f'''\left(x + \frac{1}{2}\right) - f'''\left(-x + \frac{1}{2}\right)$$

所以 $f'''\left(\xi_3 + \frac{1}{2}\right) = f'''\left(-\xi_3 + \frac{1}{2}\right)$, 再由 Rolle 定理知, $\exists c \in \left(-\xi_3 + \frac{1}{2}, \xi_3 + \frac{1}{2}\right) \subset (0, 1)$ 使得 $f^{(4)}(c) = 0$.

积分不等式命题的证明

例 3.2.57. 证明 $\frac{\sqrt{3}}{2}\pi \leq \int_0^1 \sqrt{\frac{x^2 - x + 1}{x - x^2}} dx \leq \pi$.

证 $\forall x \in [0, 1]$, $\frac{3}{4} \leq x^2 - x + 1 = \left(x - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4} \leq 1$, 所以

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{x-x^2}} \leq \int_0^1 \sqrt{\frac{x^2-x+1}{x-x^2}} dx \leq \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{x-x^2}}$$

$$\int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{x-x^2}} = \int_0^1 \frac{d\left(x - \frac{1}{2}\right)}{\sqrt{\frac{1}{4} - \left(x - \frac{1}{2}\right)^2}} = \arcsin(2x-1) \Big|_0^1 = \pi, \quad \frac{\sqrt{3}}{2}\pi \leq \int_0^1 \sqrt{\frac{x^2-x+1}{x-x^2}} dx \leq \pi.$$

例 3.2.58. 证明: $\int_0^{\sqrt{2\pi}} \sin(x^2) dx > \frac{2 - \sqrt{2}}{2\sqrt{\pi}}$.

证 令 $t = x^2$, 则 $dx = \frac{dt}{2\sqrt{t}}$, 于是

$$f(x) = \int_0^{2\pi} \sin \frac{dt}{2\sqrt{t}} = \int_0^\pi \frac{\sin t}{2\sqrt{t}} dt + \underbrace{\int_\pi^{2\pi} \frac{\sin t}{2\sqrt{t}} dt}_{u=t-\pi} = \int_0^\pi \left(\frac{\sin t}{2\sqrt{t}} - \frac{\sin t}{2\sqrt{t+\pi}} \right) dt = \frac{1}{2} \int_0^\pi \left(\frac{2}{\sqrt{t}} - \frac{1}{\sqrt{t+\pi}} \right) \sin t dt$$

令 $g(t) = \frac{1}{\sqrt{t}} - \frac{1}{\sqrt{t+\pi}}$, $t \in (0, \pi)$, 那么 $g'(t) = -\frac{1}{2}t^{-\frac{3}{2}} + \frac{1}{2}(t+\pi)^{-\frac{3}{2}} < 0$, 则 $g(t)$ 在 $[0, \pi]$ 上单调递减, 所以 $g(t) > g_{min}(t) = g(\pi) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}}$, 则

$$f(x) > \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right) \int_0^\pi \sin t dt = \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} = \frac{2 - \sqrt{2}}{2\sqrt{\pi}}.$$

例 3.2.59. 证明: $\int_0^1 \frac{\sin x}{\sqrt{1-x^2}} dx < \int_0^1 \frac{\cos x}{\sqrt{1-x^2}} dx$.

证 只需证 $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(\cos t) dt < \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(\sin t) dt$, 即证

$$\sin(\cos t) < \cos(\sin t) \quad x \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$$

因为在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 内 $\cos x \searrow$, 所以 $x > \sin x$, 所以有 $\cos(\sin x) > \cos x > \sin(\cos x)$ 得证.

推论 3.2.3. 证明: $\frac{2}{\pi} < \int_0^1 \frac{\sin x}{\sqrt{1-x^2}} dx < 1 < \int_0^1 \frac{\cos x}{\sqrt{1-x^2}} dx < \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2\pi} < \frac{\pi}{2}$.

证 在 $(0, 1)$ 内, 有 $\frac{2}{\pi}x < \sin x < x$, 所以

$$\frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{x}{\sqrt{1-x^2}} dx < \int_0^1 \frac{\sin x}{\sqrt{1-x^2}} dx < \int_0^1 \frac{x}{\sqrt{1-x^2}} dx$$

又 $\int_0^1 \frac{x}{\sqrt{1-x^2}} dx = \left(-\sqrt{1-x^2}\right)_0^1 = 1$, 所以 $\frac{2}{\pi} < \int_0^1 \frac{\sin x}{\sqrt{1-x^2}} dx < 1$; 又因为在 $(0, 1)$ 内, 有 $1 - \frac{x^2}{2} < \cos x < 1 - 2\left(\frac{x}{\pi}\right)^2$, 所以

$$1 < \frac{3\pi}{8} = \int_0^1 \frac{2-x^2}{\sqrt{1-x^2}} dx < \int_0^1 \frac{\cos x}{\sqrt{1-x^2}} dx < \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} - \frac{2}{\pi^2} \int_0^1 \frac{x^2 dx}{\sqrt{1-x^2}} = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2\pi} < \frac{\pi}{2}$$

综上: $\frac{2}{\pi} < \int_0^1 \frac{\sin x}{\sqrt{1-x^2}} dx < 1 < \int_0^1 \frac{\cos x}{\sqrt{1-x^2}} dx < \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2\pi} < \frac{\pi}{2}$.

例 3.2.60. 设 $a, b > 0$, 函数 $f(x)$ 在 $[-a, b]$ 上非负可积, 且有 $\int_{-a}^b xf(x) dx = 0$, 证明

$$\int_{-a}^b x^2 f(x) dx \leq ab \int_{-a}^b f(x) dx.$$

证 因为 $x \in [-a, b]$, 所以 $(x+a)(x-b) \leq 0 \Rightarrow x^2 - ab \leq (b-a)x$, 又 $f(x) \geq 0$, 所以有

$$\int_{-a}^b (x^2 - ab) f(x) dx \leq \int_{-a}^b (b-a)x f(x) dx$$

又 $\int_{-a}^b xf(x) dx = 0$, 进而得证 $\int_{-a}^b x^2 f(x) dx \leq ab \int_{-a}^b f(x) dx$.

例 3.2.61. 设 $f(x)$ 二阶可导, 且 $f''(x) \geq 0$, $g(x)$ 为连续函数, $a \geq 0$, 证明:

$$\frac{1}{a} \int_0^a f(g(x)) dx \geq f\left(\frac{1}{a} \int_0^a g(x) dx\right).$$

证 由 $f(x)$ 在 $x = x_0$ 处的 Taylor 展开,

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2!}f''(\xi)(x - x_0)^2$$

因为 $f''(\xi) \geq 0$, 所以有 $f(x) \geq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$, 现令

$$x = g(x), x_0 = \frac{1}{a} \int_0^a g(x) dx$$

于是有

$$f(g(x)) \geq f\left(\frac{1}{a} \int_0^a g(x) dx\right) + f'\left(\frac{1}{a} \int_0^a g(x) dx\right)\left(g(x) - \frac{1}{a} \int_0^a g(x) dx\right)$$

对上式两边同时在 $[0, a]$ 上积分, 则由积分的保序性, 有

$$\begin{aligned} \int_0^a f(g(x)) dx &\geq \int_0^a f\left(\frac{1}{a} \int_0^a g(x) dx\right) dx + \int_0^a f'\left(\frac{1}{a} \int_0^a g(x) dx\right)\left(g(x) - \frac{1}{a} \int_0^a g(x) dx\right) dx \\ &= af\left(\frac{1}{a} \int_0^a g(x) dx\right) + f'\left(\frac{1}{a} \int_0^a g(x) dx\right) \int_0^a \left(g(x) - \frac{1}{a} \int_0^a g(x) dx\right) dx = af\left(\frac{1}{a} \int_0^a g(x) dx\right) \end{aligned}$$

整理得证.

例 3.2.62. 设 $f : [0, 1] \rightarrow [-a, b]$ 连续, 且 $\int_0^1 f^2(x) dx = ab$, 证明 $0 \leq \frac{1}{b-a} \int_0^1 f(x) dx \leq \frac{1}{4} \left(\frac{a+b}{a-b}\right)^2$.

证 因为 $-a \leq f(x) \leq b$, 所以 $-\frac{a+b}{2} \leq f(x) - \frac{b-a}{2} \leq \frac{a+b}{2}$, 两边积分得

$$0 \leq \int_0^1 \left(f(x) - \frac{b-a}{2}\right)^2 dx \leq \left(\frac{a+b}{2}\right)^2$$

即 $0 \leq \int_0^1 f^2(x) dx - (b-a) \int_0^1 f(x) dx + \frac{(b-a)^2}{4} \leq \frac{(a+b)^2}{4}$, 将 $\int_0^1 f^2(x) dx = ab$ 代入, 并整理得

$$0 \leq (b-a) \int_0^1 f(x) dx \leq \frac{(b+a)^2}{4} \Rightarrow 0 \leq \frac{1}{b-a} \int_0^1 f(x) dx \leq \frac{1}{4} \left(\frac{a+b}{a-b}\right)^2.$$

例 3.2.63. 设函数 $f(x)$ 在 $[0, \pi]$ 上连续, $f(x) > 0$, 证明 $e^{\int_0^1 \ln f(x) dx} \leq \int_0^1 f(x) dx$.

证法一 将 $[0, 1]$ n 等分, 则 $\int_0^1 f(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n}\right)$,

$$\exp \int_0^1 \ln f(x) dx = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln f\left(\frac{i}{n}\right) = \exp \lim_{n \rightarrow \infty} \ln \left[\prod_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n}\right) \right]^{\frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\prod_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n}\right) \right]^{\frac{1}{n}}$$

由几何平均数 \leq 算术平均数, 得 $\left[\prod_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n}\right) \right]^{\frac{1}{n}} \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f\left(\frac{i}{n}\right)$, 故令 $n \rightarrow \infty$, 由定积分定义得 $e^{\int_0^1 \ln f(x) dx} \leq \int_0^1 f(x) dx$.

证法二 令 $A = \int_0^1 f(x) dx$, 则由 Taylor 公式得

$$\ln y = \ln A + \frac{1}{A}(y - A) - \frac{1}{2\xi^2}(y - A)^2 \leq \ln A + \frac{1}{A}(y - A)$$

其中 ξ 介于 y 与 A 之间, 令 $y = f(x)$, 代入上式, 再积分, 得

$$\int_0^1 \ln f(x) dx \leq \ln A + \frac{1}{A} \int_0^1 (f(x) - A) dx = \ln A = \ln \left(\int_0^1 f(x) dx \right)$$

故得 $e^{\int_0^1 \ln f(x) dx} \leq \int_0^1 f(x) dx$.

例 3.2.64. 设函数 $f(x)$ 在 $[0, 1]$ 上连续, 证明 $e^{\int_0^1 f(x) dx} \leq \int_0^1 e^{f(x)} dx$.

证 要证不等式两边取对数, 并且令 $g(x) = e^{f(x)}$, 即要证 $\int_0^1 \ln g(x) dx \leq \ln \left(\int_0^1 g(x) dx \right)$, 记 $s = \int_0^1 g(x) dx$, 因为 $g(x) > 0$, 所以 $s > 0$, $\frac{g(x)}{s} > 0$, $\frac{g(x)}{s} - 1 > -1$, 故由已知不等式: 当 $x > -1$ 时, $\ln(1+x) \leq x$, 可得

$$\begin{aligned} \int_0^1 (\ln g(x) - \ln s) dx &= \int_0^1 \ln \frac{g(x)}{s} dx = \int_0^1 \ln \left[1 + \left(\frac{g(x)}{s} - 1 \right) \right] dx \leq \int_0^1 \left(\frac{g(x)}{s} - 1 \right) dx \\ &= \frac{1}{s} \cdot \int_0^1 g(x) dx - 1 = 0 \end{aligned}$$

即得证 $e^{\int_0^1 f(x) dx} \leq \int_0^1 e^{f(x)} dx$.

推论 3.2.4. 设函数 $f(x)$ 在 $[0, 1]$ 上连续, 且 $f(x) > 0$, 则有

$$e^{\int_0^1 \ln f(x) dx} \leq \int_0^1 f(x) dx \leq \ln \left(\int_0^1 e^{f(x)} dx \right).$$

一般地, 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 且 $f(x) > 0$, 则

$$\ln \left((b-a) \left(\int_a^b \frac{dx}{f(x)} \right)^{-1} \right) \leq \frac{1}{b-a} \int_a^b \ln f(x) dx \leq \ln \left(\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \right).$$

更为一般地, 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, $g(x)$ 在 (a, b) 内二阶可导, $g''(x) < 0$, 则

$$g \left((b-a) \left(\int_a^b \frac{dx}{f(x)} \right)^{-1} \right) \leq \frac{1}{b-a} \int_a^b g(f(x)) dx \leq g \left(\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \right).$$

例 3.2.65. 设函数 $f(x)$ 在 $[0, 1]$ 上可导, $f(0) = 0$, 且当 $x \in [0, 1]$ 时, 有 $0 < f'(x) \leq 1$, 证明

$$\left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2 \geq \int_0^1 f^3(x) dx.$$

证法一 要证结论, 只需证明 $\left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2 \geq \int_0^1 f^3(x) dx \geq 0$, 为此, 令 $F(x) = \left(\int_0^x f(t) dt \right)^2 - \int_0^x f^3(t) dt$, $x \in [0, 1]$, 则 $f(0) = 0$, 且

$$F'(x) = f(x) \cdot \left[2 \int_0^x f(t) dt - f^2(x) \right]$$

故只需证当 $x \in [0, 1]$ 时, $F'(x) \geq 0$ 即可, 由题设 $f(0) = 0$, 且 $f'(x) > 0$ ($x \in [0, 1]$), 所以当 $x \in [0, 1]$ 时, $f(x) \geq f(0) = 0$, 而因为 $F'(x)$ 的符号不易确定, 故再令 $g(x) = 2 \int_0^x f(t) dt - f^2(x)$, 则 $g'(x) = 2f(x) \cdot (1-f'(x)) \geq 0$, 于是 $g(x) \geq g(0) = 0$,

从而 $F'(x) \geq 0$, 故当 $x \in [0, 1]$ 时, $F(x) \geq F(0) = 0$, 因而 $F(1) \geq 0$, 即得 $\left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2 \geq \int_0^1 f^3(x) dx$.

证法二 同证法一, $f(x) > 0$, 于是 $\int_0^1 f^3(x) dx > 0$, 故要证结论成立, 只需证明 $\frac{\left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2}{\int_0^1 f^3(x) dx} \geq 1$, 为此, 令 $F(x) =$

$\left(\int_0^x f(t) dt \right)^2$, $G(x) = \int_0^x f^3(t) dt$, 则两次用 Cauchy 中值定理, 有

$$\frac{\left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2}{\int_0^1 f^3(x) dx} = \frac{F(1) - F(0)}{G(1) - G(0)} = \frac{F'(\xi)}{G'(\xi)} = \frac{2 \int_0^\xi f(t) dt}{f^2(\xi)} = \frac{2 \int_0^\xi f(t) dt - 2 \int_0^0 f(t) dt}{f^2(\xi) - f^2(0)} = \frac{1}{f'(\eta)}$$

其中 $0 < \xi < 1$, $0 < \eta < \xi$, 而由 $f(\eta) > 0$, $0 < f'(\eta) \leq 1$, 即得 $\frac{\left(\int_0^1 f(x) dx \right)^2}{\int_0^1 f^3(x) dx} \geq 1$, 故得证.

例 3.2.66. 设 $f(x)$ 在 $[0, 1]$ 上可导, $f(0) = 0$, 且当 $x \in [0, 1]$ 时, 有 $f'(x) \geq 1$, 证明

$$\left(\int_0^1 f(x) dx \right)^3 \leq \frac{3}{4} \int_0^1 f^5(x) dx.$$

证 因为 $f'(x) \geq 1 > 0$, 且 $f(0) = 0$, 所以当 $x \in (0, 1)$ 时, 有 $f(x) > 0$, 则 $\frac{3}{4} \int_0^1 f^5(x) dx > 0$, 故要证结论成立, 即证

$$\frac{\left(\int_0^1 f(x) dx \right)^3}{\frac{3}{4} \int_0^1 f^5(x) dx} \leq 1, \text{ 为此, 令}$$

$$F(x) = \left(\int_0^x f(t) dt \right)^3, G(x) = \frac{3}{4} \int_0^x f^5(t) dt$$

则两次用 Cauchy 中值定理, 得

$$\begin{aligned} \frac{\left(\int_0^1 f(x) dx \right)^3}{\frac{3}{4} \int_0^1 f^5(x) dx} &= \frac{F(1) - F(0)}{G(1) - G(0)} = \frac{F'(\xi)}{G'(\xi)} = \frac{4 \left(\int_0^\xi f(t) dt \right)^2}{f^4(\xi)} = \left(\frac{2 \int_0^\xi f(t) dt}{f^2(\xi)} \right)^2 \\ &= \left(\frac{2 \int_0^\xi f(t) dt - 2 \int_0^0 f(t) dt}{f^2(\xi) - f^2(0)} \right)^2 = \frac{1}{[f'(\eta)]^2} \end{aligned}$$

其中 $0 < \xi < 1$, $0 < \eta < \xi$, 而 $f'(\eta) \geq 1$, 即得 $\frac{\left(\int_0^1 f(x) dx \right)^3}{\frac{3}{4} \int_0^1 f^5(x) dx} \leq 1$, 故得证.

推论 3.2.5. 设函数 $f(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上可导, 且 $f(0) = 0$, $0 < f'(x) \leq \lambda$ (λ 为正常数), 则对任意实数 $a > 0$ 及 $m > 1$, 证明

$$\left(\int_0^a f(x) dx \right)^m \geq \frac{m}{(2\lambda)^{m-1}} \int_0^a f^{2m-1}(x) dx.$$

证 因为 $0 < f'(x) \leq \lambda$, 且 $f(0) = 0$, 所以当 $x \in [0, +\infty)$ 时, $f(x) > 0$, 于是

$$\frac{m}{(2\lambda)^{m-1}} \int_0^a f^{2m-1}(x) dx > 0$$

故要证结论成立, 即证 $I = \frac{\left(\int_0^a f(x) dx \right)^m}{\frac{m}{(2\lambda)^{m-1}} \int_0^a f^{2m-1}(x) dx} \geq 1$, 令

$$F(x) = \left(\int_0^x f(t) dt \right)^m, G(x) = \frac{m}{(2\lambda)^{m-1}} \int_0^x f^{2m-1}(t) dt$$

则两次用 Cauchy 中值定理, 有

$$\begin{aligned} I &= \frac{F(a) - F(0)}{G(a) - G(0)} = \frac{F'(\xi)}{G'(\xi)} = \frac{\left(2\lambda \int_0^\xi f(t) dt \right)^{m-1}}{f^{2m-2}(\xi)} = \left(\frac{2\lambda \int_0^\xi f(t) dt}{f^2(\xi)} \right)^{m-1} \\ &= \left(\frac{2\lambda \int_0^\xi f(t) dt - 2\lambda \int_0^0 f(t) dt}{f^2(\xi) - f^2(0)} \right)^{m-1} = \frac{\lambda^{m-1}}{[f'(\eta)]^{m-1}} \end{aligned}$$

其中 $0 < \xi < a$, $0 < \eta < \xi$, 而由 $f(\eta) > 0$, $0 < f'(\eta) \leq \lambda$, 即 $I \geq 1$, 故得证.

例 3.2.67. 设 $f(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 连续, 在 $(0, +\infty)$ 上恒正, 且当 $x > 0$ 时, $f^3(x) \leq 3 \int_0^x f^2(t) dt$, 证明: 当 $x \geq 0$ 时, 恒有 $f(x) \leq x$.

法一：令 $F(x) = \int_0^x f^2(t)dt$, 那么 $F(x) > 0$, $F'(x) = f^2(x)$, 于是 $x > 0$ 时有,

$$[F'(x)]^{\frac{3}{2}} \leq 3F(x) \Rightarrow \frac{[F'(x)]^{\frac{3}{2}}}{F(x)} \leq 3 \Rightarrow \frac{F'(x)}{F^{\frac{2}{3}}(x)} \leq 3^{\frac{2}{3}} \Rightarrow \int_0^x \frac{F'(t)}{F^{\frac{2}{3}}(t)} dt \leq 3^{\frac{2}{3}}x$$

不等式左边有 $\int_0^x F^{-\frac{2}{3}}xdF(x) = 3F^{\frac{1}{3}}(x)\Big|_0^x = 3F^{\frac{1}{3}}(x)$, 即 $F^{\frac{2}{3}}(x) \leq 3^{-\frac{2}{3}}x^2$, 又因为 $\frac{F'(x)}{3^{\frac{2}{3}}} \leq F^{\frac{2}{3}}(x)$, 因此

$$\frac{F'(x)}{3^{\frac{2}{3}}} \leq F^{\frac{2}{3}}(x) \leq 3^{-\frac{2}{3}}x^2 \Rightarrow f^2(x) \leq x^2 \Rightarrow f(x) \leq x$$

当 $x \rightarrow 0^+$ 时, $f^3(0^+) \leq 0 \Rightarrow f(0) \leq 0$, 综上所述, 当 $x \geq 0$ 时, 恒有 $f(x) \leq x$.

法二：由题意可知, $f(x) \leq \sqrt[3]{\int_0^x f^2(t)dt}$, 记 $g(x) = \sqrt[3]{\int_0^x f^2(t)dt}$, 那么 $g'(x) = \frac{1}{3}\left(\int_0^x f^2(t)dt\right)^{-\frac{2}{3}} \cdot f^2(x)$, 在 $[0, x]$ 区间由 Lagrange 中值定理知,

$$g(x) - g(0) = g'(\xi) \cdot x \Rightarrow \sqrt[3]{\int_0^x f^2(t)dt} = \frac{1}{3}\left(\int_0^\xi f^2(t)dt\right)^{-\frac{2}{3}} f^2(\xi) \cdot x$$

由 $f^3(x) \leq 3 \int_0^x f^2(t)dt$, 可得 $\frac{1}{3}f^2(\xi) \leq \int_0^\xi f^2(t)dt$, 结合 $x^{-\frac{2}{3}}$ 关于 x 单调递减可得,

$$\left(\int_0^\xi f^2(t)dt\right)^{-\frac{2}{3}} \leq \left(\frac{1}{3}f^3(\xi)\right)^{-\frac{2}{3}} \Rightarrow f(x) \leq \sqrt[3]{3} \cdot \frac{1}{3}\left(\frac{1}{3}f^3(\xi)\right)^{-\frac{2}{3}} \cdot f^2(\xi) \cdot x = x$$

当 $x \rightarrow 0^+$ 时, $f^3(0^+) \leq 0 \Rightarrow f(0) \leq 0$, 综上所述, 当 $x \geq 0$ 时, 恒有 $f(x) \leq x$.

定理 3.2.15 (Cauchy-Schwarz 不等式). 函数 $f(x)$ 和 $g(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 则有

$$\left(\int_a^b f(x)g(x)dx\right)^2 \leq \int_a^b f^2(x)dx \int_a^b g^2(x)dx$$

等号当且仅当 $\alpha f(x) = \beta g(x)$ 时成立, 其中 α, β 是不同时为零的常数.

证法一 $\forall t \in \mathbb{R}$, $x \in [a, b]$, 有 $(tf(x) - g(x))^2 \geq 0$, 即

$$t^2 f^2(x) - 2tf(x)g(x) + g^2(x) \geq 0$$

于是有 $t^2 \int_a^b f^2(x)dx - 2t \int_a^b f(x)g(x)dx + \int_a^b g^2(x)dx \geq 0$, $\forall t \in \mathbb{R}$ 都成立.

(1) 当 $\int_a^b f^2(x)dx = 0$ 时, 由 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上的连续性知, $f(x) \equiv 0$, 此时要证的不等式中成立;

(2) 当 $\int_a^b f^2(x)dx > 0$ 时, 由于关于 t 的二次三项式恒大于零, 故它的判别式

$$\Delta = \left(2 \int_a^b f(x)g(x)dx\right)^2 - 4 \int_a^b f^2(x)dx \cdot \int_a^b g^2(x)dx \leq 0$$

即得 $\left(\int_a^b f(x)g(x)dx\right)^2 \leq \int_a^b f^2(x)dx \cdot \int_a^b g^2(x)dx$.

证法二 要证结论, 即证 $\int_a^b f^2(x)dx \cdot \int_a^b g^2(x)dx - \left(\int_a^b f(x)g(x)dx\right)^2 \geq 0$,

$$\begin{aligned} & \int_a^b f^2(x)dx \cdot \int_a^b g^2(x)dx - \left(\int_a^b f(x)g(x)dx\right)^2 \\ &= \frac{1}{2} \int_a^b f^2(x)dx \int_a^b g^2(y)dy + \frac{1}{2} \int_a^b f^2(y)dy \int_a^b g^2(x)dx - \int_a^b f(x)g(x)dx \int_a^b f(y)g(y)dy \\ &= \frac{1}{2} \iint_D [f^2(x)g^2(y) + f^2(y)g^2(x) - 2f(x)g(x)f(y)g(y)] dx dy = \frac{1}{2} \iint_D (f(x)g(y) - f(y)g(x))^2 dx dy \geq 0 \end{aligned}$$

其中 $D = \{(x, y) | a \leq x, y \leq b\}$, 故得 $\left(\int_a^b f(x)g(x)dx\right)^2 \leq \int_a^b f^2(x)dx \cdot \int_a^b g^2(x)dx$.

证法三 因为 $f(x), g(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 所以 $f(x), g(x), f(x)g(x)$ 在 $[a, b]$ 上可积, 将 $[a, b]$ n 等分, 取 $\Delta x = \frac{b-a}{n}$, $\xi_i = x_i + \frac{i}{n}(b-a)$, 则由离散情形的 Cauchy-Schwarz 不等式, 有

$$\left(\sum_{i=1}^n f(x_i)g(x_i)\right)^2 \leq \left(\sum_{i=1}^n f^2(x_i)\right)\left(\sum_{i=1}^n g^2(x_i)\right)$$

于是得 $\left(\frac{b-a}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i)g(x_i)\right)^2 \leq \left(\frac{b-a}{n} \sum_{i=1}^n f^2(x_i)\right)\left(\frac{b-a}{n} \sum_{i=1}^n g^2(x_i)\right)$, 故令 $n \rightarrow \infty$ 两边取极限, 由定积分定义得 $\left(\int_a^b f(x)g(x)dx\right)^2 \leq \int_a^b f^2(x)dx \int_a^b g^2(x)dx$.

证法四 构作辅助积分上限函数, 将要证不等式中的 b 改为 x , 并移项, 令

$$F(x) = \left(\int_a^x f(t)g(t)dt\right)^2 - \int_a^x f^2(t)dt \cdot \int_a^x g^2(t)dt$$

则有 $F(a) = 0, \forall x \in [a, b]$,

$$\begin{aligned} F'(x) &= 2 \int_a^x f(t)g(t)dt \cdot f(x)g(x) - f^2(x) \int_a^x g^2(t)dt - g^2(x) \int_a^x f^2(t)dt \\ &= - \int_a^x [f^2(x)g^2(t) - 2f(x)f(t)g(x)g(t) + f^2(t)g^2(x)] dt \\ &= - \int_a^x [f(x)g(t) - f(t)g(x)]^2 dt \leq 0, \end{aligned}$$

于是 $\forall x \in [a, b], F(x) \leq F(a) = 0$, 从而 $F(b) \leq 0$, 即得证.

例 3.2.68. 已知 $f(x)$ 在闭区间 $[0, 1]$ 上的连续函数, 且满足 $\int_0^1 f(x)dx = 1$, 求函数 $f(x)$, 使得 $I = \int_0^1 (1+x^2)f^2(x)dx$ 取得最小值.

由 Cauchy-Schwarz 不等式,

$$I^2 = \left(\int_0^1 f(x)dx\right)^2 = \left(\int_0^1 \sqrt{1+x^2}f(x) \cdot \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}dx\right)^2 \leq \int_0^1 (1+x^2)f^2(x)dx \cdot \int_0^1 \frac{dx}{1+x^2}$$

所以 $I_{min} = \frac{4}{\pi}$, 为此, 只需要函数 $f(x)$ 满足

$$\int_0^1 \frac{4}{\pi} f(x)dx = \int_0^1 (1+x^2)f^2(x)dx = \frac{4}{\pi} \Rightarrow f(x) = \frac{4}{\pi(1+x^2)}.$$

例 3.2.69. 设 $a > 0$ 为常数, 证明不等式

$$\int_0^\pi x a^{\sin x} dx \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} a^{-\cos x} dx \geq \frac{\pi^3}{4}.$$

证 令 $x = \frac{\pi}{2} + t$, 那么

$$\int_0^\pi x a^{\sin x} dx = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{\pi}{2} + t\right) a^{\sin(\frac{\pi}{2}+t)} dt = \frac{\pi}{2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} a^{\cos t} dt + \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} t a^{\cos t} dt = \pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} a^{\cos t} dt$$

于是由 Cauchy-Schwarz 不等式得

$$\int_0^\pi x a^{\sin x} dx \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} a^{-\cos x} dx = \pi \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} a^{\cos x} dx\right) \cdot \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} a^{-\cos x} dx\right) \geq \pi \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} a^{\frac{\cos x}{2}} \cdot a^{\frac{-\cos x}{2}} dx\right)^2 = \frac{\pi^3}{4}$$

故得证.

例 3.2.70. 已知 $f(x)$ 在 $[0, 1]$ 上连续, 且 $1 \leq f(x) \leq 3$, 证明 $1 \leq \int_0^1 f(x)dx \cdot \int_0^1 \frac{1}{f(x)}dx \leq \frac{4}{3}$.

证 先证左边不等式, 由 *Cauchy-Schwarz 不等式*

$$\int_0^1 f(x)dx \cdot \int_0^1 \frac{1}{f(x)}dx \geq \int_0^1 dx = 1$$

再证右边不等式, 因为 $1 \leq f(x) \leq 3$, 所以

$$(f(x) - 1)(3 - f(x)) \geq 0 \Rightarrow f(x) + \frac{3}{f(x)} \leq 4$$

再由 *A-G 不等式* 得

$$\sqrt{\int_0^1 f(x)dx \cdot \int_0^1 \frac{3}{f(x)}dx} \leq \frac{1}{2} \left(\int_0^1 f(x)dx + \int_0^1 \frac{3}{f(x)}dx \right) \leq 2$$

所以

$$\int_0^1 f(x)dx \cdot \int_0^1 \frac{3}{f(x)}dx \leq 4 \Rightarrow \int_0^1 f(x)dx \cdot \int_0^1 \frac{1}{f(x)}dx \leq \frac{4}{3}$$

综上 $1 \leq \int_0^1 f(x)dx \cdot \int_0^1 \frac{1}{f(x)}dx \leq \frac{4}{3}$.

推论 3.2.6. 设 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 且 $0 < m \leq f(x) \leq M$, 则有

$$(b-a)^2 \leq \int_a^b f^{-1}(x)dx \cdot \int_a^b f(x)dx \leq \frac{(m+M)^2}{4mM}(b-a)^2$$

证 由 *Cauchy-Schwarz 不等式*:

$$\int_a^b f^{-1}(x)dx \cdot \int_a^b f(x)dx \geq \left(\int_a^b \sqrt{f^{-1}(x)} \cdot \sqrt{f(x)}dx \right)^2 = (b-a)^2$$

$$\frac{(f(x)-m)(f(x)-M)}{f(x)} = f(x) - (M+m) + \frac{mM}{f(x)} \leq 0 \Rightarrow f(x) + \frac{mM}{f(x)} \leq M+m$$

从而 $\int_a^b \left[f(x) + \frac{mM}{f(x)} \right] dx \leq (M+m)(b-a)$, 且 $ab \leq \frac{(a+b)^2}{4}$,

$$\text{所以 } \int_a^b \frac{mM}{f(x)}dx \cdot \int_a^b f(x)dx \leq \frac{1}{4} \int_a^b \left[f(x) + \frac{mM}{f(x)} \right]^2 dx \leq \frac{(m+M)^2(b-a)^2}{4}$$

综上 $(b-a)^2 \leq \int_a^b f^{-1}(x)dx \cdot \int_a^b f(x)dx \leq \frac{(m+M)^2}{4mM}(b-a)^2$.

例 3.2.71. 设函数 $f(x)$ 在 $[0, 1]$ 上具有一阶连续的导数, 且 $\int_0^{\frac{1}{2}} f(x)dx = 0$, 证明

$$\int_0^1 [f'(x)]^2 dx \geq 12 \left(\int_0^1 f(x)dx \right)^2.$$

证法一 由题设 $\int_0^{\frac{1}{2}} f(x)dx = 0$ 及分部积分公式得

$$\int_0^{\frac{1}{2}} xf'(x)dx = xf(x) \Big|_0^{\frac{1}{2}} - \int_0^{\frac{1}{2}} f(x)dx$$

于是

$$\begin{aligned} \left(\int_0^1 f(x)dx \right)^2 &= \left(\int_0^{\frac{1}{2}} f(x)dx + \int_{\frac{1}{2}}^1 f(x)dx \right)^2 = \left[\int_{\frac{1}{2}}^1 \left(f(x) - f\left(\frac{1}{2}\right) \right) + \frac{1}{2}f\left(\frac{1}{2}\right) \right]^2 \\ &= \left(\int_{\frac{1}{2}}^1 dx \int_{\frac{1}{2}}^x f'(t)dt + \int_0^{\frac{1}{2}} xf'(x)dx \right)^2 = \left(\int_{\frac{1}{2}}^1 dt \int_t^1 f'(t)dx + \int_0^{\frac{1}{2}} xf'(x)dx \right)^2 \\ &= \left(\int_{\frac{1}{2}}^1 (1-t)f'(t)dt + \int_0^{\frac{1}{2}} xf'(x)dx \right)^2 \end{aligned}$$

由不等式 $(a+b)^2 \leq 2(a^2 + b^2)$ 及 *Cauchy-Schwarz* 不等式, 有

$$\begin{aligned} \text{上式右端} &\leq 2 \left[\left(\int_{\frac{1}{2}}^1 (1-t)f'(t)dt \right)^2 + \left(\int_0^{\frac{1}{2}} xf'(x)dx \right)^2 \right] \\ &\leq 2 \left[\int_{\frac{1}{2}}^1 (1-t)^2 dt \cdot \int_{\frac{1}{2}}^1 [f'(t)]^2 dt + \int_0^{\frac{1}{2}} x^2 dx \cdot \int_0^{\frac{1}{2}} [f'(x)]^2 dx \right] = \frac{1}{12} \int_0^1 [f'(x)]^2 dx \end{aligned}$$

即得 $\int_0^1 [f'(x)]^2 dx \geq 12 \left(\int_0^1 f(x)dx \right)^2$.

证法二 构造辅助函数, 并利用 *Cauchy-Schwarz* 不等式, 令 $g(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq \frac{1}{2} \\ 1-x, & \frac{1}{2} \leq x \leq 1 \end{cases}$, 则

$$\begin{aligned} \int_0^1 f'(x)g(x)dx &= \int_0^{\frac{1}{2}} xf'(x)dx + \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x)f'(x)dx = xf(x) \Big|_0^{\frac{1}{2}} - \int_0^{\frac{1}{2}} f(x)dx + (1-x)f(x) \Big|_{\frac{1}{2}}^1 + \int_{\frac{1}{2}}^1 f(x)dx \\ &= \int_{\frac{1}{2}}^1 f(x)dx = \int_0^1 f(x)dx \end{aligned}$$

且 $\int_0^1 g^2(x)dx = \int_0^{\frac{1}{2}} x^2 dx + \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x)^2 dx = \frac{1}{12}$, 于是有 *Cauchy-Schwarz* 不等式, 有

$$\left(\int_0^1 f'(x)g(x)dx \right)^2 \leq \int_0^1 [f'(x)]^2 dx \cdot \int_0^1 g^2(x)dx = \frac{1}{12} \int_0^1 [f'(x)]^2 dx$$

从而得 $\int_0^1 [f'(x)]^2 dx \geq 12 \left(\int_0^1 f(x)dx \right)^2$.

例 3.2.72. 设函数 $f(x)$ 在 $[0, 1]$ 上具有一阶连续的导数, 且 $\int_{\frac{1}{3}}^{\frac{2}{3}} f(x)dx = 0$, 证明

$$\int_0^1 [f'(x)]^2 dx \geq 27 \left(\int_0^1 f(x)dx \right)^2.$$

证 构造辅助函数, 并利用 *Cauchy-Schwarz* 不等式, 令 $g(x) = \begin{cases} -x, & 0 \leq x \leq \frac{1}{3} \\ 2x-1, & \frac{1}{3} \leq x \leq \frac{2}{3} \\ -x+1, & \frac{2}{3} \leq x \leq 1 \end{cases}$, 则

$$\begin{aligned} I &= \int_0^1 f'(x)g(x)dx = \int_0^{\frac{1}{3}} (-x)f'(x)dx + \int_{\frac{1}{3}}^{\frac{2}{3}} (2x-1)f'(x)dx + \int_{\frac{2}{3}}^1 (-x+1)f'(x)dx \\ &= -xf(x) \Big|_0^{\frac{1}{3}} + \int_0^{\frac{1}{3}} f(x)dx + (2x-1)f(x) \Big|_{\frac{1}{3}}^{\frac{2}{3}} - 2 \int_{\frac{1}{3}}^{\frac{2}{3}} f(x)dx + (-x+1)f(x) \Big|_{\frac{2}{3}}^1 + \int_{\frac{2}{3}}^1 f(x)dx \\ &= \int_0^{\frac{1}{3}} f(x)dx + \int_{\frac{2}{3}}^1 f(x)dx = \int_0^1 f(x)dx \end{aligned}$$

且

$$\int_0^1 g^2(x)dx = \int_0^{\frac{1}{3}} (-x)^2 dx + \int_{\frac{1}{3}}^{\frac{2}{3}} (2x-1)^2 dx + \int_{\frac{2}{3}}^1 (-x+1)^2 dx = \frac{1}{27}$$

于是由 *Cauchy-Schwarz* 不等式得

$$\left(\int_0^1 f'(x)g(x)dx \right)^2 \leq \int_0^1 [f'(x)]^2 dx \cdot \int_0^1 g^2(x)dx = \frac{1}{27} [f'(x)]^2 dx$$

从而得 $\int_0^1 [f'(x)]^2 dx \geq 27 \left(\int_0^1 f(x)dx \right)^2$.

例 3.2.73. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续可导, 且 $f(a) = f(b) = 0$, 则有

$$\left(\int_a^b f(x) dx \right)^2 \leq \frac{(b-a)^3}{3} \int_a^b [f'(x)]^2 dx.$$

证 不妨设 $f(a) = 0$ (对于 $f(b) = 0$, 类似地可证), 则

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^b f(x) d(x-b) = f(x)(x-b) \Big|_a^b - \int_a^b (x-b)f'(x) dx = \int_a^b (b-x)f'(x) dx$$

于是由 Cauchy-Schwarz 不等式得, 有

$$\left(\int_a^b f(x) dx \right)^2 = \left(\int_a^b (b-x)f'(x) dx \right)^2 \leq \int_a^b (b-x)^2 dx \int_a^b [f'(x)]^2 dx = \frac{(b-a)^3}{3} \int_a^b [f'(x)]^2 dx$$

即得待证等式.

推论 3.2.7. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续可导, 且 $f(x_0) = 0$, 则有

$$\left(\int_a^b f(x) dx \right)^2 \leq M \int_a^b [f'(x)]^2 dx$$

其中 $M = \frac{2}{3} \max_{a \leq x_0 \leq b} \{(x_0-a)^3, (x_0-b)^3\}$, 特别地, 当 $x_0 = \frac{a+b}{2}$ 时, $M = \frac{(b-a)^3}{12}$.

例 3.2.74. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续可导, 且 $f(a) = f(b) = 0$, 则有

$$\left(\int_a^b f(x) dx \right)^2 \leq \frac{(b-a)^3}{12} \int_a^b [f'(x)]^2 dx.$$

证 记 $c = \frac{a+b}{2}$, 则由例题 3.2.73 可知

$$\begin{aligned} \left(\int_a^c f(x) dx \right)^2 &\leq \frac{(c-a)^3}{3} \int_a^c [f'(x)]^2 dx \\ \left(\int_c^b f(x) dx \right)^2 &\leq \frac{(b-c)^3}{3} \int_c^b [f'(x)]^2 dx \end{aligned}$$

于是由 Cauchy-Schwarz 不等式,

$$\begin{aligned} \left(\int_a^b f(x) dx \right)^2 &= \left(\int_a^c f(x) dx + \int_c^b f(x) dx \right)^2 \leq 2 \left[\left(\int_a^c f(x) dx \right)^2 + \left(\int_c^b f(x) dx \right)^2 \right] \\ &\leq \frac{(b-a)^3}{12} \left[\int_a^c [f'(x)]^2 dx + \int_c^b [f'(x)]^2 dx \right] = \frac{(b-a)^3}{12} \int_a^b [f'(x)]^2 dx \end{aligned}$$

即得待证等式.

例 3.2.75. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上二阶连续可导, 且 $f(a) = f(b) = 0$, 则有

$$\left(\int_a^b f(x) dx \right)^2 \leq \frac{(b-a)^5}{180} \int_a^b f''^2(x) dx.$$

证 由已知 $f(a) = f(b) = 0$ 以及分部积分公式得

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &= \int_a^b f(x) d(x-a) = - \int_a^b (x-a)f'(x) dx \\ \int_a^b f(x) dx &= \int_a^b f(x) d(x-b) = - \int_a^b (x-b)f'(x) dx \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned}\int_a^b f(x)dx &= -\int_a^b (x-a)f'(x)dx = \int_a^b (x-a)(x-b)f''(x)dx + \int_a^b (x-b)f'(x)dx \\ &= \int_a^b (x-a)(x-b)f''(x)dx - \int_a^b f(x)dx = \frac{1}{2} \int_a^b (x-a)(x-b)f''(x)dx\end{aligned}$$

故由 Cauchy-Schwarz 不等式得

$$\begin{aligned}\left(\int_a^b f(x)dx\right)^2 &= \frac{1}{4} \left[\int_a^b (x-a)(x-b)f''(x)dx\right]^2 \leq \frac{1}{4} \left(\int_a^b f''^2(x)dx\right) \left(\int_a^b [(x-a)(x-b)]^2 dx\right) \\ &= \frac{(b-a)^5}{180} \int_a^b f''^2(x)dx\end{aligned}$$

即得待证等式.

例 3.2.76. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上二阶连续可导, 且 $f(a) = f'(a) = 0$ 或 $f(b) = f'(b) = 0$, 则

$$\left(\int_a^b f(x)dx\right)^2 \leq \frac{(b-a)^5}{20} \int_a^b f''^2(x)dx.$$

证 不妨设 $f(a) = f'(a) = 0$ (对于 $f(b) = f'(b) = 0$, 类似地证明), 则由分部积分公式, 有

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^b f(x)d(x-b) = -\int_a^b (x-b)f'(x)dx = -\int_a^b f'(x)d\left(\frac{(b-x)^2}{2}\right) = \int_a^b \frac{(b-x)^2}{2}f''(x)dx$$

于是由 Cauchy-Schwarz 不等式得

$$\left(\int_a^b f(x)dx\right)^2 = \left(\int_a^b \frac{(b-x)^2}{2}f''(x)dx\right)^2 \leq \int_a^b \frac{(b-x)^4}{4}dx \int_a^b f''^2(x)dx = \frac{(b-a)^5}{20} \int_a^b f''^2(x)dx$$

即得待证等式.

推论 3.2.8. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上 n 阶连续可导, 且 $f^{(l)}(a) = 0$ 或 $f^{(l)}(b) = 0$ ($l = 0, 1, 2, \dots, n-1$), 则有

$$\left(\int_a^b f(x)dx\right)^2 \leq \frac{(b-a)^{2n+1}}{(n!)^2(2n+1)} \int_a^b [f^{(n)}(x)]^2 dx.$$

证 下面以 $f^{(k)}(b) = 0$ ($k = -1, 1, \dots, n-1$) 为例进行证明,

$$\begin{aligned}\int_a^b f(x)dx &= \int_a^b f(x)d(x-a) = -\int_a^b (x-a)f'(x)dx = -\int_a^b f'(x)d\left(\frac{(x-a)^2}{2}\right) = \int_a^b \frac{(x-a)^2}{2}f''(x)dx \\ &= \frac{(-1)^2}{1 \cdot 2} \int_a^b (x-a)^2 f''(x)dx = \dots = \frac{(-1)^n}{n!} \int_a^b (x-a)^n f^{(n)}(x)dx\end{aligned}$$

于是由 Cauchy-Schwarz 不等式, 得

$$\left(\int_a^b f(x)dx\right)^2 \leq \frac{1}{(n!)^2} \int_a^b (x-a)^{2n} dx \cdot \int_a^b [f^{(n)}(x)]^2 dx = \frac{(b-a)^{2n+1}}{(n!)^2(2n+1)} \int_a^b [f^{(n)}(x)]^2 dx.$$

例 3.2.77. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上二阶连续可导, 且 $f(a) = f'(a) = f(b) = f'(b) = 0$, 则有

$$\left(\int_a^b f(x)dx\right)^2 \leq \frac{(b-a)^5}{320} \int_a^b f''^2(x)dx.$$

证 记 $c = \frac{a+b}{2}$, 则有例题 3.2.76, 有

$$\left(\int_a^c f(x)dx\right)^2 \leq \frac{(c-a)^5}{20} \int_a^c f''^2(x)dx = \frac{(b-a)^5}{640} \int_a^c f''^2(x)dx$$

$$\left(\int_c^b f(x)dx\right)^2 \leq \frac{(b-c)^5}{20} \int_c^b f''^2(x)dx = \frac{(b-a)^5}{640} \int_c^b f''^2(x)dx$$

从而

$$\left(\int_a^b f(x)dx\right)^2 = \left(\int_a^c f(x)dx + \int_c^b f(x)dx\right)^2 \leq 2 \left[\left(\int_a^c f(x)dx\right)^2 + \left(\int_c^b f(x)dx\right)^2 \right] \leq \frac{(b-a)^5}{320} \int_a^b f''^2(x)dx$$

即得待证等式.

推论 3.2.9. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上 n 阶连续可导, 且 $f^{(l)}(a) = f^{(l)}(b) = 0$ ($l = 0, 1, 2, \dots, n-1$), 则有

$$\left(\int_a^b f(x)dx\right)^2 \leq \frac{(b-a)^{2n+1}}{2^{2n}(n!)^2(2n+1)} \int_a^b [f^{(n)}(x)]^2 dx.$$

证 记 $c = \frac{a+b}{2}$, 由推论 3.2.8, 有

$$\begin{aligned} \left(\int_a^c f(x)dx\right)^2 &\leq \frac{(c-a)^{2n+1}}{(n!)^2(2n+1)} \int_a^c [f^{(n)}(x)]^2 dx = \frac{(b-a)^{2n+1}}{2^{2n+1}(n!)^2(2n+1)} \int_a^c [f^{(n)}(x)]^2 dx \\ \left(\int_c^b f(x)dx\right)^2 &\leq \frac{(b-c)^{2n+1}}{(n!)^2(2n+1)} \int_c^b [f^{(n)}(x)]^2 dx = \frac{(b-a)^{2n+1}}{2^{2n+1}(n!)^2(2n+1)} \int_c^b [f^{(n)}(x)]^2 dx \end{aligned}$$

于是由基本不等式,

$$\left(\int_a^b f(x)dx\right)^2 \leq 2 \left[\left(\int_a^c f(x)dx\right)^2 + \left(\int_c^b f(x)dx\right)^2 \right] \leq \frac{(b-a)^{2n+1}}{2^{2n}(n!)^2(2n+1)} \int_a^b [f^{(n)}(x)]^2 dx.$$

推论 3.2.10. 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上 $2n$ 阶连续可导, 且 $f^{(l)}(a) = f^{(l)}(b) = 0$ ($l = 0, 1, 2, \dots, n-1$), 则有

$$\left(\int_a^b f(x)dx\right)^2 \leq \frac{(b-a)^{2n+1}}{(4n+1)!} \int_a^b [f^{(2n)}(x)]^2 dx.$$

例 3.2.78. 设 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上有连续的导数, 且 $f\left(\frac{a+b}{2}\right) = 0$, 证明:

$$\int_a^b |f(x)f'(x)|dx \leq \frac{b-a}{4} \int_a^b |f'(t)|^2 dt.$$

证 注意到 $f\left(\frac{a+b}{2}\right) = 0$, 那么

$$f(x) = f(x) - f\left(\frac{a+b}{2}\right) = \int_{\frac{a+b}{2}}^x f'(t)dt, \quad x \in [a, b]$$

并令

$$\begin{aligned} g_1(x) &= \int_x^{\frac{a+b}{2}} |f'(t)|dt, \quad x \in \left[a, \frac{a+b}{2}\right] \\ g_2(x) &= \int_{\frac{a+b}{2}}^x |f'(t)|dt, \quad x \in \left[\frac{a+b}{2}, b\right] \end{aligned}$$

则 $g_1(x), g_2(x)$ 分别在 $\left[a, \frac{a+b}{2}\right]$ 和 $\left[\frac{a+b}{2}, b\right]$ 上有连续的导数, 且

$$g_1\left(\frac{a+b}{2}\right) = g_2\left(\frac{a+b}{2}\right) = 0$$

当 $x \in \left[a, \frac{a+b}{2}\right]$ 时, $|f(x)| \leq g_1(x)$, $|f'(x)| = -g_1'(x)$; 当 $x \in \left[\frac{a+b}{2}, b\right]$ 时, $|f(x)| \leq g_2(x)$, $|f'(x)| = g_2'(x)$, 因此

$$I = \int_a^b |f(x)f'(x)|dx = \int_a^{\frac{a+b}{2}} |f(x)f'(x)|dx + \int_{\frac{a+b}{2}}^b |f(x)f'(x)|dx$$

$$\leq - \int_a^{\frac{a+b}{2}} g_1(x)g'_1(x)dx + \int_{\frac{a+b}{2}}^b g_2(x)g'_2(x)dx = \frac{1}{2}(g_1^2(a) + g_2^2(b))$$

于是, 由 *Cauchy-Schwarz* 不等式得,

$$\begin{aligned} \int_a^b |f(x)f'(x)|dx &\leq \frac{1}{2} \left(\int_a^{\frac{a+b}{2}} |f'(t)|dt \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\int_{\frac{a+b}{2}}^b |f'(t)|dt \right)^2 \\ &\leq \frac{1}{2} \int_a^{\frac{a+b}{2}} |f'(t)|^2 dt \cdot \int_a^{\frac{a+b}{2}} dt + \frac{1}{2} \int_{\frac{a+b}{2}}^b |f'(t)|^2 dt \cdot \int_{\frac{a+b}{2}}^b dt = \frac{b-a}{4} \int_a^b |f'(t)|^2 dt \end{aligned}$$

故得证.

例 3.2.79. 设函数 $f(x)$ 在 $[0, a]$ ($a > 0$) 上有连续的一阶导数, 且 $f(0) = 0$, $M = \max_{x \in [0, a]} |f'(x)|$, 证明

$$\left| \int_0^a f(x)dx \right| \leq \frac{Ma^2}{2}.$$

证法一 $\int_0^a f(x)dx = \int_0^a f(x)d(x-a) = (x-a)f(x)\Big|_0^a - \int_0^a (x-a)f'(x)dx = \int_0^a (a-x)f'(x)dx$, 故

$$\left| \int_0^a f(x)dx \right| = \left| \int_0^a (a-x)f'(x)dx \right| \leq M \left| \int_0^a (a-x)dx \right| = \frac{Ma^2}{2}.$$

证法二 因为 $\int_0^x f'(t)dt = f(x) - f(0) = f(x)$, 所以 $|f(x)| = \left| \int_0^x f'(t)dt \right| \leq \int_0^x |f'(t)dt| = Mx$, 于是

$$\int_0^a f(x)dx \leq \int_0^a |f(x)|dx \leq \int_0^a Mxdx = \frac{Ma^2}{2}.$$

证法三 利用 *Cauchy-Schwarz* 不等式, 由题设得

$$|f(x)| = \left| \int_0^x f'(t)dt \right| \leq \left(\int_0^x |f'(t)|dt \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_0^x dt \right)^{\frac{1}{2}} \leq M \left(\int_0^x dt \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_0^x dt \right)^{\frac{1}{2}} = Mx$$

$$\text{故 } \left| \int_0^a f(x)dx \right| \leq \int_0^a Mxdx = \frac{Ma^2}{2}.$$

推论 3.2.11. 一般地, 设函数 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上有连续的一阶导数, 且 $f(a) = 0$, $M = \max_{x \in [0, a]} |f'(x)|$, 则

$$\left| \int_a^b f(x)dx \right| \leq \frac{M}{2}(b-a)^2.$$

例 3.2.80. 设函数 $f(x)$ 在 $[0, 2]$ 上有连续的二阶导数, 且 $f(1) = 0$, $M = \max_{x \in [0, 2]} |f''(x)|$, 证明

$$\left| \int_0^2 f(x)dx \right| \leq \frac{M}{3}.$$

证 由 $f(x)$ 在 $x=1$ 出的 *Taylor* 展开得,

$$f(x) = f(1) + f'(1)(x-1) + \frac{1}{2}f''(\xi)(x-1)^2$$

其中 $\xi \in (0, 2)$, 又 $f(1) = 0$, $M = \max_{x \in [0, 2]} |f''(x)|$ 所以有

$$f'(1)(x-1) - \frac{M}{2}(x-1)^2 \leq f(x) \leq f'(1)(x-1) + \frac{M}{2}(x-1)^2$$

两边积分得

$$f'(1) \int_0^2 (x-1)dx - \frac{M}{2} \int_0^2 (x-1)^2 dx \leq \int_0^2 f(x)dx \leq f'(1) \int_0^2 (x-1)dx + \frac{M}{2} \int_0^2 (x-1)^2 dx$$

而 $\int_0^2 (x-1)dx = 0$, $\int_0^2 (x-1)^2 dx = \frac{2}{3}$, 所以 $\left| \int_0^2 f(x)dx \right| \leq \frac{M}{3}.$

例 3.2.81. 设在区间 $[a, b]$ 上 $f'(x)$ 绝对有界, 且 $|f'(x)| \leq M$, 试证

$$\left| \int_a^b f(x) dx - \frac{b-a}{2} (f(a) + f(b)) \right| \leq \frac{(b-a)^2 M}{4} - \frac{(f(a) - f(b))^2}{4M}.$$

证 构造辅助函数

$$g(x) = f(x) - \frac{(f(b) - f(a))(x-a)}{b-a} - f(a)$$

可得

$$\left| \int_a^b g(x) dx \right| = \left| \int_a^b \left[f(x) - \frac{(f(b) - f(a))(x-a)}{b-a} - f(a) \right] dx \right| = \left| \int_a^b f(x) dx - \frac{b-a}{2} (f(a) + f(b)) \right|$$

而 $g(a) = g(b) = 0$, 可令

$$k = \frac{f(b) - f(a)}{b-a} \cdot \frac{1}{M}, \quad x_0 = \frac{a+b+k(b-a)}{2}$$

由于

$$g'(x) = f'(x) - \frac{f(b) - f(a)}{b-a} = f'(x) - kM = (1-k)M$$

根据 Lagrange 中值定理得

$$\begin{cases} g(x) \leq g(a) + g'(x)(x-a), & x \in (a, x_0) \\ g(x) \leq g(b) + g'(x)(b-x), & x \in (x_0, b) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} g(x) \leq (1-k)M(x-a) \\ g(x) \leq (1-k)M(b-x) \end{cases}$$

故

$$\begin{aligned} \left| \int_a^b g(x) dx \right| &= \left| \int_a^{x_0} g(x) dx + \int_{x_0}^b g(x) dx \right| \leq \left| \int_a^{x_0} (1-k)M(x-a) dx + \int_{x_0}^b (1-k)M(b-x) dx \right| \\ &= (1-k^2)M\left(\frac{b-a}{2}\right) = \frac{M(b-a)^2}{2} - \frac{(f(b) - f(a))^2}{4M} \end{aligned}$$

即得待证等式.

3.3 反常积分

反常积分是指在积分区间上函数有无穷大或无界的情况下积分, 无法直接通过定积分来计算的积分. 反常积分分为两类: 第一类是无穷积分, 即积分区间为无穷的情况; 第二类是间断积分, 即积分函数在积分区间上有间断点的情况.

3.3.1 反常积分的计算

定理 3.3.1 (反常积分的区间再现公式). 若 $\int_0^{+\infty} f(x) dx$ 收敛, 则对任意的正整数 k , 都有

$$\int_0^{+\infty} f(x) dx = \int_0^{+\infty} \frac{k}{x^2} f\left(\frac{k}{x}\right) dx = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \left[f(x) + \frac{k}{x^2} f\left(\frac{k}{x}\right) \right] dx.$$

例 3.3.1. 计算下列反常积分.

(1) $\int_0^{+\infty} \frac{dx}{(1+x^2)(1+x^\alpha)}$ ($\alpha \in \mathbb{R}$). (4) $\int_0^{+\infty} \frac{\ln x}{x^2+a^2} dx$ ($a > 0$).	(2) $\int_0^{+\infty} \frac{\arctan \sqrt[3]{x}}{1+x^2} dx$. (5) $\int_0^{+\infty} \frac{\arctan x}{(1+x^2)^{\frac{5}{2}}} dx$.	(3) $\int_0^{+\infty} \frac{x^2}{(1+x^2)^2} dx$. (6) $\int_0^{+\infty} \frac{x \ln x}{(1+x^2)^2} dx$.
--	--	--

(1) 法一: 令 $x = \tan t$, 则 $dx = \sec^2 t dt$,

$$\text{原式} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dt}{1 + \tan^\alpha t} \xrightarrow{t=\frac{\pi}{2}-u} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{du}{1 + \cot^\alpha u} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\tan^\alpha u}{\tan^\alpha u + 1} du = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\tan^\alpha u + 1}{\tan^\alpha u + 1} du = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} du = \frac{\pi}{4}.$$

法二: 令 $x = \frac{1}{t}$, 则 $dx = -\frac{1}{t^2} dt$,

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int_{+\infty}^0 \frac{-\frac{1}{t^2} dt}{\left(1 + \frac{1}{t^2}\right)\left(1 + \frac{1}{t^\alpha}\right)} = \int_0^{+\infty} \frac{t^\alpha dt}{(1+t^2)(t^\alpha+1)} = \int_0^{+\infty} \frac{x^\alpha dx}{(1+x^2)(x^\alpha+1)} \\ &= \frac{1}{2} \left[\int_0^{+\infty} \frac{dx}{(1+x^2)(1+x^\alpha)} + \int_0^{+\infty} \frac{x^\alpha dx}{(1+x^2)(1+x^\alpha)} \right] = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{dx}{1+x^2} = \frac{\pi}{4} \end{aligned}$$

法三: $\int_0^{+\infty} \frac{dx}{(1+x^2)(1+x^\alpha)} = \int_0^1 \frac{dx}{(1+x^2)(1+x^\alpha)} + \int_1^{+\infty} \frac{dx}{(1+x^2)(1+x^\alpha)}$, 于是

$$\int_1^{+\infty} \frac{dx}{(1+x^2)(1+x^\alpha)} = \int_1^0 \frac{-\frac{1}{t^2} dt}{\left(1 + \frac{1}{t^2}\right)\left(1 + \frac{1}{t^\alpha}\right)} = \int_0^1 \frac{t^\alpha dt}{(1+t^2)(1+t^\alpha)}$$

于是原式 $= \int_0^1 \frac{dx}{(1+x^2)(1+x^\alpha)} + \int_0^1 \frac{x^\alpha dx}{(1+x^2)(1+x^\alpha)} = \int_0^1 \frac{1}{1+x^2} dx = \frac{\pi}{4}$.

法四: 原式 $= \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{(1+x^\alpha)^{-1} + \left(1 + \frac{1}{x^\alpha}\right)^{-1}}{1+x^2} dx = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{dx}{1+x^2} = \frac{\pi}{4}$.

(2) 原式 $= \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{\arctan \sqrt[3]{x} + \arctan \frac{1}{\sqrt[3]{x}}}{1+x^2} dx = \frac{\pi}{4} \int_0^{+\infty} \frac{dx}{1+x^2} = \frac{\pi^2}{8}$.

(3) 原式 $= \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{\frac{x^2}{1+x^2} + \frac{1}{1+x^2}}{1+x^2} dx = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{dx}{1+x^2} = \frac{\pi}{4}$.

(4) 法一: 令 $x = a \tan t$, 则

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\ln(a \tan t)}{a^2 \tan^2 t + a^2} \cdot a \sec^2 t dt = \frac{1}{a} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\ln a + \ln \tan t) dt = \frac{\pi}{2a} \ln a + \frac{1}{a} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \tan t dt \\ &\quad \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \tan t dt \xrightarrow{u=\frac{\pi}{2}-t} \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \ln \tan \left(\frac{\pi}{2} - u\right) (-du) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \cot u du \end{aligned}$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \tan t dt + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \cot u du = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(\tan x \cot x) dx = 0 \Rightarrow \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \tan x dx = 0, \text{ 原式} = \frac{\pi}{2a} \ln a.$$

法二: $\int_0^{+\infty} \frac{\ln x}{x^2 + a^2} dx = \int_0^a \frac{\ln x}{x^2 + a^2} dx + \int_a^{+\infty} \frac{\ln x}{x^2 + a^2} dx$, 其中

$$\int_a^{+\infty} \frac{\ln x}{x^2 + a^2} dx \xrightarrow{x=\frac{a^2}{t}} \int_a^0 \frac{\ln \frac{a^2}{t}}{\frac{a^4}{t^2} + a^2} \left(-\frac{a^2}{t^2}\right) dt = \int_0^a \frac{\ln a^2 - \ln t}{t^2 + a^2} dt$$

于是, $\int_0^{+\infty} \frac{\ln x}{x^2 + a^2} dx = \int_0^a \frac{\ln a^2}{x^2 + a^2} dx = 2 \ln a \left(\frac{1}{a} \arctan \frac{x}{a}\right)_0^a = \frac{\pi}{2a} \ln a$.

法三: 原式 $= \frac{1}{a^2} \int_0^{+\infty} \frac{\ln x}{\left(\frac{x}{a}\right)^2 + 1} dx \xrightarrow{\frac{x}{a}=t} \frac{1}{a} \int_0^{+\infty} \frac{\ln at}{t^2 + 1} dt = \frac{1}{2a} \int_0^{+\infty} \frac{\ln at + \ln \frac{a}{t}}{t^2 + 1} dt = \frac{\pi}{2a} \ln a$.

(5) 令 $x = \tan t$, 则原式 $= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{tdt}{\sec^3 t} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} t \cos^3 t dt$, 由表格积分法:

f'	t	1	0
	$+ \searrow$	$- \searrow$	
\int	$\cos^3 t$	$\frac{1}{3} \cos^2 t \sin t + \frac{2}{3} \sin t$	$-\frac{1}{9} \cos^3 t - \frac{2}{3} \cos t$

$$\text{原式} = \frac{t}{3} \cos^2 t \sin t \frac{2t}{3} \sin t + \frac{1}{9} \cos^3 t + \frac{2}{3} \cos t \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{\pi}{3} - \frac{7}{9}.$$

$$(6) \text{ 原式} = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{\frac{x \ln x}{x^2} + \frac{\frac{1}{x} \ln \frac{1}{x}}{1 + (\frac{1}{x})^2}}{1 + x^2} dx = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{x \ln x}{1 + x^2} + \frac{-x \ln x}{1 + x^2} dx = 0.$$

例 3.3.2. 计算下列反常积分.

$$(1) \int_3^{+\infty} \frac{dx}{(x-1)^4 \sqrt{x^2-2x}}. \quad (2) \int_0^{+\infty} \frac{xe^{-x}}{(1+e^{-x})^2}. \quad (3) \int_1^{+\infty} \frac{dx}{e^{1+x} + e^{3-x}}.$$

$$(1) \text{ 原式化为 } \int_3^{+\infty} \frac{dx}{(x-1)^4 \sqrt{(x-1)^2-1}}, \text{ 令 } x-1 = \sec \theta, \text{ 则}$$

$$\text{原式} = \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sec \theta \tan \theta}{\sec^4 \theta \tan \theta} d\theta = \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^3 \theta d\theta = \frac{1}{3} \cos^2 \theta + \frac{2}{3} \sin \theta \Big|_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{3} - \frac{3\sqrt{3}}{8}.$$

$$(2) \text{ 由于 } \left(\frac{1}{1+e^{-x}}\right)' = \frac{e^{-x}}{(e^{-x}+1)^2}, \text{ 由分部积分法, 得}$$

$$F(x) = \int \frac{xe^{-x}}{(1+e^{-x})^2} dx = \int x d\left(\frac{1}{1+e^{-x}}\right) = \frac{x}{1+e^{-x}} - \int \frac{dx}{1+e^{-x}} = \frac{x}{1+e^{-x}} - \ln(e^{-x}+1) + C$$

于是最终的积分化为

$$\int_0^{+\infty} \frac{xe^{-x}}{(1+e^{-x})^2} dx = F(+\infty) - F(0) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left[\frac{x}{1+e^{-x}} - \ln(e^x+1) \right] + \ln 2$$

$$\begin{aligned} F(+\infty) &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \left[\frac{x}{1+e^{-x}} - \ln(e^x+1) \right] = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{xe^x - e^x \ln(e^x+1) - \ln(e^x+1)}{e^x+1} \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^x[x - \ln(e^x+1)]}{e^x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} [x - \ln e^x (1+e^{-x})] = -\lim_{x \rightarrow +\infty} \ln(1+e^{-x}) = 0 \end{aligned}$$

$$\text{即 } \int_0^{+\infty} \frac{xe^{-x}}{(1+e^{-x})^2} dx = \ln 2.$$

(3) 由题意可得

$$I = \frac{1}{e} \int_1^{+\infty} \frac{dx}{e^x + e^{2-x}} = \frac{1}{e} \int_1^{+\infty} \frac{de^x}{e^{2x} + e^2} = \frac{1}{e^2} \arctan e^{x-1} \Big|_1^{+\infty} = \frac{\pi}{4} e^{-2}.$$

例 3.3.3. 已知 $\lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{x-a}{x+a}\right)^x = \int_a^{+\infty} 4x^2 e^{-2x} dx$, 求常数 a 的值.

等式左边易化简为 e^{-2a} , 等式右边由表格积分法得

$$e^{-2a} = e^{-2x} (-2x^2 - 2x - 1) \Big|_a^{+\infty} = e^{-2a} (2a^2 + 2a + 1)$$

即 $2a^2 + 2a + 1 = 1$, 解得 $a = 0$ 或 -1 .

例 3.3.4. 试证: $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{x \cos x \sin x}{(a^2 \cos^2 x + b^2 \sin^2 x)^2} dx = \frac{\pi}{4ab^2(a+b)}$ ($a, b > 0, a \neq b$).

证 注意到 $(\tan x)' = \sec^2 x$, 于是

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{x \cos x \sin x}{(a^2 \cos^2 x + b^2 \sin^2 x)^2} dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{x \tan x}{(a^2 + b^2 \tan^2 x)^2} d(\tan x) \stackrel{\tan x=t}{=} \int_0^{+\infty} \frac{t \arctan t}{(a^2 + b^2 t^2)^2} dt \\ &= \frac{-1}{2b^2} \int_0^{+\infty} \arctan t d\left(\frac{1}{a^2 + b^2 t^2}\right) = \frac{-1}{2b^2} \left[\frac{\arctan t}{a^2 + b^2 t^2} \Big|_0^{+\infty} - \int_0^{+\infty} \frac{dt}{(a^2 + b^2 t^2)(1+t^2)} \right] \\ &= \frac{1}{2b^2(b^2 - a^2)} \int_0^{+\infty} \left(\frac{b^2}{a^2 + b^2 t^2} - \frac{1}{1+t^2} \right) dt = \frac{1}{2b^2(b^2 - a^2)} \left(\frac{b}{a} \arctan \frac{bt}{a} - \arctan t \right) \Big|_0^{+\infty} = \frac{\pi}{4ab^2(a+b)}. \end{aligned}$$

例 3.3.5. 设 $f(x) = \frac{(x+1)^2(x-1)}{x^3(x-2)}$, 求 $I = \int_{-1}^3 \frac{f'(x)}{1+f^2(x)} dx$.

易得 $x=0, 2$ 为 $f(x)$ 的无穷间断点, 故积分为反常积分, 且有

$$I = \int_{-1}^0 + \int_0^2 + \int_2^3$$

且 $\int \frac{f'(x)}{1+f^2(x)} dx = \arctan f(x) + C$, 于是

$$I = \arctan f(x) \Big|_{-1}^{0^-} + \arctan f(x) \Big|_{0^+}^{2^-} + \arctan f(x) \Big|_{2^+}^3 \arctan \frac{32}{27} - 2\pi.$$

例 3.3.6. 计算反常积分 $I = \int_{-\infty}^{+\infty} |t-x|^{\frac{1}{2}} \frac{y}{(t-x)^2+y^2} dt$.

$$\begin{aligned} I &= \int_{-\infty}^{+\infty} |t-x|^{\frac{1}{2}} \frac{y}{(t-x)^2+y^2} dt \stackrel{u=t-x}{=} \int_{-\infty}^{+\infty} |u|^{\frac{1}{2}} \frac{y}{u^2+y^2} = 2 \int_0^{+\infty} \frac{|u|^{\frac{1}{2}} y du}{u^2+y^2} \\ &\stackrel{v=\frac{u^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{y}}}{=} 4\sqrt{y} \int_0^{+\infty} \frac{v^2 dv}{v^4+1} = 2\sqrt{y} \int_0^{+\infty} \frac{v^2+1}{v^4+1} dv = 2\sqrt{y} \int_0^{+\infty} \frac{1+\frac{1}{v^2}}{v^2+\frac{1}{v^2}} dv \\ &= 2\sqrt{y} \int_0^{+\infty} \frac{d\left(v - \frac{1}{v}\right)}{\left(v - \frac{1}{v}\right)^2 + 2} = 2\sqrt{y} \int_0^{+\infty} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \arctan\left(v - \frac{1}{v}\right) \Big|_0^{+\infty} = \sqrt{2}\pi\sqrt{y}. \end{aligned}$$

定理 3.3.2. 若 $a, b > 0$, 则

$$\int_0^{+\infty} f\left(ax + \frac{b}{x}\right) dx = \frac{1}{a} \int_0^{+\infty} f\left(\sqrt{t^2 + 4ab}\right) dt$$

其中函数 $f(x)$ 的积分均有意义.

证 令 $ax - \frac{b}{x} = t$, 那么 $x = \frac{1}{2a} (t + \sqrt{t^2 + 4ab})$, $dx = \frac{t + \sqrt{t^2 + 4ab}}{2a\sqrt{t^2 + 4ab}} dt$.

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{+\infty} f\left(ax + \frac{b}{x}\right) dx = \frac{1}{2a} \left(\int_{-\infty}^0 + \int_0^{+\infty} \right) f\left(\sqrt{t^2 + 4ab}\right) \frac{t + \sqrt{t^2 + 4ab}}{\sqrt{t^2 + 4ab}} dt \\ &= \frac{1}{2a} \left[\int_0^{+\infty} f\left(\sqrt{u^2 + 4ab}\right) \frac{\sqrt{u^2 + 4ab} - u}{\sqrt{u^2 + 4ab}} du + \int_0^{\infty} f(t^2 + 4ab) \frac{t + \sqrt{t^2 + 4ab}}{\sqrt{t^2 + 4ab}} dt \right] \\ &= \frac{1}{a} \int_0^{+\infty} f\left(\sqrt{t^2 + 4ab}\right) dt. \end{aligned}$$

例 3.3.7. 已知 $\int_0^{+\infty} e^{-x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$, 试证 $\int_0^{+\infty} e^{-a^2 x^2 - \frac{b^2}{x^2}} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a} e^{-2ab}$.

$$\text{证 } I = \int_0^{+\infty} e^{-(ax + \frac{b}{x})^2 + 2ab} dx = e^{2ab} \int_0^{+\infty} e^{-(ax + \frac{b}{x})^2} dx = \frac{e^{2ab}}{a} \int_0^{+\infty} e^{-(x^2 + 4ab)} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a} e^{-2ab}.$$

例 3.3.8. 计算积分 $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(2nx) \ln(\cos x) dx$.

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(2nx) \ln(\cos x) dx = \frac{1}{2n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(\cos x) d\sin(2nx) = \frac{1}{2n} \ln(\cos x) \sin(2nx) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} - \frac{1}{2n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin(2nx) \cdot (-\sin x)}{\cos x} dx \\ &= \frac{1}{2n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin(2nx) \sin x}{\cos x} dx = \frac{1}{2n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(2nx) dx - \frac{1}{2n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos(2n+1)x}{\cos x} dx \\ &\stackrel{x=t-\frac{\pi}{2}}{=} \frac{(-1)^{n-1}}{2n} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \frac{\sin(2n+1)t}{\sin t} dt = \frac{(-1)^{n-1}}{2n} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^n \cos(2kt) \right] dt = (-1)^{n-1} \frac{\pi}{4n}. \end{aligned}$$

例 3.3.9. 设 m, n 为自然数, 求 $\int_0^1 t^n \ln^m t dt$.

利用分部积分法获得递推公式,

$$\begin{aligned} I_m &= \int_0^1 t^n \ln^m t dt = \frac{1}{n+1} \int_0^1 \ln^m t dt \cdot t^{n+1} = \frac{1}{n+1} \ln^m t \cdot t^{n+1} \Big|_0^1 - \frac{m}{n+1} \int_0^1 t^n \ln^{m-1} t dt = -\frac{m}{n+1} I_{m-1} \\ &= \left(-\frac{m}{n+1}\right) \left(-\frac{m-1}{n+1}\right) \cdots \left(-\frac{1}{n+1}\right) I_0 = (-1)^m \frac{m!}{(n+1)^m} \int_0^1 t^n dt = (-1)^m \frac{m!}{(n+1)^{m+1}}. \end{aligned}$$

定理 3.3.3 (Euler 积分). $I = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin x dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \cos x dx = -\frac{\pi}{2} \ln 2$.

证 被积函数 $f(x) = \ln \sin x$ 在 $x = 0$ 点的右邻域内无界, 由 L'Hospital 法则求得 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln \sin x}{x^{-\frac{1}{2}}} = 0$, 故由广义积分的比较判别法知广义积分 $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin x dx$ 收敛, 同理可证: 广义积分 $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \cos x dx$ 收敛, 令 $x = \frac{\pi}{2} - t$, 则

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin x dx &= \int_{\frac{\pi}{2}}^0 \ln \sin \left(\frac{\pi}{2} - t\right) (-dt) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \cos t dt = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \cos x dx \\ I &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin x dx \xrightarrow{x=2t} \int_0^{\frac{\pi}{4}} 2 \ln \sin 2t dt = 2 \ln 2 \cdot \frac{\pi}{4} + 2 \int_0^{\frac{\pi}{4}} \ln \sin t dt + 2 \int_0^{\frac{\pi}{4}} \ln \cos t dt \\ &= \frac{\pi}{2} \ln 2 + 2 \int_0^{\frac{\pi}{4}} \ln \sin t dt + 2 \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin u du \quad (\text{这里 } u = \frac{\pi}{2} - t) = \frac{\pi}{2} \ln 2 + 2I \end{aligned}$$

解方程得 $I = -\frac{\pi}{2} \ln 2$.

例 3.3.10. 计算极限

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n^3 \left(\tan \int_0^\pi \sqrt[n]{\sin x} dx + \sin \int_0^\pi \sqrt[n]{\sin x} dx \right).$$

由 $\tan(A - B) = \frac{\tan A - \tan B}{1 + \tan A \tan B}$, $\sin(A - B) = \sin A \cos B + \cos A \sin B$, $\tan x - \sin x \sim \frac{x^3}{2}$ ($x \rightarrow 0$)

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \lim_{n \rightarrow \infty} n^3 \left[\tan \int_0^\pi \left(\sqrt[n]{\sin x} - 1 \right) dx - \sin \int_0^\pi \left(\sqrt[n]{\sin x} - 1 \right) dx \right] = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \left[n \int_0^\pi \left(\sqrt[n]{\sin x} - 1 \right) dx \right]^3 \\ &= \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{\int_0^\pi \left(\sqrt[n]{\sin x} - 1 \right) dx}{\frac{1}{n}} \right]^3 \xrightarrow{\frac{1}{n}=t} \frac{1}{2} \left[\int_0^\pi \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\sin^t x - 1}{t} dt \right]^3 \xrightarrow{L'} \frac{1}{2} \left[\int_0^\pi \ln(\sin x) dx \right]^3 \\ &= \frac{1}{2} \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln(\sin x) dx + \int_{\frac{\pi}{2}}^\pi \ln(\sin x) dx \right]^3 = -\frac{(\pi \ln 2)^3}{2}. \end{aligned}$$

例 3.3.11. 计算积分 $I_n = \int_1^{+\infty} \frac{dx}{\prod_{k=0}^n (x+k)}$.

设

$$\frac{1}{\prod_{k=0}^n (x+k)} = \sum_{k=0}^n \frac{A_k}{x+k}$$

其中 A_k 为待定系数. 将 $\prod_{k=0}^n (x+k)$ 同乘等式两边, 然后令 $x \rightarrow -k$, 得

$$A_k = \frac{1}{(-k)(-k+1) \cdots (-1) \cdot 1 \cdot 2 \cdots (-k+n)} = (-1)^k \frac{1}{k!(n-k)!} = (-1)^k \frac{C_n^k}{n!}$$

$$I_n = \int_1^{+\infty} \left[\sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{C_n^k}{n!} \frac{1}{x+k} \right] dx = \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{C_n^k}{n!} \int_1^{+\infty} \frac{dx}{x+k} = \frac{1}{n!} \sum_{k=0}^n (-1)^k C_n^k \ln(x+k) \Big|_1^{+\infty}$$

注意到

$$\begin{aligned}\sum_{k=0}^n (-1)^k C_n^k \ln(x+k) &= \sum_{k=0}^n (-1)^k C_n^k \ln\left[x\left(1+\frac{k}{x}\right)\right] = \ln x \cdot \sum_{k=0}^n (-1)^k C_n^k + \sum_{k=0}^n (-1)^k C_n^k \ln\left(1+\frac{k}{x}\right) \\ &= \ln x \cdot (1-1)^n + \sum_{k=0}^n (-1)^k C_n^k \ln\left(1+\frac{k}{x}\right) \rightarrow 0 \quad (x \rightarrow +\infty)\end{aligned}$$

因此 $I_n = \frac{1}{n!} \sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \ln(1+k)$.

3.3.2 反常积分敛散性

积分的收敛域

例 3.3.12. 求积分的收敛域.

$$(1) \int_a^{+\infty} \frac{e^{-ax}}{1+x^2} dx. \quad (2) \int_0^{+\infty} \frac{\sin x^q}{x^p} dx.$$

(1) 当 $a \geq 0$ 时, $\int_a^{+\infty} \frac{e^{-ax}}{1+x^2} dx \leq \int_a^{+\infty} \frac{dx}{1+x^2} = \arctan x \Big|_a^{+\infty} = \frac{\pi}{2} - \arctan a$, 原积分收敛; 当 $a < 0$ 时, 原积分显然发散, 于是, 积分 $\int_a^{+\infty} \frac{e^{-ax}}{1+x^2} dx$ 的收敛域为 $a \geq 0$ 的一切 a 值.

(2) 若 $q=0$, 则由于积分 $\int_A^{+\infty} \frac{dx}{x^p}$ 仅当 $p > 1$ 时收敛, 而积分 $\int_0^A \frac{dx}{x^p}$ 仅当 $p \leq 1$ 时收敛, 故积分 $\int_0^{+\infty} \frac{\sin 1}{x^p} dx$ 对于任何的 p 值及 $q=0$ 发散;
若 $q \neq 0$, 则积分 $\int_0^{+\infty} \frac{\sin x^q}{x^p} dx = \int_0^{+\infty} x^{-p} \sin x^q dx$

敛散性的判断

例 3.3.13. 判断广义积分 $\int_1^{+\infty} \frac{\left(e^{\frac{1}{x}} - 1\right)^\alpha}{\ln^\beta\left(1+\frac{1}{x}\right)} dx$ 收敛性.

当 $x \rightarrow +\infty$ 时, $e^{\frac{1}{x}} - 1 \sim \frac{1}{x}$, $\ln\left(1+\frac{1}{x}\right)$, 所以 $\frac{\left(e^{\frac{1}{x}} - 1\right)^\alpha}{\ln^\beta\left(1+\frac{1}{x}\right)} \sim \frac{1}{x^{\alpha-\beta}}$ ($x \rightarrow +\infty$), 由此可知, 当 $\alpha - \beta > 1$ 时, 原积分收敛, 其余情况均发散.

例 3.3.14. 判定反常积分 $\int_0^{+\infty} \frac{x dx}{1+x^6 \sin^2 x}$ 的敛散性.

原积分的敛散性的判定等价于判定以下级数的连续性

$$\int_0^{+\infty} \frac{x dx}{1+x^6 \sin^2 x} = \sum_{n=0}^{+\infty} \int_{n\pi}^{(n+1)\pi} \frac{x dx}{1+x^6 \sin^2 x} \xrightarrow{x-n\pi=t} \sum_{n=0}^{+\infty} \int_0^\pi \frac{(t+n\pi) dt}{1+(t+n\pi)^6 \sin^2 t}$$

记 $a_n = \int_0^\pi \frac{(t+n\pi) dt}{1+(t+n\pi)^6 \sin^2 t}$ 则 $a_n \leq \int_0^\pi \frac{\pi(n+1) dt}{1+(\pi n)^6 \sin^2 t} = \pi(n+1) \int_0^\pi \frac{dt}{1+(\pi n)^6 \sin^2 t}$, 其中

$$\begin{aligned}\int_0^\pi \frac{dt}{1+(\pi n)^6 \sin^2 t} &= \int_0^\pi \frac{\csc^2 t dt}{\csc^2 t + (\pi n)^6} = - \int_0^\pi \frac{d \cot t}{1+(\pi n)^6 + \cot^2 t} \\ &= - \frac{1}{\sqrt{\pi^6 n^6 + 1}} \arctan\left(\frac{\cot t}{\sqrt{\pi^6 n^6 + 1}}\right) \Big|_0^\pi = \frac{\pi}{\sqrt{\pi^6 n^6 + 1}}\end{aligned}$$

即 $a_n \leq \frac{\pi^2(n+1)}{\sqrt{\pi^6 n^6 + 1}}$, 由比较判别法的极限形式可知, 它与 $\frac{1}{n^2}$ 构成的 $p=2$ 的 p -级数具有相同的敛散性, 所以级数收敛, 从而可得积分也收敛.

无穷限反常积分的敛散性与无穷远处的极限

例 3.3.15. 设有下列命题

- (1) 设 $f(x)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 内连续是奇函数, 则 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 0$;
- (2) 设 $f(x)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 内连续, 又 $\lim_{R \rightarrow +\infty} \int_{-R}^R f(x)dx$ 存在, 则 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx$ 收敛;
- (3) $\int_a^{+\infty} f(x)dx, \int_a^{+\infty} g(x)dx$ 均发散, 则 $\int_a^{+\infty} [f(x) + g(x)]dx$ 可能发散, 也可能收敛;
- (4) 若 $\int_{-\infty}^0 f(x)dx$ 与 $\int_0^{+\infty} f(x)dx$ 均发散, 则不能确定 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx$ 是否收敛.

则以上命题中正确的个数是

A. 1

B. 2

C. 3

D. 4

命题 (1) 显然错误, 不妨令 $f(x) = x$, 则 $\int_{-\infty}^{+\infty} xdx$ 发散, 一般地, 若 $f(x)$ 在区间 $[-a, a]$ 上是奇函数, 且 $\int_{-a}^a f(x)dx$ 收敛, 则 $\int_0^a f(x)dx$ 收敛; 同样地, 命题 (2) 显然错误, 也令 $f(x) = x$, 则 $\lim_{R \rightarrow +\infty} \int_{-R}^R xdx = 0$, 但 $\int_{-\infty}^{+\infty} xdx$ 发散; 命题 (3) 正确, 对于不同名的函数的线性组合, 其组合后的收敛性与各函数的收敛性无关; 命题 (4) 错误, 对于相同的函数, 若 $\int_{-\infty}^0 f(x)dx$ 与 $\int_0^{+\infty} f(x)dx$ 均发散, 则 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx$ 一定发散, 综上, 选 A.

3.3.3 反常积分的极限

例 3.3.16. 设 $\varphi(x) = \int_0^x \cos \frac{1}{t} dt$, 求 $\varphi'(0)$.

$$\text{因为 } \varphi'(0) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\varphi(x) - \varphi(0)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\int_0^x \cos \frac{1}{t} dt}{x}, \text{ 但不能用 L'Hospital 法则, 故}$$

$$\int_0^x \cos \frac{1}{t} dt \stackrel{\frac{1}{t}=u}{=} \int_{\frac{1}{x}}^{+\infty} \frac{\cos u}{u^2} du = \int_{\frac{1}{x}}^{+\infty} \frac{1}{u^2} d\sin u = \frac{\sin u}{u^2} \Big|_{\frac{1}{x}}^{+\infty} + \int_{\frac{1}{x}}^{+\infty} \frac{2\sin u}{u^3} du = -x^2 \sin \frac{1}{x} + \int_{\frac{1}{x}}^{+\infty} \frac{2\sin u}{u^3} du$$

所以

$$\left| \frac{\int_0^x \cos \frac{1}{t} dt}{x} \right| \leq |x| \left| \sin \frac{1}{x} \right| + \frac{1}{|x|} \int_{\frac{1}{x}}^{+\infty} \frac{2}{u^3} du = |x| \left| \sin \frac{1}{x} \right| + |x| \rightarrow 0 (x \rightarrow 0)$$

所以 $\varphi'(0) = 0$.

例 3.3.17. 设 $0 < a < d$, $A_n = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} (a + kd)$, $G_n = \sqrt[n]{\prod_{k=0}^{n-1} (a + kd)}$, 试证 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{G_n}{A_n} = \frac{2}{e}$.

$$\text{证 由于 } \frac{G_n}{A_n} = \frac{\sqrt[n]{\prod_{k=0}^{n-1} (a + kd)}}{\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} (a + kd)} = \frac{\sqrt[n]{\prod_{k=0}^{n-1} (a + kd)}}{a + \frac{1}{2}(n-1)d} \stackrel{c=\frac{a}{d}}{=} \frac{\sqrt[n]{\prod_{k=0}^{n-1} \frac{c+k}{n}}}{\frac{c}{n} + \frac{n-1}{2n}},$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \ln \frac{c+k}{n} = \int_0^1 \ln x dx = -1 \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{c}{n} + \frac{n-1}{n} \right) = \frac{1}{2}$$

所以 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{G_n}{A_n} = \frac{2}{e}$.

定理 3.3.4 (Frullani 积分定理). 形如 $\int_0^{+\infty} \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx$ ($a > 0, b > 0$), 其中 $f(x)$ 在 $(0, +\infty)$ 内连续, 且 $f(0^+), f(+\infty) \in \mathbb{R}$, 则有

$$\int_0^{+\infty} \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx = (f(+\infty) - f(0^+)) \ln \frac{a}{b}.$$

若 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ 不存在, 但积分 $\int_0^{+\infty} \frac{f(x)}{x} dx$ 存在, 则

$$\int_0^{+\infty} \frac{f(ax) - f(bx)}{x} dx = -f(0) \ln \frac{a}{b}.$$

例 3.3.18. 求下列积分.

$$\begin{array}{ll} (1) \int_0^{+\infty} \frac{\arctan ax - \arctan bx}{x} dx. & (2) \int_0^1 \frac{x^{a-1} - x^{b-1}}{\ln x} dx. \\ (3) \int_0^{+\infty} \frac{1 - \cos ax}{x} \cos bx dx. & (4) \int_0^{+\infty} \left(\frac{x}{e^x - e^{-x}} - \frac{1}{2} \right) \frac{dx}{x^2}. \end{array}$$

(1) 取 $f(x) = \arctan x$, 则 $f(+\infty) = \frac{\pi}{2}, f(0^+) = 0$, 故原积分 $= \frac{\pi}{2} \ln \frac{a}{b}$.

(2) 令 $\ln x = -t$, 原式化为 $\int_0^{+\infty} \frac{e^{-bt} - e^{-at}}{t} dt = \ln \frac{a}{b}$.

(3) 当 $a = b$ 时, 积分化为

$$\int_0^{+\infty} \frac{\cos ax - \cos^2 ax}{x} dx = \int_0^1 \frac{\cos ax - \cos^2 ax}{x} dx + \int_1^{+\infty} \frac{\cos ax - \cos^2 ax}{x} dx$$

由于 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos ax - \cos^2 ax}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos ax}{x} \stackrel{L'H}{=} \lim_{x \rightarrow 0} a \sin ax = 0$, 故 $\int_0^1 \frac{\cos ax - \cos^2 ax}{x} dx$ 为正常积分, 而

$$\int_1^{+\infty} \frac{\cos ax - \cos^2 ax}{x} dx = \int_1^{+\infty} \frac{\cos ax}{x} dx - \int_1^{+\infty} \frac{\cos^2 ax}{x} dx$$

由 Dirichlet 判别法, $\int_1^{+\infty} \frac{\cos ax}{x} dx$ 收敛, 又

$$\int_1^{+\infty} \frac{\cos^2 ax}{x} dx = \int_1^{+\infty} \frac{\frac{1 + \cos 2ax}{2}}{x} dx = \int_1^{+\infty} \frac{dx}{2x} + \int_1^{+\infty} \frac{\cos 2ax}{2x} dx$$

由 Dirichlet 判别法知 $\int_1^{+\infty} \frac{\cos 2ax}{2x} dx$ 收敛, 但 $\int_1^{+\infty} \frac{dx}{2x}$ 发散, 从而当 $a = b$ 时, 原积分发散;
当 $a > b$ 时,

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{+\infty} \frac{1 - \cos ax}{x} \cos bx dx = \int_0^{+\infty} \frac{2 \sin^2 \frac{a}{2} x}{x} \cos bx dx = \int_0^{+\infty} \frac{\sin \frac{a}{2} x (2 \sin \frac{a}{2} x \cos bx)}{x} dx \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{\sin \frac{a}{2} x [\sin(\frac{a}{2} + b)x + \sin(\frac{a}{2} - b)x]}{x} dx \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{\frac{1}{2} [\cos(-b)x - \cos(a+b)x] + \frac{1}{2} [\cos bx - \cos(a-b)x]}{x} dx \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{\cos bx - \cos(a+b)}{x} dx + \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{\cos bx - \cos(a-b)}{x} dx \end{aligned}$$

取 $f(x) = \cos x$, 则 $f(0^+) = 1$, $\lim_{x \rightarrow +\infty} \cos x$ 不存在, 但 $\int_0^{+\infty} \frac{f(x)}{x} dx = \int_0^{+\infty} \frac{\cos x}{x} dx$ 存在, 于是

$$\int_0^{+\infty} \frac{1 - \cos ax}{x} \cos bxdx = \frac{1}{2} \ln \frac{a+b}{b} + \frac{1}{2} \ln \frac{a-b}{b} = \frac{1}{2} \ln \frac{a^2 - b^2}{b^2} = \ln \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}$$

若 $a < b$, $\int_0^{+\infty} \frac{1 - \cos ax}{x} \cos bxdx = \ln \frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{b}$, 总之, 当 $a \neq b$ 时, 原积分 $= \ln \frac{\sqrt{|a^2 - b^2|}}{b}$.

(4) 先将 $\frac{1}{x^2} \left(\frac{x}{e^x - e^{-x}} - \frac{1}{2} \right)$ 展开,

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{x^2} \left(\frac{x}{e^x - e^{-x}} - \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{x^2} \left(\frac{xe^x}{e^{2x} - 1} - \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{x^2} \left[\frac{x(e^x + 1)}{e^{2x} - 1} - \frac{x}{e^{2x} - 1} - \frac{1}{2} \right] \\ &= \frac{1}{x^2} \left(\frac{x}{e^x - 1} - \frac{x}{e^{2x} - 1} - \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2x} \left(\frac{2}{e^x - 1} - \frac{2}{e^{2x} - 1} - \frac{1}{x} \right) \\ &= \frac{1}{2x} \left(-e^{-x} + e^{-2x} + \frac{2}{e^x - 1} - \frac{2}{x} + e^{-x} - \frac{2}{e^{2x} - 1} + \frac{1}{x} - e^{-2x} \right) \\ &= -\frac{1}{2x} (e^{-x} - e^{-2x}) + \frac{1}{x} \left(\frac{1}{e^x - 1} - \frac{1}{x} + \frac{e^{-x}}{2} \right) - \frac{1}{x} \left(\frac{1}{e^{2x} - 1} - \frac{1}{2x} + \frac{e^{-2x}}{2} \right) \end{aligned}$$

于是

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} \left(\frac{x}{e^x - e^{-x}} - \frac{1}{2} \right) \frac{dx}{x^2} &= \int_0^{+\infty} -\frac{1}{2x} (e^{-x} - e^{-2x}) dx + \int_0^{+\infty} \frac{1}{x} \left(\frac{1}{e^x - 1} - \frac{1}{x} + \frac{e^{-x}}{2} \right) dx \\ &\quad - \int_0^{+\infty} \frac{1}{x} \left(\frac{1}{e^{2x} - 1} - \frac{1}{2x} + \frac{e^{-2x}}{2} \right) dx \end{aligned}$$

在上式右端第二个积分中令 $x = 2t$, 于是

$$\int_0^{+\infty} \frac{1}{x} \left(\frac{1}{e^x - 1} - \frac{1}{x} + \frac{e^{-x}}{2} \right) dx = \int_0^{+\infty} \frac{1}{t} \left(\frac{1}{e^{2t} - 1} - \frac{1}{2t} + \frac{e^{-2t}}{2} \right) dt$$

因此

$$\int_0^{+\infty} \left(\frac{x}{e^x - e^{-x}} - \frac{1}{2} \right) \frac{dx}{x^2} = -\frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \frac{e^{-x} - e^{-2x}}{x} dx = -\frac{1}{2} \ln 2.$$

3.3.4 反常积分综合性问题

例 3.3.19. 求曲线 $y = 2e^{-x} \sin x$ ($x \geq 0$) 与 x 轴围成的无界图形的面积 S .

由积分的几何意义, 得

$$S = \lim_{A \rightarrow +\infty} \int_0^A |2e^{-x} \sin x| dx = \int_0^{+\infty} |2e^{-x} \sin x| dx = 2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \int_{n\pi}^{(n+1)\pi} e^{-x} \sin x dx$$

由于 $\int e^{-x} \sin x dx = -\frac{1}{2} e^{-x} (\sin x + \cos x) + C$, 所以

$$\int_{n\pi}^{(n+1)\pi} e^{-x} \sin x dx = -\frac{1}{2} e^{-x} (\sin x + \cos x) \Big|_{n\pi}^{(n+1)\pi} = -\frac{1}{2} [e^{-(n+1)\pi} (-1)^{n+1} - e^{-n\pi} (-1)^n]$$

代入以上面积计算的积分结果, 得

$$\begin{aligned} S &= 2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \int_{n\pi}^{(n+1)\pi} e^{-x} \sin x dx = 2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} [e^{-(n+1)\pi} (-1)^{n+1} - e^{-n\pi} (-1)^n] \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} e^{-(n+1)\pi} + \sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\pi} = \frac{e^{-\pi} + 1}{1 - e^{-\pi}} = \frac{e^\pi + 1}{e^\pi - 1}. \end{aligned}$$

例 3.3.20 (2023 四川大学). 计算 $I = \lim_{x \rightarrow +\infty} x \int_x^{+\infty} \frac{|\sin t|}{t^2} dt$.

法一: 设 $f(x) = \int_x^{+\infty} \frac{|\sin t|}{t^2} dt$, $g(x) = \frac{1}{x}$, 于是由函数型 Stolz 定理以及第一积分中值定理, 可知

$$I = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} \stackrel{\text{Stolz}}{=} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x + \pi) - f(x)}{g(x + \pi) - g(x)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{\frac{1}{x + \pi} - \frac{1}{x}} \left(\int_{x+\pi}^{+\infty} \frac{|\sin t|}{t^2} dt - \int_x^{+\infty} \frac{|\sin t|}{t^2} dt \right)$$

$$= \frac{1}{\pi} \lim_{x \rightarrow +\infty} (x + \pi) x \int_x^{x+\pi} \frac{|\sin t|}{t^2} dt = \frac{1}{\pi} \lim_{x \rightarrow +\infty} (x + \pi) x \frac{1}{\xi^2} \int_0^\pi |\sin t| dt = \frac{2}{\pi} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x(x + \pi)}{\xi^2}$$

因为 $\xi \in (x, x + \pi)$, 故 $\frac{x(x + \pi)}{(x + \pi)^2} < \frac{x(x + \pi)}{\xi^2} < \frac{x(x + \pi)}{x^2}$, 故由夹逼准则得原极限等于 $\frac{2}{\pi}$.

法二: 由题意可知,

$$\int_x^{x+\pi} \frac{|\sin t|}{t^2} dt = \sum_{n=0}^{\infty} \int_{x+n\pi}^{x+(n+1)\pi} \frac{|\sin t|}{t^2} dt$$

由第一积分中值定理可知, $\exists \xi_n \in (x + n\pi, x + (n + 1)\pi)$, 使得

$$\int_{x+n\pi}^{x+(n+1)\pi} \frac{|\sin t|}{t^2} dt = \frac{1}{\xi_n^2} \int_{x+n\pi}^{x+(n+1)\pi} |\sin t| dt = \frac{1}{\xi_n^2} \int_0^\pi |\sin t| dt = \frac{2}{\xi_n^2}$$

即

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{[x + (n + 1)\pi]^2} < \frac{2}{\xi_n^2} < \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{(x + n\pi)^2}$$

一方面,

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{(x + n\pi)^2} < \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{(x + n\pi)(x + n\pi - \pi)} = \frac{2}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{x + n\pi - \pi} - \frac{1}{x + n\pi} \right) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{x - \pi} - \frac{1}{x + n\pi} \right) < \frac{2}{\pi} \frac{1}{x - \pi}$$

另一方面,

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{[x + (n + 1)\pi]^2} > \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{[x + (n + 1)\pi][x + (n + 2)\pi]} > \frac{2}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{x + (n + 1)\pi} - \frac{1}{x + (n + 2)\pi} \right] = \frac{2}{\pi} \left[\frac{1}{x + \pi} - \frac{1}{x + (n + 2)\pi} \right]$$

最后由夹逼准则得原极限等于 $\frac{2}{\pi}$.

3.4 特殊构型积分补充

3.4.1 Euler 积分

Euler 积分在概率论和统计学中有重要的应用, 特别是在 Gauss 分布的概率密度函数中. 这个积分在实际计算中比较困难, 因为它没有一个基本的初等函数的原函数, 因此无法通过常规的积分技巧来计算.

Euler 积分及其基本变形

定义 3.4.1 (第二型 Euler 积分). $\Gamma(\alpha) = \int_0^{+\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx (\alpha > 0)$.

基本变形:

$$\Gamma(\alpha) = 2 \int_0^{+\infty} t^{2\alpha-1} e^{-t^2} dt (\alpha > 0), \quad \Gamma(\alpha) = \int_0^1 \ln^{\alpha-1} \frac{1}{t} dt (\alpha > 0).$$

定理 3.4.1 (第二型递推性质). $\Gamma(\alpha + 1) = \alpha \Gamma(\alpha)$, 并且 $\Gamma(1) = 1$, $\Gamma(n + 1) = n!$.

又因为 $\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$, 由定理 3.4.1 进行递推, 可得

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

Γ 函数只在 x 正半轴有定义, 利用递推性质可定义 $\alpha \leq 0$ 时的 $\Gamma(\alpha)$.

定理 3.4.2 (第二型余元公式). $\Gamma(\alpha)\Gamma(1 - \alpha) = \frac{\pi}{\sin \alpha \pi} (0 < \alpha < 1)$.

定理 3.4.3 (第二型倍元公式). $\Gamma(2\alpha) = \frac{2^{2\alpha-1}}{\sqrt{\pi}} \Gamma(\alpha) \Gamma\left(\alpha + \frac{1}{2}\right)$ ($\alpha > 0$).

定义 3.4.2 (第一型 Euler 积分). $B(p, q) = \int_0^1 x^{p-1} (1-x)^{q-1} dx$ ($p, q > 0$).

基本变形:

$$B(p, q) = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^{2p-1} \theta \sin^{2q-1} \theta d\theta, \quad B(p, q) = \int_0^{+\infty} \frac{u^{p-1}}{(1+u)^{p+q}} du, \quad B(p, q) = \int_0^1 \frac{x^{p-1} + x^{q-1}}{(1+x)^{p+q}} dx.$$

定理 3.4.4 (对称性质). $B(p, q) = B(q, p)$.

定理 3.4.5 (第一型递推性质). $B(p, q) = \frac{q-1}{p+q-1} B(p, q-1) = \frac{p-1}{p+q-1} B(p-1, q)$. 特别地, 对于正整数 m, n , 有

$$B(m, n) = \frac{(n-1)!(m-1)!}{(m+n-1)!}.$$

定理 3.4.6 (第一型余元公式). $B(p, 1-p) = \frac{\pi}{\sin p\pi}$ ($0 < p < 1$). 特别地, $B\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) = \pi$.

定理 3.4.7 (Dirichlet 定理). $B(p, q) = \frac{\Gamma(p)\Gamma(q)}{\Gamma(p+q)}$.

利用 Euler 积分表示其他积分

例 3.4.1. 已知 $I_n = \int_1^{+\infty} \frac{\sqrt{t-1}}{t^n} dt$ ($n \geq 2$), 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{I_{n+1}}{I_n}$.

$I_n = \int_1^{+\infty} (t-1)^{\frac{1}{2}} t^{-n} dt$ 并令 $\frac{1}{t} = x$, 于是

$$I_n = \int_0^1 \left(\frac{1}{x} - 1\right)^{\frac{1}{2}} x^{n-2} dx = \int_0^1 (1-x)^{\frac{1}{2}} x^{n-\frac{5}{2}} dx = B\left(n - \frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right)$$

则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{I_{n+1}}{I_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{B\left(n - \frac{1}{2}, \frac{3}{2}\right)}{B\left(n - \frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n - \frac{3}{2}}{n} \cdot \frac{B\left(n - \frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right)}{B\left(n - \frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right)} = 1.$$

3.4.2 Dirichlet 积分

引理 3.4.1 (Dirichlet 核). 在区间 $(0, \pi)$ 上定义 $D_n = \frac{\sin \frac{(2n+1)x}{2}}{2 \sin \frac{x}{2}}$, $n \in \mathbb{N}_+$, 则有

$$\int_0^\pi D_n(x) dx = \frac{\pi}{2}.$$

证 显然, D_n 在 $x=0$ 处无定义, 但是 $\lim_{x \rightarrow 0^+} D_n(x) = \frac{2n+1}{2}$, 因此 D_n 在 $[0, \pi]$ 可积, 因为有三角恒等式

$$2 \sin \frac{x}{2} \left(\frac{1}{2} + \sum_{k=1}^n \cos kx dx \right) = \sin \frac{(2n+1)x}{2}$$

于是, $D_n = \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^n \cos kx$, 所以, 不难得到

$$\int_0^\pi D_n(x) dx = \int_0^\pi \left(\frac{1}{2} + \sum_{k=1}^n \cos kx \right) dx = \frac{\pi}{2}.$$

定理 3.4.8 (Dirichlet 积分等式). $\int_0^{+\infty} \frac{\sin x}{x} dx = \frac{\pi}{2}$.

证 易知该反常积分条件收敛, 根据引理 3.4.1 有, $\int_0^\pi \frac{\sin \frac{(2n+1)\pi}{2}}{2 \sin \frac{x}{2}} dx = \frac{\pi}{2}$, 考虑将其分母换为 x 所产生的影响, 由

L'Hospital 法则, 有

$$f(x) = \frac{1}{x} - \frac{1}{2 \sin \frac{x}{2}} = O(x) \quad (x \rightarrow 0)$$

因此 f 在 $[0, \pi]$ 上常义可积, 由 *Riemann-Lebesgue 定理*, 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\pi f(x) \sin \left(n + \frac{1}{2} \right) x dx = 0$$

即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{\sin \left(n + \frac{1}{2} \right) x}{x} dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\pi \frac{\sin \left(n + \frac{1}{2} \right) x}{2 \sin \frac{x}{2}} dx = \frac{\pi}{2}$$

最后, 作代换 $t = \left(n + \frac{1}{2} \right) x$, 即得

$$\int_0^\pi \frac{\sin \left(n + \frac{1}{2} \right) x}{x} dx = \int_0^{(n+\frac{1}{2})\pi} \frac{\sin t}{t} dt = \frac{\pi}{2}.$$

3.4.3 Lobachevsky 积分法

定理 3.4.9 (Lobachevsky 积分法). 若 $f(x)$ 在 $x \in [0, +\infty)$ 范围内满足 $f(x + \pi) = f(x)$ 及 $f(\pi - x) = f(x)$, 则

$$\int_0^{+\infty} f(x) \frac{\sin x}{x} dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(x) dx.$$

当 $f(x) = 1$ 时, 便是 Dirichlet 积分.

3.4.4 Fresnel 积分与 Fejér 积分

定理 3.4.10 (Fresnel 积分等式). $\int_{-\infty}^{+\infty} \sin x^2 dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \cos x^2 dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$.

定理 3.4.11 (Fejér 积分). 假设 $k \in \mathbb{N}^+$, 则有以下四种形式的 Fejér 积分:

$$(1) \int_0^\pi \frac{\sin nx}{\sin x} dx = \begin{cases} 0, & n = 2k \\ \pi, & n = 2k - 1; \end{cases}$$

$$(2) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin nx}{\sin x} dx = \begin{cases} 2 \sum_{i=1}^k \frac{(-1)^{k-i}}{2k-1}, & n = 2k \\ \frac{\pi}{2}, & n = 2k - 1; \end{cases}$$

$$(3) \int_0^\pi \left(\frac{\sin nx}{\sin x} \right)^2 dx = n\pi;$$

$$(4) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{\sin nx}{\sin x} \right)^2 dx = \frac{n\pi}{2}.$$

3.4.5 Laplace 积分

定理 3.4.12 (Laplace 积分等式). $\int_0^{+\infty} \frac{\cos bx}{a^2 + x^2} dx = \frac{\pi}{2a} e^{-ab}$, $\int_0^{+\infty} \frac{x \sin bx}{a^2 + x^2} dx = \frac{\pi}{2} e^{-ab}$ ($a, b > 0$).

推论 3.4.1. 当 $4q > p^2$ 时, 有

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos x}{x^2 + px + q} dx &= \frac{2\pi}{\sqrt{4q - p^2}} e^{-\frac{\sqrt{4q - p^2}}{2}} \cos \frac{p}{2} \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin x}{x^2 + px + q} dx &= -\frac{2\pi}{\sqrt{4q - p^2}} e^{-\frac{\sqrt{4q - p^2}}{2}} \sin \frac{p}{2}. \end{aligned}$$

3.5 留数定理及其应用

留数定理是复变函数论中的一个重要定理, 用于计算复函数在孤立奇点处的积分值. 具体来说, 留数定理指出, 如果一个复函数在某个孤立奇点处解析 (即在该点附近可展开成幂级数), 那么该函数在该孤立奇点处的留数就等于以该孤立奇点为中心的 Laurent 级数展开式中负幂次的系数.

3.5.1 留数

若点 a 为函数 $f(z)$ 的解析点, 存在邻域 $|z - a| < R$, $f(z)$ 在领域内解析, 这时若在邻域内作圆 $C : |z - a| = r < R$, 那么根据 Cauchy 定理

$$\oint_C f(z) dz = 0$$

若点 b 为函数 $f(z)$ 的孤立奇点, 则函数在 $0 < |z - b| < R$ 内解析, 这是若作圆 $C : |z - a| = r < R$, 由于围道内有奇点, 所以

$$\oint_C f(z) dz \text{ 不一定为零}$$

在 $0 < |z - b| < R$ 的环域内 $f(z)$ 有 Laurent 展开:

$$f(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n (z - b)^n, a_n = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|z-b|=r} \frac{f(z)}{(z - b)^{n+1}} dz$$

令 $n = -1$, 即得

$$\oint_{|z-b|=r} f(z) dz = 2\pi i a_{-1}.$$

定义 3.5.1 (留数). 若 b 为 $f(z)$ 的孤立奇点, 定义函数 $f(z)$ 在孤立奇点 b 的留数等于 $f(z)$ 在 b 的空心邻域内 Laurent 展开式中 $(z - b)^{-1}$ 幂的系数 a_{-1} , 并记作 $\text{Res}[f(b)]$.

3.5.2 留数定理

如果我们要计算一闭合围道积分 $\oint_C f(z)dz$, 假设闭合围道内部, 被积函数除有限几个孤立奇点 b_k , 根据复连通区域 Cauchy 定理, 作小圆 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ 将每个奇点包围, 则

$$\oint_C f(z)dz = \sum_{k=1}^n \oint_{\gamma_k} f(z)dz = 2\pi i \sum_{k=1}^n \text{Res}[f(b_k)].$$

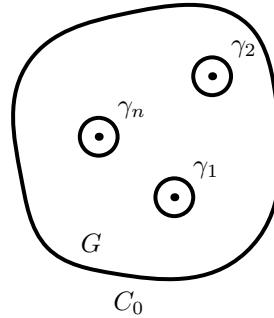


图 3.5.1

定理 3.5.1 (留数定理). 设 C 为简单闭合围道, G 为 C 的内区域, 若除 G 内有限个孤立奇点 b_k , $k = 1, 2, \dots, n$ 外, 函数在 \overline{G} 内解析, 则

$$\oint_C f(z)dz = 2\pi i \sum_{k=1}^n \text{Res}[f(b_k)].$$

3.5.3 留数计算

一阶极点

在 b 点的某一空心邻域内

$$f(z) = \frac{1}{z-b}\phi(z)$$

$\phi(z)$ 在含中心 b 点的邻域内解析, $\phi(b) \neq 0$, 作 Taylor 展开

$$\phi(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} \alpha_n (z-b)^n$$

于是

$$\text{Res}[f(b)] = \alpha_0 = \phi(b)$$

由连续性

$$\text{Res}[f(b)] = \lim_{z \rightarrow b} (z-b)f(z)$$

特别常见的情况, 当 $f(z) = \frac{P(z)}{Q(z)}$, $P(z)$ 和 $Q(z)$ 在 b 点及其邻域内解析, b 是 $Q(z)$ 的一阶零点, $P(b) \neq 0$, 则

$$\text{Res}[f(b)] = \lim_{z \rightarrow b} (z - b) \frac{P(z)}{Q(z)} = P(b) \lim_{z \rightarrow b} \frac{z - b}{Q(z)} \stackrel{L'}{=} \frac{P(b)}{Q'(b)}$$

高阶极点

设 $z = b$ 是 $f(z)$ 的 m 阶极点

$$f(z) = (z - b)^{-m} \phi(z)$$

$\phi(z)$ 在 b 的某个邻域内解析

$$\phi(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} \alpha_n (z - b)^n$$

$\phi(b) \neq 0$, 则

$$\text{Res}[f(b)] = \alpha_{m-1} = \frac{1}{(m-1)!} \phi^{(m-1)}(b)$$

将 b 换成极限 $z \rightarrow b$, 有

$$\text{Res}[f(b)] = \frac{1}{(m-1)!} \lim_{z \rightarrow b} \frac{d^{m-1}[(z - b)^m f(z)]}{dz^{m-1}}.$$

本性奇点或高阶极点

对于本性奇点时只能求 Laurent 展开系数 a_{-1} .

对于高阶极点, 很多情况下求展开系数往往比用高阶极点的留数公式简单, 对于 m 阶极点即求 $\phi(z) = (z - b)^m f(z)$ 的 Taylor 展开系数 a_{m-1} .

例 3.5.1. 函数 $f(z) = \frac{e^{iz}}{z(z^2 + 1)^2}$, 求 $\text{Res}[f(z)]$.

函数在 $z = i$ 有二阶极点, 这时

$$\phi(z) = (z - i)^2 \frac{e^{iz}}{z(z^2 + 1)^2} = \frac{e^{iz}}{z(z + i)^2}$$

要求 $m - 1 = 1$ 次项的系数 α_1 , 用待定系数法, 令 $z - i = t$, 于是

$$(t + i)(t + 2i)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n t^n = e^{i(t+i)} = e^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i^n}{n!} t^n$$

即

$$(-4i - 8t + \dots) \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n t^n = e^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i^n}{n!} t^n$$

先比较两边 0 次项系数

$$-4i\alpha_0 = e^{-1}$$

得 $\alpha_0 = \frac{i}{4e}$, 再比较两边 1 次项系数

$$-4i\alpha_1 - 8\alpha_0 = \frac{i}{e}$$

得 $\alpha_1 = -\frac{3}{4e}$, 所以

$$\text{Res}[f(i)] = -\frac{3}{4e}.$$

3.5.4 留数定理的应用

有理三角函数的积分

考虑积分 $I = \int_0^{2\pi} R(\cos \theta, \sin \theta) d\theta$, 其中 R 是 $\cos \theta, \sin \theta$ 的有理函数, 作变换

$$z = e^{i\theta}, \cos \theta = \frac{z + z^{-1}}{2} = \frac{z^2 + 1}{2z}, \sin \theta = \frac{z - z^{-1}}{2i} = \frac{z^2 - 1}{2iz}, d\theta = \frac{dz}{iz}$$

积分路径变换为 z 平面上的单位圆 $|z| = 1$, 于是

$$I = \oint_{|z|=1} R\left(\frac{z^2 + 1}{2z}, \frac{z^2 - 1}{2iz}\right) \frac{dz}{iz} = 2\pi \sum_{|z|<1} \operatorname{Res}\left[\frac{1}{z} R\left(\frac{z^2 + 1}{2z}, \frac{z^2 - 1}{2iz}\right)\right].$$

例 3.5.2. 计算积分 $I = \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{1 + \varepsilon \cos \theta} |\varepsilon| < 1$.

作变换 $z = e^{i\theta}$, 那么有

$$I = \oint_{|z|=1} \frac{1}{1 + \varepsilon \frac{z^2 + 1}{2z}} \frac{dz}{iz} = \frac{1}{i} \oint_{|z|=1} \frac{2}{\varepsilon z^2 + 2z + \varepsilon} dz = 2\pi \sum_{|z|<1} \operatorname{Res}\left[\frac{2}{\varepsilon z^2 + 2z + \varepsilon}\right]$$

解方程 $\varepsilon z^2 + 2z + \varepsilon = 0$, 可得被积函数两个一阶极点为

$$z_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - \varepsilon^2}}{\varepsilon}$$

其中 $|z_1| < 1$, $|z_2| > 1$, 于是

$$I = 2\pi \operatorname{Res}\left[\frac{2}{\varepsilon z^2 + 2z + \varepsilon}\right]_{z=z_1} = 2\pi \frac{2}{2\varepsilon z + 2} \Big|_{z=z_1} = \frac{2\pi}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}.$$

例 3.5.3. 计算积分 $\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{1 + \cos^2 \theta}$.

由 $\cos \theta = \frac{z^2 + 1}{2z}$, $d\theta = \frac{dz}{iz}$, 于是原式等价为

$$I = \oint_{\Gamma:|z|=1} \frac{4z dz}{i(z^4 + 6z^2 + 1)} \xrightarrow{z^2=u} \frac{4}{i} \oint_{\Gamma} \frac{du}{u^2 + 6u + 1} = 2\pi i \cdot \operatorname{Res}\left[\frac{4}{i} f(-3 + 2\sqrt{2})\right] = \sqrt{2}\pi.$$

将 $z^2 = u$ 替换后, 当 z 绕 Γ 一周时, u 亦在其上绕二周.

例 3.5.4. 计算 $I = \int_0^{2\pi} \frac{\cos 2\theta}{5 - 4 \cos \theta} d\theta$.

由 $\cos 2\theta = \frac{1}{2}(z^2 + z^{-2})$, $\cos \theta = \frac{1}{2}(z + z^{-1})$, $d\theta = \frac{dz}{iz}$, 于是

$$I = \oint_{|z|=1} \frac{\frac{1}{2}(z^2 + z^{-2})}{5 - 2(z + z^{-1})} \frac{dz}{iz} = \frac{i}{4} \oint_{|z|=1} \frac{(z^4 + 1) dz}{z^2 \left(z - \frac{1}{2}\right)(z - 2)} = -\frac{\pi}{2} \sum_{\text{上半平面}} \operatorname{Res}[f(z)]$$

其中 $f(z) = \frac{(z^4 + 1)}{z^2 \left(z - \frac{1}{2}\right)(z - 2)}$, 那么有

$$\operatorname{Res}[f(0)] = \frac{1}{1!} \lim_{z \rightarrow 0} \frac{d}{dz} \left[z^2 \cdot \frac{(z^4 + 1)}{z^2 \left(z - \frac{1}{2}\right)(z - 2)} \right] = \frac{5}{2}, \quad \operatorname{Res}\left[f\left(\frac{1}{2}\right)\right] = \frac{z^4 + 1}{z^2(z - 2)} \Big|_{z=\frac{1}{2}} = -\frac{17}{6}$$

于是 $I = -\frac{\pi}{2} \left(-\frac{17}{6} + \frac{5}{2}\right) = \frac{\pi}{6}$.

例 3.5.5. 计算 $I = \int_0^\pi \frac{\cos m\theta}{5 - 4 \cos \theta} d\theta$, m 是正整数.

积分号下的函数为 x 的偶函数, 故 $I = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\cos m\theta}{5 - 4 \cos \theta} d\theta$, 令

$$I_1 = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\cos m\theta}{5 - 4 \cos \theta} d\theta, I_2 = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\sin m\theta}{5 - 4 \cos \theta} d\theta$$

故有

$$I_1 + iI_2 = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{im\theta}}{5 - 4 \cos \theta} d\theta = \frac{i}{2} \oint_{|z|=1} \frac{z^m}{(z - \frac{1}{2})(z - 2)} dz$$

并且在圆周内部仅有一个一阶极点 $z = \frac{1}{2}$, 于是

$$\text{Res} \left[\frac{z^m}{z - 2} \right]_{z=\frac{1}{2}} = -\frac{1}{3 \cdot 2^{m-1}}$$

由留数定理,

$$I_1 + iI_2 = 2\pi i \cdot \frac{i}{2} \cdot \frac{1}{-3 \cdot 2^{m-1}} = \frac{\pi}{3 \cdot 2^{m-1}}$$

知

$$I_1 = \frac{\pi}{3 \cdot 2^{m-1}}, I_2 = 0$$

故所求积分 $I = \frac{1}{2} I_1 = \frac{\pi}{3 \cdot 2^m}$.

有理函数无穷积分

考虑积分 $I = \int_{-\infty}^{+\infty} R(x) dx$, 其中 $R(x)$ 为有理函数, 无穷积分定义为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = \lim_{\substack{R_1 \rightarrow +\infty \\ R_2 \rightarrow +\infty}} \int_{-R_1}^{R_2} f(x) dx$$

对于有理函数 $R(x) = P_n(x)/Q_m(x)$, 只有当分母多项式 $Q_m(x)$ 次数比分子多项式 $P_n(x)$ 次数至少大 2 时积分存在

$$m - n \geq 2$$

若积分存在, 则

$$I = \lim_{R \rightarrow +\infty} \int_{-R}^R R(x) dx$$

计算 $\int_{-R}^R R(x) dx$, 从复平面上看, 这是一个沿实轴的复变积分, 为应用留数定理, 必须先构造适当的围道, 我们补上以原点为圆心, R 为半径的上半圆 C_R , 如图 3.5.2 所示.

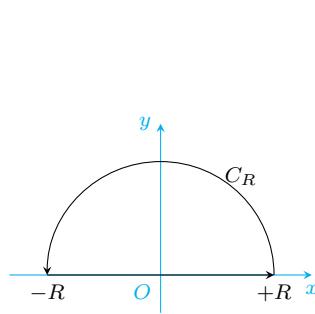


图 3.5.2

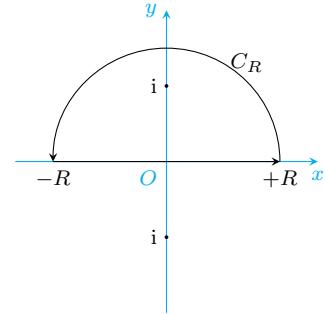


图 3.5.3

于是

$$\oint_C R(z) dz = \int_{-R}^R R(x) dx + \int_{C_R} R(z) dz$$

任何有理函数只有有限个的孤立奇点, 所以 $R(z)$ 在上半平面只有有限个孤立奇点, R 足够大时, 则围道包围上半平面所有的奇点, 由留数定理又有

$$\oint_C R(z) dz = 2\pi i \sum_{\text{上半平面}} \operatorname{Res}[R(z)]$$

对于无穷积分存在的有理函数 $R(z)$, 满足分母多项式次数比分子多项式次数至少大 2, 则

$$\lim_{z \rightarrow \infty} zR(z) = \lim_{z \rightarrow \infty} z \frac{P_n(x)}{Q_m(z)} = 0$$

由大圆弧定理

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} R(z) dz = 0$$

于是

$$\int_{-\infty}^{+\infty} R(x) dx = 2\pi i \sum_{\text{上半平面}} \operatorname{Res}[R(z)]$$

例 3.5.6. 计算积分 $I = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{(1+x^2)^3}$.

令 $f(x) = \frac{1}{(1+x^2)^3}$, $I = \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{-R}^R f(x) dx$, 考虑围道如图 3.5.3 所示, 则有

$$\begin{aligned} \oint_C f(z) dz &= \int_{-R}^R f(x) dx + \int_{C_R} f(z) dz = 2\pi i \sum_{\text{上半平面}} \operatorname{Res}[f(z)] = 2\pi i \operatorname{Res}[f(i)] \\ &= 2\pi i \cdot \frac{1}{2!} \lim_{z \rightarrow i} \frac{d^2}{dz^2} \left[\frac{(z-i)^3}{(1+z^2)^3} \right] = 2\pi i \cdot \frac{1}{2} \frac{d^2(z+i)^{-3}}{dz^2} \Big|_{z=i} = 2\pi i \cdot \left(-\frac{3}{16} i \right) = \frac{3\pi}{8} \end{aligned}$$

因为 $\lim_{z \rightarrow \infty} z \cdot \frac{1}{(1+z^2)^3} = 0$, 由大圆弧定理

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} f(z) dz = i\pi \cdot 0 = 0$$

于是原积分等于 $\frac{3\pi}{8}$.

例 3.5.7. 计算反常积分 $I = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{(x^2 + x + 1)^2}$.

令 $f(x) = \frac{1}{(x^2 + x + 1)^2}$, $I = \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{-R}^R f(x) dx$, 则有 $z_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{3}i}{2}$, 于是

$$\begin{aligned} \oint_C f(z) dz &= \int_{-R}^R f(x) dx + \int_{C_R} f(z) dz = 2\pi i \sum_{\text{上半平面}} \operatorname{Res}[f(z)] = 2\pi i \operatorname{Res}[f(z_1)] \\ &= 2\pi i \cdot \frac{1}{1!} \lim_{z \rightarrow z_1} \frac{d}{dz} \left[(z - z_1)^2 \frac{1}{(z^2 + z + 1)^2} \right] = 2\pi i \cdot \frac{d}{dz} (z - \bar{z}_1)^{-2} \Big|_{z=z_1} = \frac{4\pi}{3\sqrt{3}} \end{aligned}$$

因为 $\lim_{z \rightarrow \infty} z \cdot f(z) = 0$, 由大圆弧定理 $\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} f(z) dz = 0$, 故原积分等于 $\frac{4\pi}{3\sqrt{3}}$.

含三角函数的无穷积分

考虑积分 $I = \int_{-\infty}^{+\infty} R(x) e^{ipx} dx$, $p > 0$, 其中 $R(x)$ 为有理函数, 积分的实部和虚部分别为

$$\operatorname{Re} I = \int_{-\infty}^{+\infty} R(x) \cos px dx, \quad \operatorname{Im} I = \int_{-\infty}^{+\infty} R(x) \sin px dx$$

当且仅当有理函数 $R(x) = P_n(x)/Q_m(x)$ 的分母多项式 $Q_m(x)$ 次数比分子多项式 $P_n(x)$ 的次数大 1 时无穷积分存在.

$$m - n \geq 1$$

对于积分 I 同样考虑围道积分

$$\oint_C R(x) e^{ipz} dz = \int_{-R}^R R(x) e^{ipx} dx + \int_{C_R} R(z) e^{ipz} dz = 2\pi i \sum_{\text{上半平面}} \operatorname{Res}[R(z) e^{ipz}]$$

引理 3.5.1 (Jordan 引理). 设在 $0 \leq \arg z \leq \pi$ 的范围内, 当 $|z| \rightarrow \infty$ 时, $Q(z)$ 一致地趋近于 0, 则

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} Q(z) e^{ipz} dz = 0$$

其中 $p > 0$, C_R 是以原点为圆心, R 为半径的上半圆.

对于 $R(z)$, 满足分母多项式次数比分子多项式次数至少大 1, 则

$$\lim_{z \rightarrow \infty} R(z) = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{P_n(z)}{Q_m(z)} = 0$$

由 Jordan 引理

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} R(z) e^{ipz} dz = 0$$

于是

$$\int_{-\infty}^{+\infty} R(z) e^{ipx} dx = 2\pi i \sum_{\text{上半平面}} \operatorname{Res}[R(z) e^{ipz}].$$

例 3.5.8. 计算积分 $I = \int_0^{+\infty} \frac{x \sin x}{x^2 + a^2} dx$, $a > 0$.

令 $f(x) = \frac{x}{x^2 + a^2}$, 因为被积函数 $f(x) \sin x$ 为偶函数

$$\int_0^{+\infty} f(x) \sin x dx = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \sin x dx = \frac{1}{2} \operatorname{Im} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{ix} dx$$

考虑围道积分

$$\oint_C f(z) e^{iz} dz = \int_{-R}^R f(x) e^{ix} dx + \int_{C_R} f(z) e^{iz} dz = 2\pi i \sum_{\text{上半平面}} \operatorname{Res}[f(z) e^{iz}]$$

易知, $z = ai$ 为上半平面的唯一奇点, 且为一阶极点

$$\operatorname{Res}\left[\frac{ze^{iz}}{z^2 + a^2}\right] = \frac{ze^{iz}}{2z} \Big|_{z=ia} = \frac{1}{2} e^{-a}$$

所以

$$\int_{-R}^R f(x) e^{ix} dx + \int_{C_R} f(z) e^{iz} dz = \pi e^{-a} i$$

因为 $\lim_{z \rightarrow \infty} f(z) = 0$, 由 Jordan 引理 $\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} f(z) e^{iz} dz = 0$, 于是 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{ix} dx = \pi e^{-a} i$, 于是

$$I = \frac{1}{2} \operatorname{Im} \pi e^{-a} i = \frac{\pi}{2} e^{-a}.$$

例 3.5.9. 计算反常积分 $I = \int_0^{+\infty} \frac{\cos x}{(1+x^2)^3} dx$.

令 $f(x) = \frac{1}{(1+x^2)^3}$, 那么 $f(x) \cos x$ 为偶函数, 于是

$$I = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cos x dx = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{ix} dx$$

考虑围道积分

$$\oint_C f(z) e^{iz} dz = \int_{-R}^R f(x) e^{ix} dx + \int_{C_R} f(z) e^{iz} dz = 2\pi i \sum_{\text{上半平面}} \operatorname{Res}[f(z) e^{iz}]$$

易知, $z = i$ 为上半平面的唯一奇点, 且为三阶极点, 于是

$$\phi(z) = (z - i)^3 \frac{e^{iz}}{(1+z^2)^3} = \frac{e^{iz}}{(z+i)^3}$$

要求系数 α_2 , 用待定系数法, 令 $z - i = t$, 于是

$$(t+2i)^3 \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n t^n = e^{i(t+i)} = e^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i^n}{n!} t^n$$

即

$$(-8i - 12t + 6it^2 + \dots) \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n t^n = e^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i^n}{n!} t^n$$

先比较两边 0 次项系数

$$-8i\alpha_0 = e^{-1}$$

得 $\alpha_0 = \frac{i}{8e}$, 再比较两边 1 次项的系数

$$-8i\alpha_1 - 12\alpha_0 = \frac{i}{e}$$

得 $\alpha_1 = -\frac{5}{16e}$, 再比较两边 2 次项的系数

$$-8i\alpha_2 - 12\alpha_1 + 6i\alpha_0 = -\frac{1}{2e}$$

解得 $\alpha_2 = -\frac{7i}{16e}$, 即

$$\operatorname{Res}[f(z) e^{iz}] = -\frac{7i}{16e}$$

所以

$$\int_{-R}^R f(x) e^{ix} dx + \int_{C_R} f(z) e^{iz} dz = \frac{7\pi}{8e}$$

$\lim_{z \rightarrow \infty} f(z) = 0$, 由 Jordan 引理 $\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{C_R} f(z) e^{iz} dz = 0$, 于是 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{ix} dx = \frac{7\pi}{8e}$, 于是

$$I = \operatorname{Re} \frac{1}{2} \cdot \frac{7\pi}{8e} = \frac{7\pi}{16e}.$$

实轴上有奇点的情形

设被积函数在实轴上有奇点, 则积分 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx$ 为瑕积分, 假设瑕点为 c , 瑕积分定义为: 存在一点 c 及邻域 (δ_1, δ_2) , 有

$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{\delta_1 \rightarrow 0} \int_a^{c-\delta_1} f(x)dx + \lim_{\delta_2} \int_{c+\delta_2}^b f(x)dx$$

如果这两个极限都不存在, 但是 $\lim_{\delta \rightarrow 0} \left[\int_a^{c-\delta} f(x)dx + \int_{c+\delta}^b f(x)dx \right]$ 存在, 定义瑕积分的主值为:

$$\text{v.p. } \int_a^b f(x)dx = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left[\int_a^{c-\delta} f(x)dx + \int_{c+\delta}^b f(x)dx \right]$$

当然, 如果瑕积分存在, 则主值也存在, 且它们一定相等, 所以, 我们考虑

$$I = \text{v.p. } \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = \lim_{\substack{R \rightarrow \infty \\ \delta \rightarrow 0}} \left[\int_{-R}^{c-\delta} f(x)dx + \int_{c+\delta}^R f(x)dx \right]$$

因为实轴上 c 点是被积函数的奇点, 必须绕过奇点来构成闭合的积分围道, 如图 3.5.4 所示.

$$\oint_C f(z)dz = 2\pi i \sum_{\text{二象限}} \text{Res}[f(z)] = \int_{-R}^{c-\delta} f(x)dx + \int_{C_\delta} f(z)dz + \int_{c+\delta}^R f(x)dx + \int_{C_R} f(z)dz$$

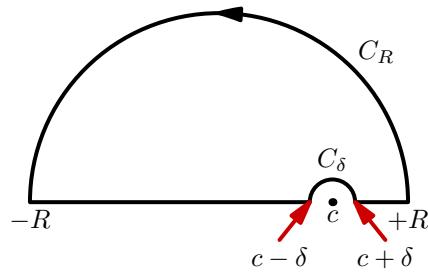


图 3.5.4

对于大圆弧积分, 我们可以用大圆弧定理或 Jordan 引理处理, 对于小圆弧 C_δ 的积分, 则需要用到小圆弧定理.

第 4 章

向量代数与空间解析几何

“数缺形时少直观，形少数时难入微；
数形结合百般好，隔离分家万事休。”

——华罗庚

向量代数是一种数学工具，用于处理向量的运算和性质。向量是具有大小和方向的量，可以用箭头表示。向量代数涉及向量的加法、减法、数量乘法、点乘、叉乘等运算，以及向量的长度、方向、单位向量等性质。它在物理学、工程学和计算机图形学等领域有广泛的应用。

空间解析几何是研究点、直线、平面等几何对象在三维空间中的性质和关系的分支学科。它使用坐标系和代数方法来描述和研究几何对象。在空间解析几何中，点可以用三个坐标表示，直线可以用参数方程或者两点式方程表示，平面可以用法向量和一个过点的方程表示。通过代数方法，可以研究几何对象之间的距离、夹角、交点等性质。

向量代数和空间解析几何密切相关，向量代数提供了处理空间几何问题的数学工具，而空间解析几何则为向量代数提供了几何背景和应用场景。它们在数学和物理学等领域中都有重要的应用。

4.1 向量代数

4.1.1 模、方向角、投影

定义 4.1.1 (投影). \vec{a} 在 \vec{b} 方向上的投影记为 $\text{Prj}_{\vec{b}}\vec{a}$, 且 $\text{Prj}_{\vec{b}}\vec{a} = |\vec{a}| \cdot \cos \langle \vec{a}, \vec{b} \rangle$.

例 4.1.1. 设 $\vec{a} = (2, 1, -1)$, $\vec{b} = (1, -3, 1)$, 试在 \vec{a}, \vec{b} 所决定的平面内, 求与 \vec{a} 垂直, 且模为 $\sqrt{93}$ 的向量.

法一: 设所求向量为 $\vec{c} = (x, y, z)$, 则由题设有 $\vec{c} \perp \vec{a} \times \vec{b}$, $\vec{c} \perp \vec{a}$, $|\vec{c}| = \sqrt{93}$, 而 $\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 2 & 1 & -1 \\ 1 & -3 & 1 \end{vmatrix} = -2\vec{i} - 3\vec{j} - 7\vec{k}$,

于是有 $\begin{cases} -2x - 3y - 7z = 0 \\ 2x + y - z = 0 \\ x^2 + y^2 + z^2 = 93 \end{cases}$, 解得 $x = \pm 5$, $y = \mp 8$, $z = \pm 2$, 从而 $\vec{c} = \pm(5, -8, 2)$.

法二：设所求向量为 \vec{c} , 则由题设有 $\vec{c} \perp \vec{a} \times \vec{b}$, $\vec{c} \perp \vec{a}$, $|\vec{c}| = \sqrt{93}$, 于是 $\vec{c}/|(\vec{a} \times \vec{b}) \times \vec{a}|$, 从而得

$$\vec{c} = |\vec{c}| \cdot \left(\pm \frac{(\vec{a} \times \vec{b}) \times \vec{a}}{|(\vec{a} \times \vec{b}) \times \vec{a}|} \right) = \pm(5, -8, 2).$$

法三：设所求向量为 \vec{c} , 则可设 $\vec{c} = \lambda \vec{a} + \mu \vec{b} = (2\lambda + \mu, \lambda - 3\mu, -\lambda + \mu)$, 由已知 $\vec{c} \perp \vec{a}$ 得 $\vec{c} \cdot \vec{a} = 0$, 即

$$2(2\lambda + \mu) + \lambda - 3\mu - (-\lambda + \mu) = 0$$

解得 $\mu = 3\lambda$, 又 $|\vec{c}| = \sqrt{93}$, 所以 $\sqrt{(2\lambda + \mu)^2 + (\lambda - 3\mu)^2 + (\mu - \lambda)^2} = \sqrt{93}$, 代入 $\mu = 3\lambda$, 得 $\lambda^2 = 1$, 解得 $\lambda = \pm 1, \mu = \pm 3$, 故 $\vec{c} = \pm(5, -8, 2)$.

例 4.1.2. 设向量 $\mathbf{a} + 3\mathbf{b}$ 与 $\mathbf{a} - 4\mathbf{b}$ 分别垂直于向量 $7\mathbf{a} - 5\mathbf{b}$ 与 $7\mathbf{a} - 2\mathbf{b}$, 试求 \mathbf{a} 与 \mathbf{b} 之间的夹角.

因为 $(\mathbf{a} + 3\mathbf{b}) \perp (7\mathbf{a} - 5\mathbf{b})$, 所以 $7\mathbf{a}^2 - 15\mathbf{b}^2 = -16\mathbf{a}\mathbf{b}$, 同理可得 $7\mathbf{a}^2 + 8\mathbf{b}^2 = 30\mathbf{a}\mathbf{b}$, 联立解得 $\begin{cases} \mathbf{b}^2 = 2\mathbf{a}\mathbf{b} \\ \mathbf{a}^2 = \mathbf{b}^2 \end{cases}$, 于是 $\cos < \mathbf{a}, \mathbf{b} > = \frac{\mathbf{a}\mathbf{b}}{|\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}|} = \frac{1}{3}$, 因此 \mathbf{a} 与 \mathbf{b} 之间的夹角为 $\frac{\pi}{3}$.

4.1.2 数量积、向量积、混合积

数量积

定义 4.1.2 (向量的数量积 (点乘积或内积)). 向量 $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, a_3\}$ 与 $\mathbf{b} = \{b_1, b_2, b_3\}$ 的数量积是一个数 $|\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \cos(\widehat{\mathbf{a}, \mathbf{b}})$ (其中 $0 \leq \widehat{\mathbf{a}, \mathbf{b}} \leq \pi$), 记作 $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$. 若向量 \mathbf{a} 或 \mathbf{b} 为零向量时, 则定义 $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = 0$, 数量积 $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ 的坐标表示式为

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3.$$

定义 4.1.3 (向量正交). 两个向量 \mathbf{a}, \mathbf{b} 垂直 (或称正交), 记作 $\mathbf{a} \perp \mathbf{b}$, 特别地, 规定零向量与任一向量垂直.

数量积有以下基本性质:

$$(1) \quad \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \mathbf{b} \cdot \mathbf{a}.$$

$$(2) \quad (\lambda \mathbf{a}) \cdot \mathbf{b} = \lambda(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}).$$

$$(3) \quad (\mathbf{a} + \mathbf{b}) \cdot \mathbf{c} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{c} + \mathbf{b} \cdot \mathbf{c}.$$

$$(4) \quad \mathbf{a} \perp \mathbf{b} \text{ 的充分必要条件是 } \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = 0.$$

向量积

定义 4.1.4 (向量的向量积 (叉乘积或外积)). 两个向量 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 的向量积是一个向量 \mathbf{c} , 记为 $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$, 即 $\mathbf{c} = \mathbf{a} \times \mathbf{b}$; \mathbf{c} 的模等于 $|\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \sin(\widehat{\mathbf{a}, \mathbf{b}})$, \mathbf{c} 的方向垂直于 \mathbf{a} 与 \mathbf{b} 所决定的平面, 且 $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ 顺次构成右手系. 若向量 \mathbf{a} 或 \mathbf{b} 为零向量时, 则定义 $\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \mathbf{0}$, 向量积 $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$ 坐标表示式为

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix} = \left\{ \begin{vmatrix} a_2 & a_3 \\ b_2 & b_3 \end{vmatrix}, - \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ b_1 & b_3 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix} \right\}.$$

向量积有以下的性质:

- (1) $\mathbf{a} \times \mathbf{b} = -\mathbf{b} \times \mathbf{a}$.
- (2) $(\lambda \mathbf{a}) \times \mathbf{b} = \lambda(\mathbf{a} \times \mathbf{b})$.
- (3) $(\mathbf{a} + \mathbf{b}) \times \mathbf{c} = \mathbf{a} \times \mathbf{c} + \mathbf{b} \times \mathbf{c}$.
- (4) $\mathbf{a} // \mathbf{b}$ 的充分必要条件是 $\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \mathbf{0}$.

定理 4.1.1 (二重外积公式). $\vec{a} \times (\vec{b} \times \vec{c}) = \vec{b} \cdot (\vec{a} \cdot \vec{c}) - \vec{c} \cdot (\vec{a} \cdot \vec{b})$.

例 4.1.3 (2023 四川大学). 设向量 $\vec{a} = (1, 2, 3)$, $\vec{b} = (4, 5, 6)$, $\vec{c} = (7, 8, 9)$, 求 $\vec{a} \times (\vec{b} \times \vec{c})$.

法一: 由向量积的计算公式计算 $\vec{b} \times \vec{c}$:

$$\vec{b} \times \vec{c} = \left(\begin{vmatrix} 5 & 6 \\ 8 & 9 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 6 & 4 \\ 9 & 7 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 4 & 5 \\ 7 & 8 \end{vmatrix} \right) = (-3, 6, -3)$$

进一步计算 $\vec{a} \times (\vec{b} \times \vec{c})$:

$$\vec{a} \times (\vec{b} \times \vec{c}) = \left(\begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 6 & -3 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 3 & 1 \\ -3 & -3 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ -3 & 6 \end{vmatrix} \right) = (-24, -6, 12).$$

法二: 由二重外积公式: $\vec{a} \times (\vec{b} \times \vec{c}) = \vec{b} \cdot (\vec{a} \cdot \vec{c}) - \vec{c} \cdot (\vec{a} \cdot \vec{b})$, 其中

$$\vec{a} \cdot \vec{c} = 50, \quad \vec{a} \cdot \vec{b} = 32$$

于是得 $\vec{a} \times (\vec{b} \times \vec{c}) = (-24, -6, 12)$.

定理 4.1.2 (Lagrange 恒等式). 对于任意两个向量 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} , 满足以下恒等关系式:

$$|\mathbf{a} \times \mathbf{b}|^2 = |\mathbf{a}|^2 |\mathbf{b}|^2 - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})^2 = \begin{vmatrix} \mathbf{a} \cdot \mathbf{a} & \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \\ \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} & \mathbf{b} \cdot \mathbf{b} \end{vmatrix}.$$

混合积

定义 4.1.5 (向量的混合积). 设 $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, a_3\}$, $\mathbf{b} = \{b_1, b_2, b_3\}$, $\mathbf{c} = \{c_1, c_2, c_3\}$, 则称 $(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{c}$ 为向量 $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ 的混合积, 记为 $[\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}]$.

定理 4.1.3 (共面条件). 混合积是一数量, 其几何意义为: 混合积的绝对值等于以 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{c} 为相邻三条棱的平行六面体的体积. 因此, 向量 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{c} 共面的充分必要条件是 $(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{c} = 0$.

4.2 空间解析几何

4.2.1 空间平面与直线

定理 4.2.1 (线轴夹角余弦平方和公式). 设一直线与三坐标轴的夹角依次为 α, β, γ , 则有

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1.$$

证 设直线上一点坐标为 $P(x_0, y_0, z_0)$, 坐标轴的单位向量依次为 $\mathbf{i} = (1, 0, 0), \mathbf{j} = (0, 1, 0), \mathbf{k} = (0, 0, 1)$, 由夹角余弦公式

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{i}}{|\mathbf{p}| \cdot |\mathbf{i}|} = \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}} \\ \cos \beta = \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{j}}{|\mathbf{p}| \cdot |\mathbf{j}|} = \frac{y_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}} \\ \cos \gamma = \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{k}}{|\mathbf{p}| \cdot |\mathbf{k}|} = \frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}} \end{cases}$$

上式平方相加即得证.

定理 4.2.2 (线面夹角余弦平方和公式). 设一直线与三坐标平面的夹角依次为 u, v, w , 则有

$$\cos^2 u + \cos^2 v + \cos^2 w = 2.$$

证 设直线与 x, y, z 轴的夹角依次为 α, β, γ , 于是有

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\pi}{2} - u \\ \beta = \frac{\pi}{2} - v \\ \gamma = \frac{\pi}{2} - w \end{cases}$$

且 $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$, 所以

$$\cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - u \right) + \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - v \right) + \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - w \right) = 1$$

即 $\sin^2 u + \sin^2 v + \sin^2 w = 1$, 从而有 $\cos^2 u + \cos^2 v + \cos^2 w = 2$.

4.2.2 空间平面、直线的方程及位置关系

平面方程

例 4.2.1. 试用平面方程方法判断直线

$$L_1: \frac{x+1}{1} = \frac{y}{1} = \frac{z-1}{2}, \quad L_2: \frac{x}{1} = \frac{y+1}{3} = \frac{z-2}{4}$$

是否在同一平面上, 若不在同一平面上, 试求两直线的距离.

L_1 的一般方程为 $\begin{cases} x - y + 1 = 0 \\ 2y - z + 1 = 0 \end{cases}$, 则平面方程为

$$x - y + 1 + \lambda(2y - z + 1) = 0 \Rightarrow x + (2\lambda - 1)y - \lambda z + 1 + \lambda = 0$$

那么平面束的法向量为 $\vec{n} = (1, 2\lambda - 1, -\lambda)$, 那么 $(1, 2\lambda - 1, -\lambda) \cdot (1, 3, 4) = 0 \Rightarrow \lambda = 1$, 那么平面方程为 $x + y - z + 2 = 0$, 但直线 L_2 上的一点 $(0, -1, 2)$, 并不在该平面上, 故两直线不可能同一平面, 两直线的方向向量, 以及线上一点的坐标分别为

$$\vec{s}_1 = (1, 1, 2), \quad P_1 = (-1, 0, 1), \quad \vec{s}_2 = (1, 3, 4), \quad P_2 = (0, -1, 2)$$

$$\text{故距离为 } d = \left| \overrightarrow{P_1 P_2} \cdot \frac{(\vec{s}_1 \times \vec{s}_2)}{|\vec{s}_1 \times \vec{s}_2|} \right| = \left| (1, -1, 1) \cdot \frac{(-2, -2, 2)}{2\sqrt{3}} \right| = \frac{\sqrt{3}}{3}.$$

4.2.3 曲面及其方程

曲面与直线的关系

例 4.2.2. 求曲面 $(x - 2)^2 + (y - 3)^2 + (z + 1)^2 = 1$ 上的点与直线

$$\frac{x+1}{3} = \frac{y+1}{4} = \frac{z+1}{12}$$

的距离的最小值.

直线 $\frac{x+1}{3} = \frac{y+1}{4} = \frac{z+1}{12}$ 的参数方程为

$$\begin{cases} x = 3t - 1 \\ y = 4t - 1 \\ z = 12t - 1 \end{cases}$$

直线上任意一点可表示为 $(3t - 1, 4t - 1, 12t - 1)$, 球心的坐标为 $(2, 3, -1)$, 那么有

$$d = \sqrt{(3t - 1 - 2)^2 + (4t - 1 - 3)^2 + (12t - 1 + 1)^2} - 1 = \sqrt{169\left(t - \frac{25}{169}\right)^2 + \frac{3600}{169}} - 1$$

故最小值为 $d_{min} = \sqrt{\frac{3600}{169}} - 1 = \frac{47}{13}$.

例 4.2.3. 在直角坐标系中, 球面 S 与直线 $L_1 : \frac{x-1}{3} = \frac{y+4}{6} = \frac{z-6}{4}$ 相切于点 $A(1, -4, 6)$, 与直线 $L_2 : \frac{x-4}{2} = \frac{y+3}{1} = \frac{z-2}{-6}$ 相切于点 $B(4, -3, 2)$.

- (1) 求球面 S 的方程;
- (2) 设点 P 为球面 S 上的动点, 过点 P 任作三条两两垂直的弦, 记它们的长度分别为 a, b, c , 求证: $a^2 + b^2 + c^2$ 为定值.

(1) 设球心坐标为点 $Q(x, y, z)$, 根据题意可知, 过点 A 且垂直于 L_1 的平面方程为

$$\Pi_1 : 3(x - 1) + 6(y + 4) + 4(z - 6) = 0 \quad (1)$$

同理, 过点 B 且垂直于 L_2 的平面方程为

$$\Pi_2 : 2(x - 4) + (y + 3) - 6(z - 2) = 0 \quad (2)$$

并且由 $|QA|^2 = |QB|^2$, 可得

$$(x - 1)^2 + (y + 4)^2 + (z - 6)^2 = (x - 4)^2 + (y + 3)^2 + (z - 2)^2 \quad (3)$$

联立 (1)、(2) 和 (3) 解得球心坐标为 $Q(-5, 3, 0)$, 易知, 球面半径为 $R = 11$, 所以球面 S 的方程分别为

$$(x + 5)^2 + (y - 3)^2 + z^2 = 121.$$

- (2) 通过平移, 可将球心平移至坐标原点, 其他参数保持不变, 再通过旋转, 可将三条两两垂直的弦旋转到与三条两两垂直的坐标轴平行, 设点 P 的坐标为 (x, y, z) , 则三条弦与球面 S 交于点

$$E(-x, y, z), G(x, -y, z), H(x, y, -z)$$

因此

$$a^2 + b^2 + c^2 = |PE|^2 + |PG|^2 + |PH|^2 = 4(x^2 + y^2 + z^2) = 484.$$

切平面与法线

本小节内容需先了解“多元函数微分学”相关知识后阅读。

定理 4.2.3 (切平面方程). 曲面 $\Sigma : F(x, y, z) = 0$, 在点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 处的切平面的法向量为

$$\mathbf{n} = \left(F'_x, F'_y, F'_z \right) \Big|_P$$

那么过点 P 的切平面方程方程为

$$F'_x(P)(x - x_0) + F'_y(P)(y - y_0) + F'_z(P)(z - z_0) = 0.$$

定理 4.2.4 (法线方程). 由定理 4.2.3 得到切平面的方程后, 其法线方程为

$$\frac{x - x_0}{F'_x(P)} = \frac{y - y_0}{F'_y(P)} = \frac{z - z_0}{F'_z(P)}.$$

例 4.2.4 (2013 数一). 曲面 $x^2 + \cos(xy) + yz + x = 0$ 在点 $(0, 1, -1)$ 处的切平面方程为

- A. $x - y + z = -2$ B. $x + y + z = 0$ C. $x - 2y + z = -3$ D. $x - y - z = 0$

$F(x, y, z) = x^2 + \cos(xy) + yz + x = 0$, $P = (0, 1, -1)$, 那么

$$F'_x(P) = 2x - y \sin(xy) + 1 \Big|_P = 1, F'_y(P) = -x \sin(xy) + z \Big|_P = -1, F'_z(P) = y \Big|_P = 1$$

于是法向量 $\mathbf{n} = (1, -1, 1)$, 切平面方程为

$$1 \cdot (x - 0) - 1 \cdot (y - 1) + 1 \cdot (z + 1) = 0 \Rightarrow (x - y + z = -2)$$

故选 A.

例 4.2.5 (2014 数一). 求曲面 $z = x^2(1 - \sin y) + y^2(1 - \sin x)$ 在点 $(1, 0, 1)$ 处的切平面方程.

$F(x, y, z) = x^2(1 - \sin y) + y^2(1 - \sin x) - z$, $P = (1, 0, 1)$, 那么

$$F'_x(P) = 2(1 - \sin y)x - y^2 \cos x \Big|_P = 2, F'_y(P) = -x^2 \cos y + 2(1 - \sin x)y \Big|_P = -1, F'_z(P) = -1$$

所以曲面的法向量为 $\mathbf{n} = (2, -1, -1)$, 则切平面方程为

$$2(x - 1) + (-1)(y - 0) + (-1)(z - 1) = 0 \Rightarrow 2x - y - z = 1.$$

平面类型的讨论

例 4.2.6. 求直线 $\begin{cases} x = mt + a \\ y = nt + b \\ z = t \end{cases}$ $-\infty < t < +\infty$ 绕 Oz 旋转一周所成曲面的方程, 并根据参数的不同取值讨论曲面的形状.

曲面的参数方程为 $\begin{cases} x = \sqrt{(mt+a)^2 + (mt+b)^2} \cos \theta \\ y = \sqrt{(mt+a)^2 + (mt+b)^2} \sin \theta \\ z = t, \theta \in [0, 2\pi] \end{cases}$ 消去参数得 $x^2 + y^2 = (mz+a)^2 + (nz+b)^2$, 于是

(1) 母线与 z 轴平行时 ($m = n = 0$), 此时 $x^2 + y^2 = a^2 + b^2$, 为圆柱面;

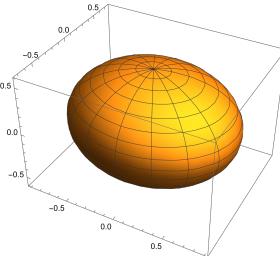
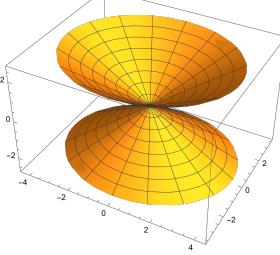
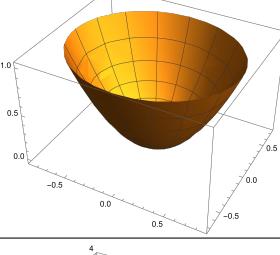
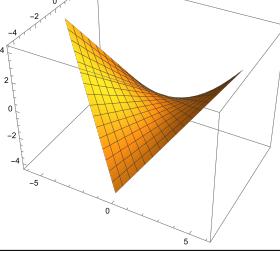
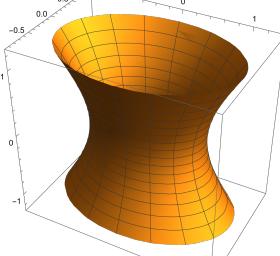
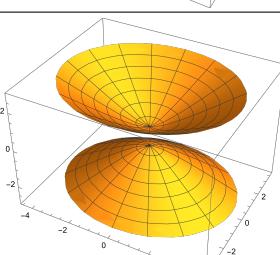
(2) 母线与 z 轴异面时 ($mb - na \neq 0$), 此时 $x^2 + y^2 - (m^2 + n^2) \left(z + \frac{ma + nb}{m^2 + n^2} \right)^2 = \frac{(mb - na)^2}{m^2 + n^2}$, 为旋转单叶双曲面;

(3) 母线与 z 轴相交时 ($mb - na = 0$), 此时 $x^2 + y^2 = (m^2 + n^2) \left(z + \frac{ma + nb}{m^2 + n^2} \right)^2$, 为直圆锥面.

常见的空间曲面及其方程

下表是常见的空间曲面及其对应的方程.

表 4.1: 空间曲面及其对应方程

曲面名称	图例	直角坐标系方程	参数方程
椭球面		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$	$\begin{cases} x = a \sin u \cos v \\ y = \sin u \sin v \\ z = c \cos u \\ u \in [0, \pi], v \in [0, 2\pi] \end{cases}$
椭圆锥面		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = z^2$	$\begin{cases} x = av \cos u \\ y = bv \sin u \\ z = cv \\ u \in [0, 2\pi], v \in \mathbb{R} \end{cases}$
椭圆抛物面		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = z$	$\begin{cases} x = av \cos u \\ y = bv \sin u \\ z = u^2 \\ u \in [0, 2\pi], v \in [0, +\infty) \end{cases}$
双曲抛物面		$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = z$	$\begin{cases} x = a(u+v) \\ y = b(u-v) \\ z = 4uv \\ u, v \in \mathbb{R} \end{cases}$
单叶双曲面		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$	$\begin{cases} x = a \cosh u \cos v \\ y = b \cosh u \sin v \\ z = c \sinh u \\ u \in \mathbb{R}, v \in [0, 2\pi] \end{cases}$
双叶双曲面		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1$	$\begin{cases} x = a\sqrt{u^2 - 1} \cos v \\ y = b\sqrt{u^2 - 1} \sin v \\ z = cu \\ u \in (-\infty, -1] \cup [1, +\infty), v \in \mathbb{R} \end{cases}$

4.2.4 空间曲线及其方程

空间曲线绕直线旋转的曲面方程

定理 4.2.5 (空间曲线绕直线旋转的曲面方程). 设空间曲线 $\Gamma : \begin{cases} F(x, y, z) = 0 \\ G(x, y, z) = 0 \end{cases}$, 直线 $L : \frac{x - x_0}{l} = \frac{y - y_0}{m} = \frac{z - z_0}{n}$, 记 $M_0 = (x_0, y_0, z_0)$, $\tau = (l, m, n)$, 在曲线 Γ 上任取一点 $M(x, y, z)$, 而过点 M 的纬圆上任意一点 $P(X, Y, Z)$ 满足条件 $\begin{cases} |\overrightarrow{M_0P}| = |\overrightarrow{M_0M}| \\ \overrightarrow{M_0M} \perp \tau. \end{cases}$

常见的曲线及其对应方程

摆线 摆线是一种具有特定形状的曲线, 也被称为牛顿螺线或纽曼线. 它是由一个固定点上的一根线不断转动而形成的曲线, 其特点是曲线上的每个点到固定点的距离与该点在曲线上的位置成正比.

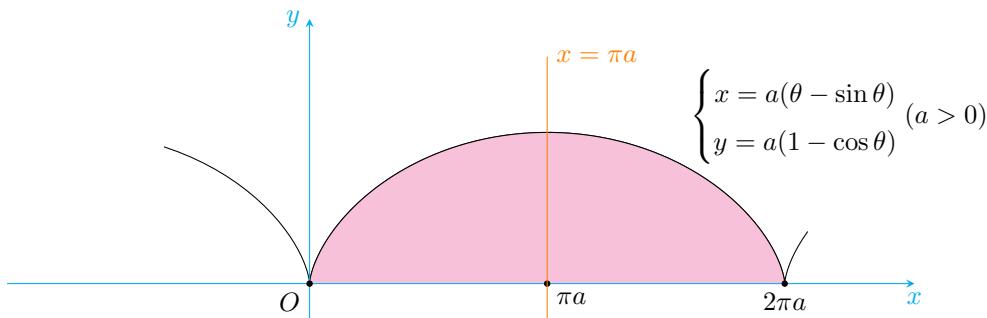


图 4.2.1: 摆线

箕舌线 箕舌线在数学中常用于曲线绘制和几何分析, 具有一定的研究和应用价值. 它的特殊形状和几何性质使其在数学教学和研究中具有一定的重要性.

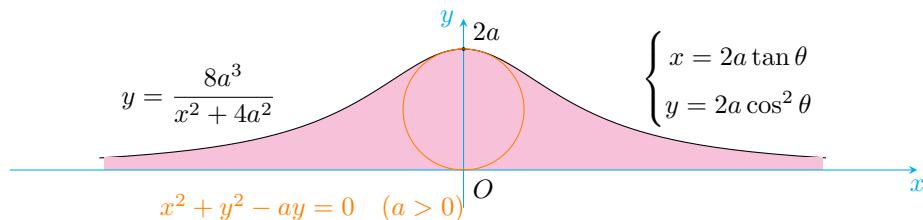


图 4.2.2: 箕舌线

双纽线 双纽线是一种特殊的曲线形状, 也称为双纽结或双纽环. 它是一种具有对称性的闭合曲线, 形

状类似于一个双环结构. 双纽线的数学表达式通常可以用参数方程或极坐标方程表示.

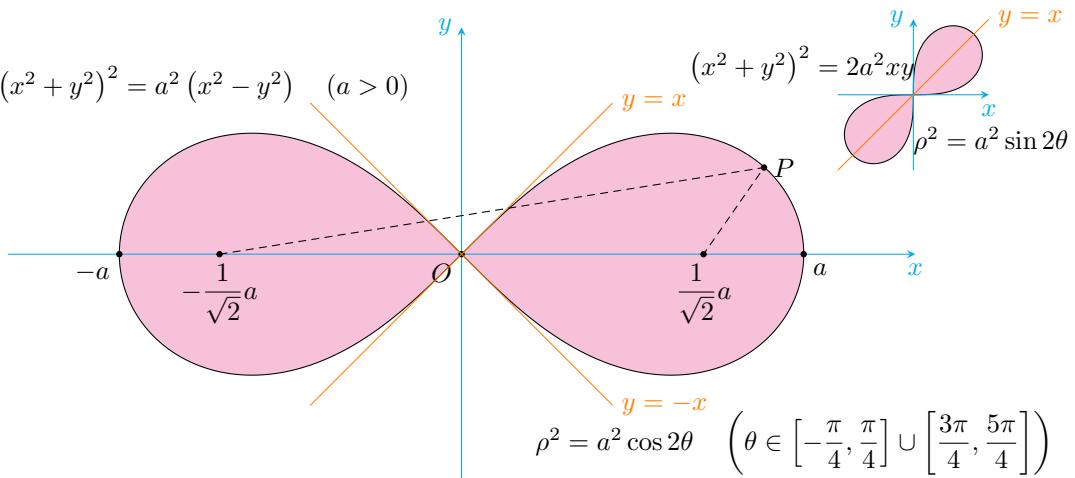


图 4.2.3: 双纽线

对数螺线 对数螺线是一种特殊的曲线形状, 也称为对数螺旋线或阿基米德螺线.

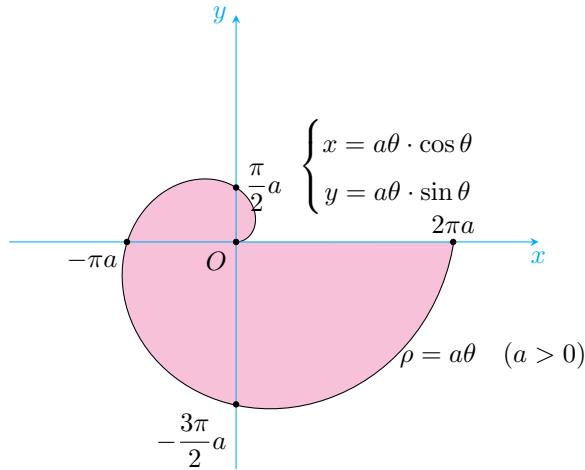


图 4.2.4: 对数螺线

星形线 在数学中, 星形线的定义比较宽泛, 可以包括多种形状. 例如, 五角星、六角星、七角星等都可以看作是一种星形线. 星形线的数学表达式可以有多种形式, 常见的包括极坐标方程、参数方程或直角坐标方程, 具体形式取决于所描述的具体星形线的形状和特征.

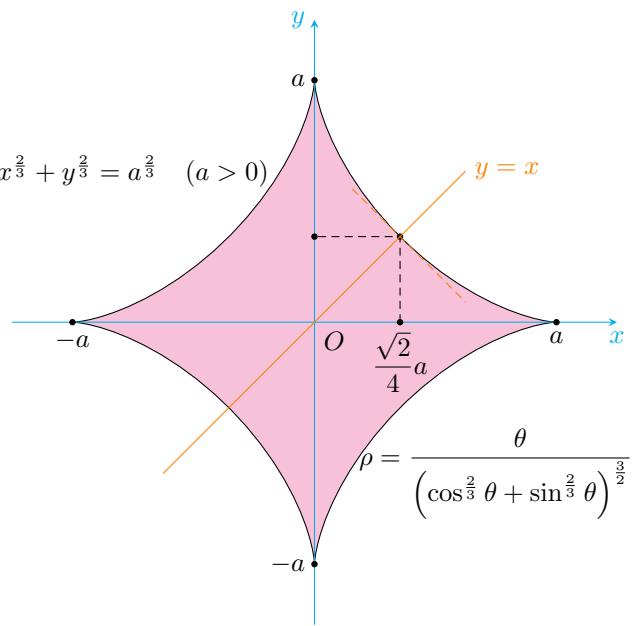


图 4.2.5: 星形线

心形线 心形线是一种具有象征意义和浪漫情感的特殊曲线形状，其外形类似于一个心形。在数学上，心形线可以用不同的数学表达式来描述，常见的包括参数方程、极坐标方程或直角坐标方程。

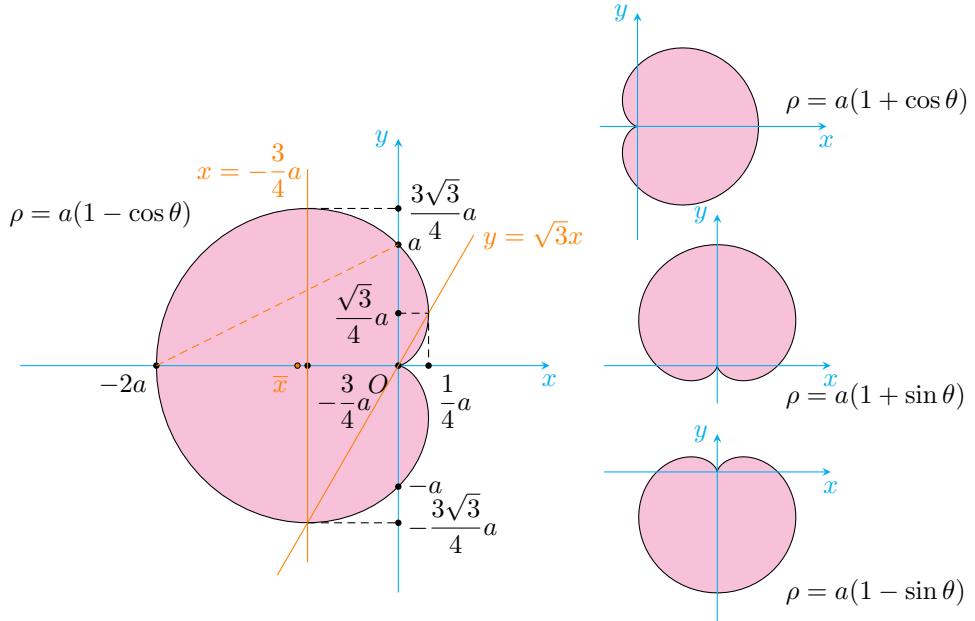


图 4.2.6: 心形线

叶形线 叶形线是一种特殊的曲线形状，其轮廓类似于植物叶子的形状，因此得名为叶形线。在数学上，

叶形线可以用不同的数学表达式来描述, 常见的包括参数方程、极坐标方程或直角坐标方程.

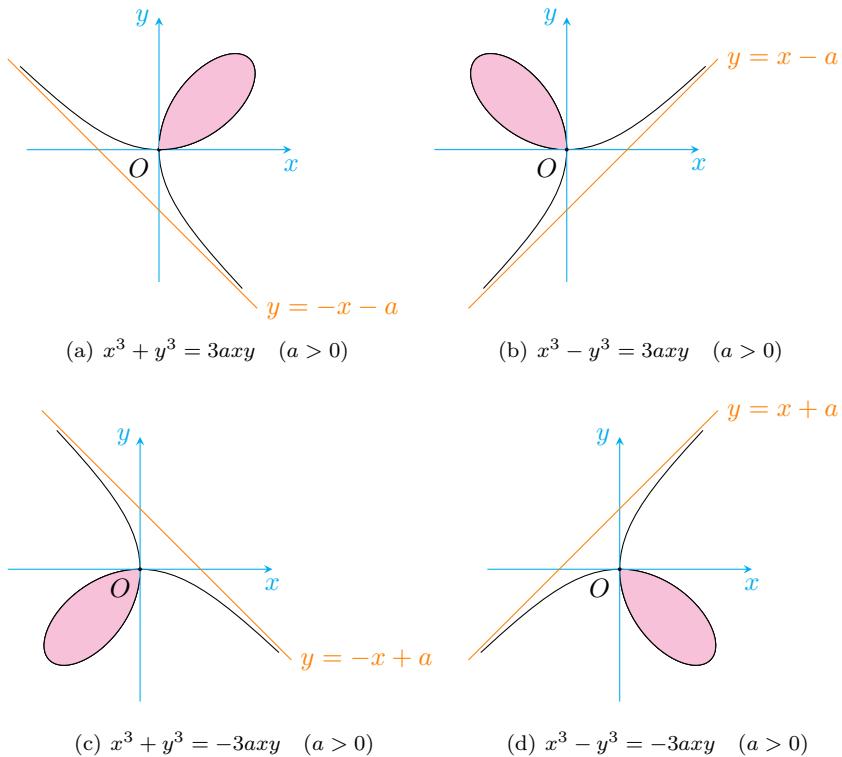


图 4.2.7: 叶形线

玫瑰线 玫瑰线是一种经典的数学曲线, 其形状类似于玫瑰花的花瓣. 玫瑰线的美妙之处在于其优美的几何形状和对称性, 不同的 n 值可以得到不同朵花瓣的玫瑰线, 每一朵花瓣都充满了艺术感和美感.

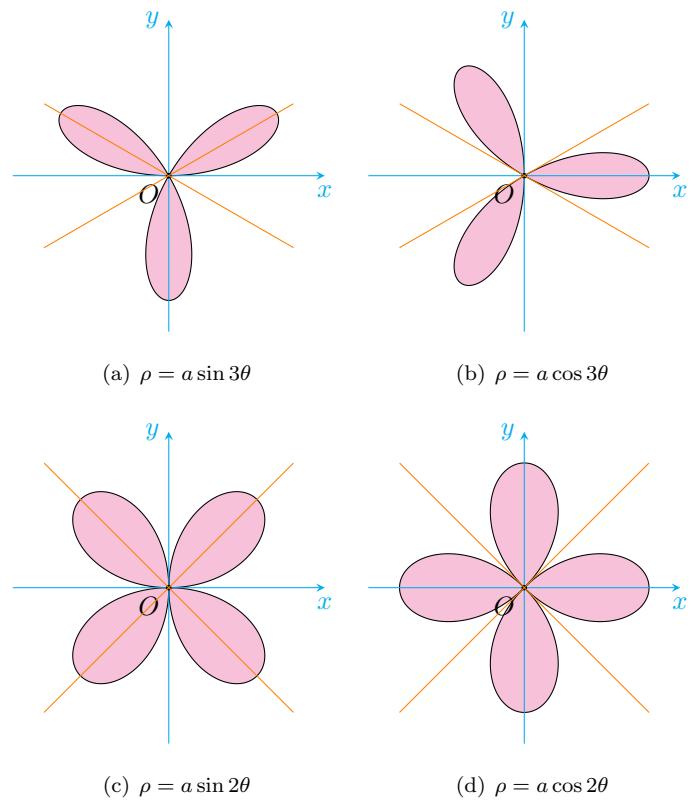


图 4.2.8: 玫瑰线

第 5 章

多元函数微分学

“立志于物理学的人，不懂下列的事情是不行的：

第一是数学，第二是数学，第三是数学。”

——伦琴

多元函数微分法是一元函数微分学的延续，在一元函数微分法的基础上，对多元函数的求导问题进行讨论，复习时应着重注意两者的区别与联系。

5.1 多元函数的极限与连续

5.1.1 多元函数的极限

定义 5.1.1 (二元函数的极限). 设二元函数 $f(x, y)$ 在区间 (a, b) 的某去心邻域内有定义，若 $\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0$ ，当 $0 < \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2} < \delta$ 时恒有

$$|f(x, y) - A| < \varepsilon$$

则称

$$\lim_{\substack{x \rightarrow a \\ y \rightarrow b}} f(x, y) = A.$$

在二元函数极限的定义中，动点 (x, y) 在 (a, b) 的邻近以任意路径趋向于点 (a, b) 时，函数值 $f(x, y)$ 与常数 A 需任意地接近。这些任意路径是不可能一一取到的。若取两条不同的路径让 $(x, y) \rightarrow (a, b)$ ，而 $f(x, y)$ 取不同的极限，则可推知： $(x, y) \rightarrow (a, b)$ 时 $f(x, y)$ 的极限不存在。

通常求二元函数极限的方法如下：

- (1) 利用定义求极限；
- (2) 利用路径法；

- (3) 在 $(x, y) \rightarrow (0, 0)$ 时化为极坐标求极限, 即 $(x, y) \rightarrow (0, 0) \Leftrightarrow \rho \rightarrow 0^+$;
- (4) 利用无穷小量乘以有界变量仍为无穷小量;
- (5) 利用夹逼准则求极限.

例 5.1.1. 用换元法求下列极限

$$(1) \lim_{x,y \rightarrow 0} \frac{xy^2}{x^2 + y^2 + y^4}. \quad (2) \lim_{x,y \rightarrow 0} \frac{3y^3 + 2x^2y}{x^2 - xy + y^2}. \quad (3) \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{1 - \cos(x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)e^{x^2y^2}}.$$

$$(1) \text{ 原式 } \underset{\substack{x=\rho \cos \theta \\ y=\rho \sin \theta}}{\lim_{\rho \rightarrow 0^+}} \frac{\rho^3 \cos \theta \sin^2 \theta}{\rho^2 + \rho^4 \sin^4 \theta} = \cos \theta \sin^2 \theta \underset{\rho \rightarrow 0^+}{\lim} \frac{\rho}{1 + \rho^2 \sin^4 \theta} = 0.$$

$$(2) \text{ 原式 } \underset{\substack{x=\rho \cos \theta \\ y=\rho \sin \theta}}{\lim_{\rho \rightarrow 0^+}} (3 \sin^3 \theta + 2 \cos^2 \theta \sin \theta) \underset{\rho \rightarrow 0^+}{\lim} \frac{\rho}{1 - \cos \theta \sin \theta} = 0.$$

$$(3) \text{ 原式 } \underset{\substack{x=\rho \cos \theta \\ y=\rho \sin \theta}}{\lim_{\rho \rightarrow 0^+}} \frac{1 - \cos \rho^2}{\rho^2 e^{\rho^4 \cos^2 \theta \sin^2 \theta}} = \underset{\rho \rightarrow 0^+}{\lim} \frac{\frac{1}{2} \rho^4}{\rho^2} = \underset{\rho \rightarrow 0^+}{\lim} \frac{\rho^2}{2} = 0.$$

例 5.1.2. 极限 $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{2x^2y}{x^4 + y^2}$

A. 不存在

B. 等于 2

C. 等于 $\frac{1}{2}$

D. 等于 0

法一: 令 $\begin{cases} x = \rho \cos \theta \\ y = \rho \sin \theta \end{cases}$ 于是原极限等于 $\lim_{\rho \rightarrow 0^+} \frac{2\rho^3 \cos^2 \theta \sin \theta}{\rho^4 \cos^4 \theta + \rho^2 \sin^2 \theta} = 2 \cos^2 \theta \sin \theta \lim_{\rho \rightarrow 0^+} \frac{\rho^3}{\rho^4 \cos^4 \theta + \rho^2 \sin^2 \theta} = \infty$, 即不存在, 选 A.

法二: 取 $x \rightarrow 0, y = x$, 则有 $(x, y) \rightarrow (0, 0)$, 于是

$$\lim_{x \rightarrow 0, y=x} \frac{2x^2 \cdot x}{x^4 + x^2} = \lim_{x \rightarrow 0, y=x} \frac{2x^3}{(1+x^2)x^2} = 0$$

再取 $x \rightarrow 0, y = x^2$, 同理 $(x, y) \rightarrow (0, 0)$, 于是

$$\lim_{x \rightarrow 0, y=x^2} \frac{2x^2 \cdot x^2}{x^4 + x^4} = 1$$

发现两条不同的趋向路径, 算出的极限值不同, 又因为极限值具有唯一性, 故原式的极限值不存在.

5.1.2 多元函数的连续性与可微性

定义 5.1.2. 若 $\lim_{\substack{x \rightarrow a \\ y \rightarrow b}} f(x, y) = f(a, b)$ 则称 $f(x, y)$ 在 (a, b) 内连续.

定理 5.1.1. 多元初等函数在其有定义的区域上连续.

定理 5.1.2. 若 $f(x, y)$ 在有界闭域 D 上连续, 则 $f(x, y)$ 在 D 上为有界函数, $f(x, y)$ 在 D 上取到最大值与最小值.

连续、偏导数存在、可微及偏导数连续之间的关系

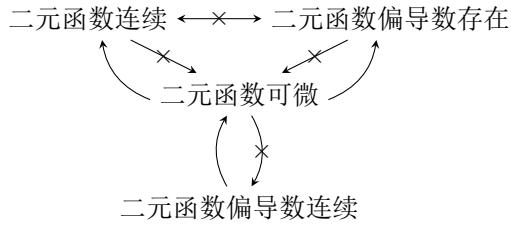


图 5.1.1

判断函数在某点处可微性的一般步骤

- (1) 判断 $f(x, y)$ 在 (a, b) 处的两个偏导数是否存在, 若不存在, 则 $f(x, y)$ 在 (a, b) 点不可微; 若存在, 则求出两个偏导数 $f'_x(a, b)$ 和 $f'_y(a, b)$;
- (2) 求出 $(x, y) \neq (a, b)$ 时的两个偏导函数 $f'_x(x, y)$ 和 $f'_y(x, y)$, 若它们在 (a, b) 点处连续, 则 $f(x, y)$ 在该点处可微, 否则按 (3) 继续判断;
- (3) 求二重极限

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (a,b)} \frac{f(x,y) - f(a,b) - f'_x(a,b)x - f'_y(a,b)y}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

若极限等于 0, 则 $f(x, y)$ 在 (a, b) 点可微, 否则 (包括极限不存在的情况) 不可微.

例 5.1.3. 设 $f(x, y) = \begin{cases} \frac{x^2 y}{x^2 + y^2}, & x^2 + y^2 \neq 0 \\ 0, & x^2 + y^2 = 0 \end{cases}$, $z(t) = f(e^{2t} - 1, \arctan t)$, 求 $z'(0)$.

错解. $z'(t) = f'_x \cdot (2e^{2t}) + f'_y \cdot \frac{1}{1+t^2} \Rightarrow z'(0) = 2f'_x(0,0) + \frac{1}{2}f'_y(0,0)$, 下求 $f'_x(0,0)$ 和 $f'_y(0,0)$, 由定义

$$\begin{aligned} f'_x(0,0) &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x,0) - f(0,0)}{x - 0} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x,0)}{x} = 0 \\ f'_y(0,0) &= \lim_{y \rightarrow 0} \frac{f(0,y) - f(0,0)}{y - 0} = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{f(0,y)}{y} = 0 \end{aligned}$$

那么 $z'(0) = 0$.

错因: 只有函数 $z = f(u, v)$ 在对应点 (u, v) 具有连续偏导数, 那么复合函数 $z = f[\varphi(u, v), \psi(u, v)]$ 在点 (x, y) 的两个偏导数才存在. 对于本题, 即外层函数 f 在 $(0,0)$ 可微, 才能使用链式求导法则.

先判断 f 在 $(0,0)$ 处是否可微,

$$\begin{aligned} \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{f(x,y) - f(0,0) - f'_x(0,0)x - f'_y(0,0)y}{\sqrt{x^2 + y^2}} &= \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{f(x,y)}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{x^2 y}{(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} \\ &\stackrel{x=\rho \cos \theta, y=\rho \sin \theta}{=} \lim_{\rho \rightarrow 0^+} \frac{\rho^3 \cos^2 \theta \sin \theta}{\rho^3} = \cos^2 \theta \sin \theta \neq 0 \end{aligned}$$

则 f 在 $(0,0)$ 处不可微, 于是

$$z'(0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{z(t) - z(0)}{t - 0} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{(e^{2t} - 1)^2 \arctan t}{t [(e^{2t} - 1)^2 + \arctan^2 t]} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{4t^2}{4t^2 + t^2 + o(t^2)} = \frac{4}{3}.$$

例 5.1.4. 已知函数 $f(x, y) = f(x, y) = \begin{cases} \frac{1 - e^{x(x^2+y^2)}}{x^2+y^2}, & x^2+y^2 \neq 0; \\ 0, & x^2+y^2=0, \end{cases}$ 讨论 $f(x, y)$ 在点 $(0, 0)$ 处的连续性与可微性.

连续性证明

$$\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} f(x, y) = \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{1 - e^{x(x^2+y^2)}}{x^2+y^2} = - \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{x(x^2+y^2)}{x^2+y^2} = 0 = f(0, 0)$$

即 $f(x, y)$ 在 $(0, 0)$ 处连续;

可微性证明

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x, 0) - f(0, 0)}{x - 0} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{1 - e^{x(x^2+y^2)}}{x^2+y^2} - 0}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - e^{x^3}}{x^3} = -1 = f'_x(0, 0) \\ \lim_{y \rightarrow 0} \frac{f(0, y) - f(0, 0)}{y - 0} &= 0 = f'_y(0, 0) \end{aligned}$$

于是

$$\begin{aligned} \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{f(x, y) - f(0, 0) - f'_x(0, 0)x - f'_y(0, 0)y}{\sqrt{x^2+y^2}} &= \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{\frac{1 - e^{x(x^2+y^2)}}{x^2+y^2} - 0 - (-1)x - 0}{\sqrt{x^2+y^2}} \\ &= \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{1 - e^{x(x^2+y^2)} + x(x^2+y^2)}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}} \xrightarrow[x=\rho \cos \theta]{y=\rho \sin \theta} \lim_{\rho \rightarrow 0^+} \frac{1 - e^{\rho^3 \cos \theta} + \rho^3 \cos \theta}{\rho^3} \\ &= \lim_{\rho \rightarrow 0^+} \frac{-\rho^3 \cos \theta + \rho^3 \cos \theta + o(\rho^3 \cos \theta)}{\rho^3} = 0 \end{aligned}$$

故 $f(x, y)$ 在 $(0, 0)$ 处可微.

例 5.1.5. 设 $f'(0) = k$, 试证明 $\lim_{\substack{a \rightarrow 0^- \\ b \rightarrow 0^+}} \frac{f(b) - f(a)}{b - a} = k$.

证 用拟合法, $k = \frac{b}{b-a} \cdot k - \frac{a}{b-a} \cdot k$, 那么

$$\frac{f(b) - f(a)}{b - a} = \frac{b}{b - a} \cdot \frac{f(b) - f(0)}{b - 0} - \frac{a}{b - a} \cdot \frac{f(a) - f(0)}{a - 0}$$

因为 $a < 0 < b$, 得 $\left| \frac{a}{b-a} \right| < 1, \left| \frac{b}{b-a} \right| < 1$.

$$\begin{aligned} \left| \frac{f(b) - f(a)}{b - a} - k \right| &\leq \left| \frac{b}{b-a} \right| \cdot \left| \frac{f(b) - f(0)}{b-0} - k \right| + \left| \frac{a}{b-a} \right| \cdot \left| \frac{f(a) - f(0)}{a-0} - k \right| \\ &\leq \left| \frac{f(b) - f(0)}{b-0} - k \right| + \left| \frac{f(a) - f(0)}{a-0} - k \right| \rightarrow 0 \quad (a \rightarrow 0^-, b \rightarrow 0^+). \end{aligned}$$

例 5.1.6. 讨论如下向量函数的连续性: 设 $(u, v) = F(x, y) = (f(x, y), g(x, y))$, 其中

$$u = f(x, y) = \begin{cases} \frac{x}{(x^2+y^2)^\alpha} \ln(|x|+|y|), & \text{当 } x^2+y^2 \neq 0 \text{ 时} \\ 0, & \text{当 } x^2+y^2=0 \text{ 时} \end{cases}$$

$$v = g(x, y) = \begin{cases} \frac{y}{(x^2+y^2)^\alpha} \ln(|x|+|y|), & \text{当 } x^2+y^2 \neq 0 \text{ 时} \\ 0, & \text{当 } x^2+y^2=0 \text{ 时} \end{cases}$$

显然 $f(x, y), g(x, y)$ 当 $x^2+y^2 \neq 0$ 时连续, 因此 $(x, y) \neq (0, 0)$ 时 F 连续. 下面只研究 $(0, 0)$ 点的情况, 因为

$$u^2 + v^2 = \frac{x^2+y^2}{(x^2+y^2)^{2\alpha}} \ln^2(|x|+|y|) = (x^2+y^2)^{1-2\alpha} \ln^2(|x|+|y|)$$

$$\rightarrow \begin{cases} 0, & \text{当 } \alpha < \frac{1}{2} \text{ 时} \\ +\infty, & \text{当 } \alpha \geq \frac{1}{2} \text{ 时} \end{cases} (r^2 = x^2 + y^2 \rightarrow 0 \text{ 时}).$$

故当且仅当 $\alpha < \frac{1}{2}$ 时 F 在点 $(0, 0)$ 连续, 下面对上式中的极限进行补充证明。当 $\alpha \geq \frac{1}{2}$ 时, 显然极限为 $+\infty$ 。现设 $\alpha < \frac{1}{2}$, 记 $\mu = 1 - 2\alpha$, 则 $\mu > 0$,

$$(x^2 + y^2)^{1-2\alpha} \ln^2(|x| + |y|) = \frac{(x^2 + y^2)^\mu}{(|x| + |y|)^{2\mu}} \cdot (|x| + |y|)^{2\mu} \ln^2(|x| + |y|)$$

这时

$$0 \leq \frac{(x^2 + y^2)^\mu}{(|x| + |y|)^{2\mu}} = \frac{(x^2 + y^2)^\mu}{(x^2 + 2|x||y| + y^2)^\mu} \leq \frac{(x^2 + y^2)^\mu}{(x^2 + y^2)^\mu} = 1$$

但 $(|x| + |y|)^{2\mu} \ln^2(|x| + |y|) \rightarrow 0$, 所以

$$(x^2 + y^2)^{1-2\alpha} \ln^2(|x| + |y|) \rightarrow 0 (r \rightarrow 0).$$

5.1.3 二元函数的 Taylor 展开

定理 5.1.3 (二元函数的 Taylor 展开唯一性). 假设 $f(x, y)$ 具有 $n+1$ 阶连续偏导数, 若用某种方法得到展开式:

$$f(x, y) = \sum_{i+j=0}^n A_{ij} (x - x_0)^i (y - y_0)^j + o(\rho^n)$$

其中 $\rho = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, 则必有

$$A_{ij} = \left. \frac{C_{i+j}^i}{(i+j)!} \frac{\partial^{i+j}}{\partial x^i \partial y^j} f(x, y) \right|_{(x_0, y_0)} = \frac{1}{i! j!} \frac{\partial^{i+j}}{\partial x^i \partial y^j} f(x_0, y_0).$$

例 5.1.7. 设 $f(x, y)$ 连续, $f(0, 0) = 0$, $f(x, y)$ 在 $(0, 0)$ 处可微且 $f'_y(0, 0) = 1$, 求

$$I = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^{x^3} dt \int_{\sqrt[3]{t}}^x f(t, u) du}{1 - \sqrt[3]{1 - x^5}}.$$

当 $x \rightarrow 0^+$ 时, $1 - \sqrt[3]{1 - x^5} \sim \frac{1}{3}x^5$, 考虑交换积分次序,

$$\int_0^{x^3} dt \int_{\sqrt[3]{t}}^x f(t, u) du = \iint_{\substack{0 \leq t \leq x^3 \\ 0 \leq u \leq t}} f(t, u) dt du = \int_0^x du \int_0^{u^3} f(t, u) dt$$

于是,

$$I = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^x du \int_0^{u^3} f(t, u) dt}{\frac{1}{3}x^5} \stackrel{L'}{=} 3 \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^{x^3} f(t, x) dt}{5x^4} \stackrel{L'}{=} 3 \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{3x^2 f(x^3, x)}{20x^3} = \frac{9}{20} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f(x^3, x)}{x}$$

其中 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f(x^3, x)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f(\xi, x)}{x}$, $\xi \in (0, x^3)$, 由二元函数的 Taylor 公式可得:

$$f(\xi, x) = f(0, 0) + f'_x(0, 0)\xi + f'_y(0, 0)x + o(x)$$

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f(\xi, x)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f(0, 0) + f'_x(0, 0)\xi + f'_y(0, 0)x + o(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \left[\frac{f'_x(0, 0)\xi}{x} + f'_y(0, 0) + \frac{o(x)}{x} \right] = 1$$

其中 $\left| \frac{f'_x(0, 0)\xi}{x} \right| < \frac{f'_x(0, 0)x^2}{x} \rightarrow 0$, 于是原式 $= \frac{9}{20}$.

5.2 多元函数的偏导数

在多元函数中, 偏导数是描述函数对于各个自变量的变化率的概念. 对于一个多元函数 $f(\mathbf{x})$, 其中 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 对于第 i 个自变量 x_i 的偏导数记作 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$, 表示在其他自变量保持不变的情况下, 函数 f 对于 x_i 的变化率.

5.2.1 偏导数与隐函数

偏导数

定义 5.2.1 (偏导数). 函数 f 对 x 在 (a, b) 处的偏导为:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(a,b)} = f'_x(a, b) = \lim_{\square \rightarrow 0} \frac{f(a + \square, b) - f(a, b)}{\square} = \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x, b) - f(a, b)}{x - a}.$$

例 5.2.1. 设 $z = uv$, $x = e^u \cos v$, $y = e^u \sin v$, 求 $\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}$.

$$\begin{cases} x = e^u \cos v \\ y = e^u \sin v \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u = \frac{1}{2} \ln(x^2 + y^2) \\ v = \arctan \frac{y}{x} \end{cases} \Rightarrow z = \frac{1}{2} \ln(x^2 + y^2) \cdot \arctan \frac{y}{x}, \text{ 所以}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial x} &= \frac{x}{x^2 + y^2} \arctan \frac{y}{x} + \frac{1}{2} \ln(x^2 + y^2) \cdot \frac{-y}{x^2 + y^2} \\ \frac{\partial z}{\partial y} &= \frac{y}{x^2 + y^2} \arctan \frac{y}{x} + \frac{1}{2} \ln(x^2 + y^2) \cdot \frac{x}{x^2 + y^2} \end{aligned}$$

例 5.2.2 (2012 数二). 设 $z = f\left(\ln x + \frac{1}{y}\right)$, 其中函数 $f(u)$ 可微, 求 $x \frac{\partial z}{\partial x} + y^2 \frac{\partial z}{\partial y}$.

易得 $\frac{\partial z}{\partial x} = f' \cdot \frac{1}{x}$, $\frac{\partial z}{\partial y} = -f' \cdot \frac{1}{y^2}$, 于是 $x \frac{\partial z}{\partial x} + y^2 \frac{\partial z}{\partial y} = 0$.

例 5.2.3 (2015 数二). 设函数 $f(u, v)$ 满足 $f\left(x + y, \frac{y}{x}\right) = x^2 - y^2$, 则 $\left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{\substack{u=1 \\ v=1}}$ 与 $\left. \frac{\partial f}{\partial v} \right|_{\substack{u=1 \\ v=1}}$ 依次是

- A. $\frac{1}{2}, 0$ B. $0, \frac{1}{2}$ C. $-\frac{1}{2}, 0$ D. $0, -\frac{1}{2}$

法一: 令 $u = x + y$, $v = \frac{y}{x}$, 解得 $\begin{cases} x = \frac{u}{1+v} \\ y = \frac{vu}{1+v} \end{cases}$ 那么 $f(u, v) = \frac{u^2(1-v^2)}{(1+v)^2} = \frac{u^2(1-v)}{1+v}$, 于是

$$\left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{\substack{u=1 \\ v=1}} = \left. \frac{2u(1-v)}{1+v} \right|_{\substack{u=1 \\ v=1}} = 0, \quad \left. \frac{\partial f}{\partial v} \right|_{\substack{u=1 \\ v=1}} = \left. \frac{-2u^2}{(1+v)^2} \right|_{\substack{u=1 \\ v=1}} = -\frac{1}{2}.$$

法二: 令 $u = x + y$, $v = \frac{y}{x}$, 当 $u = v = 1$ 时, 解得 $x = y = \frac{1}{2}$, 方程 $f\left(x + y, \frac{y}{x}\right) = x^2 - y^2$ 两边分别对 x, y 求偏导数, 得

$$f'_u + f'_v \left(-\frac{y}{x^2}\right) = 2x, \quad f'_u + f'_v \frac{1}{x} = -2y$$

把 $x = y = \frac{1}{2}$ 代入上两式, 最终解得选 D.

例 5.2.4 (2009 数二). 设 $z = (x + e^y)^x$, 求 $\left. \frac{\partial z}{\partial x} \right|_{(1,0)}$.

由 $z = (x + e^y)^x$, 得 $z(x, 0) = (x + 1)^x$, 那么

$$\left. \frac{\partial z}{\partial x} \right|_{(1,0)} = \left. \frac{d}{dx} (x+1)^x \right|_{x=1} = \left. \frac{d}{dx} e^{x \ln(x+1)} \right|_{x=1} = e^{x \ln(x+1)} \left[\ln(x+1) + \frac{x}{x+1} \right] \Big|_{x=1} = 2 \ln 2 + 1.$$

例 5.2.5. 设 $u = f(x, y, z)$ 有连续的一阶偏导数, 又函数 $y = y(x)$ 及 $z = z(x)$ 分别由下列两式确定: $e^{xy} - xy = 2$ 和 $e^x = \int_0^{x-t} \frac{\sin t}{t} dt$, 求 $\frac{du}{dx}$.

$$\frac{du}{dx} = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dx} + \frac{\partial f}{\partial z} \cdot \frac{dz}{dx}, \text{ 由 } e^{xy} - xy = 2 \text{ 可得 } \frac{dy}{dx} = -\frac{y}{x}, \text{ 方程 } e^x = \int_0^{x-t} \frac{\sin t}{t} dt \text{ 两边对 } x \text{ 求导,}$$

$$e^x = \frac{\sin(x-z)}{x-z} \cdot \left(1 - \frac{dz}{dx}\right) \Rightarrow \frac{dz}{dx} = 1 - \frac{e^x(x-z)}{\sin(x-z)}$$

代入 $\frac{dz}{dx}$, 得 $\frac{dz}{dx} = \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{y}{x} \frac{\partial f}{\partial y} + \left[1 - \frac{e^x(x-z)}{\sin(x-z)}\right] \frac{\partial f}{\partial z}$.

例 5.2.6. 函数 $f(x, y) = x + (y-1) \arcsin \sqrt{\frac{|x|}{y}}$ 在 $(0, 1)$ 处

A. $f'_x(0, 1) = f'_y(0, 1) = 1$

B. $df \Big|_{(0,1)} = dy$

C. $df \Big|_{(0,1)} = dx$

D. $df \Big|_{(0,1)}$ 不存在

因为 $\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 1}} f(x, y) = \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 1}} \left[x + (y-1) \arcsin \sqrt{\frac{|x|}{y}} \right] = 0$, 于是

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0^+} \frac{f(0 + \Delta x, 1) - f(0, 1)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0^+} \frac{\Delta x + (1-1) \arcsin \sqrt{\frac{\Delta x}{1}}}{\Delta x} = 1$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0^-} \frac{f(0 + \Delta x, 1) - f(0, 1)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0^-} \frac{\Delta x + (1-1) \arcsin \sqrt{\frac{-\Delta x}{1}}}{\Delta x} = 1$$

则 $f'_x(0, 1) = 1$, 同理可得 $f'_y(0, 1) = 0$, 并且

$$\lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} \frac{f(0 + \Delta x, 1 + \Delta y) - f(0, 1) - [f'_x(0, 1)\Delta x + f'_y(0, 1)\Delta y]}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} \frac{\Delta x + (\Delta y) \arcsin \sqrt{\frac{|\Delta x|}{1 + \Delta y}} - 0 - \Delta x}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}$$

$$= \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} \arcsin \sqrt{\frac{|\Delta x|}{1 + \Delta y}} \cdot \frac{\Delta y}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} = 0 \left(\arcsin \sqrt{\frac{|\Delta x|}{1 + \Delta y}} \rightarrow 0, \left| \frac{\Delta y}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \right| \leq 1 \right)$$

故 $f(x, y)$ 在 $(0, 1)$ 处可微, 所以 $df \Big|_{(0,1)} = 1 \cdot dx + 0 \cdot dy = dx$, 选 C.

隐函数

定理 5.2.1 (隐函数存在定理 A). 设函数 $F(x, y, z)$ 在点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 的某一邻域内具有连续偏导数, 且

$$F(x_0, y_0, z_0) = 0, F'_z(x_0, y_0, z_0) \neq 0$$

则方程 $F(x, y, z) = 0$ 在点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 的某一邻域内能确定唯一一个连续且具有连续导数的函数 $z = f(x, y)$, 且有

$$\frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{F'_x}{F'_z}, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{F'_y}{F'_z}.$$

定理 5.2.2 (隐函数存在定理 B). 由方程组确定的隐函数的导数, 方程组

$$\begin{cases} F(x, y, u, v) = 0 \\ G(x, y, u, v) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

两边同时对 x 求偏导可得

$$\begin{cases} F'_x + F'_u \frac{\partial u}{\partial x} + F'_v \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \\ G'_x + G'_u \frac{\partial u}{\partial x} + G'_v \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

若 $\begin{vmatrix} F'_u & F'_v \\ G'_u & G'_v \end{vmatrix} \neq 0$, 则方程组 (1) 确定了两个隐函数 $u = u(x, y), v = v(x, y)$, 且 $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x}$ 可由方程组 (2) 求出, 同理可得 $\frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial y}$.

例 5.2.7. 设 $F(x, y, z)$ 连续可偏导, $F'_y \cdot F'_z \neq 0$, 且 $F(1, 1, -2) = 0$, 则在点 $(1, 1, -2)$ 邻域内, 由 $F(x, y, z) = 0$

- A. 既可确定 x 为 y, z 的二元函数, 也可确定 y 为 x, z 的二元函数
- B. 既可确定 x 为 y, z 的二元函数, 也可确定 z 为 x, y 的二元函数
- C. 既可确定 y 为 x, z 的二元函数, 也可确定 z 为 x, y 的二元函数
- D. 可确定 x 为 y, z 的二元函数, y 为 x, z 的二元函数, z 为 x, y 的二元函数

根据定理 5.2.1, $F(x, y, z) = 0$ 确定的隐函数 $z = z(x, y)$ 的偏导数为

$$\frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{F'_x}{F'_z}, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{F'_y}{F'_z}$$

因此确定 z 为 x, y 的二元函数, 需要 $F'_z \neq 0$; 确定 x 为 y, z 的二元函数, 需要 $F'_x \neq 0$; 确定 y 为 x, z 的二元函数, 需要 $F'_y \neq 0$, 而 $F'_y \cdot F'_z \neq 0$ 得 $F'_y \neq 0, F'_z \neq 0$, 因此可确定 y 为 x, z 的二元函数, 也可确定 z 为 x, y 的二元函数, 故选 C.

例 5.2.8 (2018 数三). 设函数 $z = z(x, y)$ 由方程 $\ln z + e^{z-1} = xy$ 确定, 求 $\left. \frac{\partial z}{\partial x} \right|_{(2, \frac{1}{2})}$.

法一: 求偏导, $\frac{1}{z} \cdot z'_x + e^{z-1} \cdot z'_x = y$, 代入 $x = 2, y = \frac{1}{2}, z = 1$, 求得 $z'_x \left(2, \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{4}$.

法二: 求全微分: $\frac{1}{z} dz + e^{z-1} dz = y dx + x dy \Rightarrow dz = \frac{yz}{1+ze^{z-1}} dx + \frac{xz}{1+ze^{z-1}} dy$, 那么 $\left. \frac{\partial z}{\partial x} \right|_{(2, \frac{1}{2})} = \frac{1}{4}$.

法三: 公式法: 令 $F(x, y, z) = \ln z + e^{z-1} - xy$, 那么 $\left. \frac{\partial z}{\partial x} \right|_{(2, \frac{1}{2})} = -\left. \frac{F'_x}{F'_y} \right|_{(2, \frac{1}{2})} = \frac{y}{\frac{1}{z} + e^{z-1}} \Big|_{(2, \frac{1}{2})} = \frac{1}{4}$.

5.2.2 全微分形式不变性

定义 5.2.2 (全微分的定义). 设点 $P_0(x_0, y_0)$ 为 $f(x, y)$ 定义域 D 的一个内点, 如果函数 $z = f(x, y)$ 在点 $P_0(x_0, y_0)$ 处的全增量 Δz 可表示为

$$\Delta z = f(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y) - f(x_0, y_0) = A\Delta x + B\Delta y + o(\rho)$$

其中 A, B 是与 $\Delta x, \Delta y$ 无关的常量, 则称函数 $z = f(x, y)$ 在点 $P_0(x_0, y_0)$ 处可微, 并称函数 $z = f(x, y)$ 的全增量 Δz 的线性主部 $A\Delta x + B\Delta y$ 为函数 $z = f(x, y)$ 在点 $P_0(x_0, y_0)$ 处的全微分, 记作

$$dz = A\Delta x + B\Delta y = Adx + Bdy \quad (dx = \Delta x, dy = \Delta y)$$

当函数 $z = f(x, y)$ 在点 $P_0(x_0, y_0)$ 处可微时, 有

$$dz = f'_x(x_0, y_0)dx + f'_y(x_0, y_0)dy.$$

定理 5.2.3 (全微分的形式不变性). 设函数 $z = f(u, v), u = \varphi(x, y)$ 及 $v = \psi(x, y)$ 分别具有连续偏导数, 则 $z = f(u, v)$ 的全微分

$$dz = \frac{\partial z}{\partial u}du + \frac{\partial z}{\partial v}dv$$

若把 u 和 v 视为中间变量, 则复合函数 $z = f[\varphi(x, y), \psi(x, y)]$ 的全微分为

$$dz = \frac{\partial z}{\partial x}dx + \frac{\partial z}{\partial y}dy$$

不论是 u 和 v 自变量还是中间变量, 以上微分形式保持不变, 这一性质称为一阶全微分形式不变性.

例 5.2.9. 设 $f(x, y) = x \cos \frac{x}{y} + (2-y) \ln \arctan \frac{x^2-y^2}{x^2+y^2}$, 求 $f'_x(0, 2)$.

利用全微分不变性,

$$df(x, y) = \cos \frac{x}{y} dx - x \sin \frac{x}{y} \cdot \frac{ydx - xdy}{y^2} - \ln \arctan \frac{x^2-y^2}{x^2+y^2} dy$$

因为 $df(0, 2) = dx - \ln \arctan(-1)dy$, 所以 $f_x(0, 2) = 1$.

例 5.2.10. 设 $z = z(x, y)$ 是由 $x - 2z = e^{y+3z} - 1$ 所确定的函数, 求 $2\frac{\partial z}{\partial x} - 3\frac{\partial z}{\partial y}$.

由全微分的形式不变性, 得 $dx - 2dz = e^{y+3z}(dy + 3dz)$, 即

$$dz = \frac{1}{3e^{y+3z} + 2} dx - \frac{e^{y+3z}}{3e^{y+3z} + 2} dy$$

于是 $\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{1}{3e^{y+3z} + 2}, \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{e^{y+3z}}{3e^{y+3z} + 2}$, 那么 $2\frac{\partial z}{\partial x} - 3\frac{\partial z}{\partial y} = 1$.

例 5.2.11. 设 $e^x - xyz = 0$, 求 $\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}, \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$.

由方程 $e^x - xyz = 0$ 两边分别求微分, 得

$$e^x dx - yzdx + xzdy + xydz = 0$$

整理得, $dz = \frac{yz - e^x}{xy} dx - \frac{z}{y} dy$, 由全微分不变性, 得 $\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{yz - e^x}{xy}, \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{z}{y}$,

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{yz - e^x}{xy} \right) = \frac{\frac{\partial z}{\partial x} - e^x}{y} = \frac{yz - e^x(1+xy)}{xy^2}.$$

例 5.2.12. 设 $\frac{x}{z} = \ln \frac{z}{y}$, 求 $\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}$.

由方程 $\frac{x}{z} = \ln \frac{z}{y}$ 两边分别求微分, 得

$$\frac{zdx - xdz}{z^2} = \frac{y}{z} \cdot \frac{ydz - zdy}{y^2}$$

整理得, $dz = \frac{z}{x+z} dx + \frac{z^2}{y(x+z)} dy$, 由全微分不变性, 得 $\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{z}{x+z}, \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{z^2}{y(x+z)}$.

例 5.2.13. 设 $z + e^z = xy$, 求 $\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}, \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$.

由方程 $z + e^z = xy$ 两边分别求微分, 得

$$dz + e^z dx = ydx + xdy$$

整理得, $dz = (y - e^z)dx + xdy$, 由全微分不变性, 得 $\frac{\partial z}{\partial x} = y - e^z, \frac{\partial z}{\partial y} = x$,

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (y - e^z) = 1.$$

例 5.2.14. 设 $z = z(x, y)$ 是由 $ze^x = xy$ 所确定的函数, 求 $dz, \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$.

由方程 $ze^x = xy$ 两边分别求微分, 得

$$e^x dz + ze^x dx = ydx + xdy$$

整理得, $dz = \frac{y - ze^x}{e^x} dx + \frac{x}{e^x} dy$, 由全微分不变性, 得 $\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{y - ze^x}{e^x}, \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{x}{e^x}$,

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{y - ze^x}{e^x} \right) = e^{-x} \left(1 - \frac{\partial z}{\partial y} e^x \right) = \frac{1-x}{e^x}.$$

例 5.2.15 (2006 年江苏省高等数学竞赛题). 已知由 $x = ze^{y+z}$ 可确定 $z = z(x, y)$, 求 $dz|_{(e,0)}$.

由方程 $x = ze^{y+z}$ 两边分别求微分, 得

$$dx = e^{y+z} dz + ze^{y+z} (dz + dy)$$

整理得, $dz = \frac{1}{e^{y+z}(1+z)} - \frac{z}{1+z} dy$, 所以 $dz|_{(e,0)} = \frac{1}{2e} dx - \frac{1}{2} dy$.

例 5.2.16 (2015 数二). 若函数 $z = z(x, y)$ 由方程 $e^{x+2y+3z} + xyz = 1$ 所确定, 求 $dz|_{(0,0)}$.

由方程 $e^{x+2y+3z} + xyz = 1$ 两边分别求微分, 得

$$e^{x+2y+3z} (dx + 2dy + 3dz) + yzdx + xzdy + xydz = 0$$

整理得, $dz = -\frac{e^{x+2y+3z} + yz}{3e^{x+2y+3z} + xy} dx - \frac{2e^{x+2y+3z} + xz}{3e^{x+2y+3z} + xy} dy$, 所以 $dz|_{(0,0)} = -\frac{1}{3} dx - \frac{2}{3} dy$.

例 5.2.17 (2016 数一). 设函数 $f(u, v)$ 可微, $z = z(x, y)$ 由方程 $(x+1)z - y^2 = x^2 f(x-z, y)$ 确定, 求 $dz|_{(0,1)}$.

由方程 $(x+1)z - y^2 = x^2 f(x-z, y)$ 两边分别求微分, 得

$$zdx + (x+1)dz - 2ydy = 2xdx \cdot f(x-z, y) + x^2 [f'_1(dx - dz) + f'_2 dy]$$

整理得, $dz = \frac{2xf(x-z, y) + x^2 f'_1 - z}{x+1} dx + \frac{2y + x^2 f'_2}{x+1} dy$, 所以 $dz|_{(0,1)} = -dx + 2dy$.

例 5.2.18 (第九届数学竞赛决赛). 设函数 $f(x, y)$ 具有一阶连续偏导数, 且满足

$$df(x, y) = ye^y dx + x(1+y)e^y dy$$

及 $f(0, 0) = 0$, 求 $f(x, y)$.

对方程 $df(x, y) = ye^y dx + x(1+y)e^y dy$ 两边积分, 有 $f(x, y) = xye^y + C$, 又 $f(0, 0) = 0$, 所以 $f(x, y) = xye^y$.

例 5.2.19 (2021 数一). 设函数 $f(x, y)$ 可微, 且 $f(x+1, e^x) = x(x+1)^2, f(x, x^2) = 2x^2 \ln x$, 则 $df(1, 1)$

- A. $dx + dy$
- B. $dx - dy$
- C. dy
- D. $-dy$

由题意 $\begin{cases} f'_1(x+1, e^x) + e^x f'_2(x+1, e^x) = (x+1)^2 + 2x(x+1) \\ f'_1(x, x^2) + 2x f'_2(x, x^2) = 4x \ln x + 2x \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f'_1(1, 1) + f'_2(1, 1) = 1 \\ f'_1(1, 1) + 2f'_2(1, 1) = 2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f'_1(1, 1) = 0 \\ f'_2(1, 1) = 1 \end{cases}$, 因此

$$df(1, 1) = f'_1(1, 1)dx + f'_2(1, 1)dy = dy$$

故选 C.

例 5.2.20. 设函数 $f(x, y)$ 可微且 $\begin{cases} f(x+1, \ln(x+1)) = (x+1)^3 + x \ln(x+1)(x+1)^{\ln(x+1)} \\ f(x^2, x-1) = x^4 e^{x-1} + (x-1)(x^2-1)x^{2(x-1)} \end{cases}$

则 $df(1, 0)$

- A. $dx + dy$ B. $dx - dy$ C. $2dx + dy$ D. $dx - 2dy$

令 $g(x) = x \ln(x+1)(x+1)^{\ln(x+1)}$, $h(x) = (x-1)(x^2-1)x^{2(x-1)}$, 那么

$$\begin{cases} f(x+1, \ln(x+1)) = (x+1)^3 + g(x) \\ f(x^2, x-1) = x^4 e^{x-1} + h(x) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f'_1(x+1, \ln(x+1)) + \frac{1}{x+1} f'_2(x+1, \ln(x+1)) = 3(x+1)^2 + g'(x) \\ 2x f'_1(x^2, x-1) + f'_2(x^2, x-1) = 4x^3 e^{x-1} + x^4 e^{x-1} + h'(x) \end{cases}$$

则 $\begin{cases} f'_1(1, 0) + f'_2(1, 0) = 3 + g'(0) \\ 2f'_1(1, 0) + f'_2(1, 0) = 5 + h'(1) \end{cases}$ 其中

$$\begin{aligned} g'(0) &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{g(o + \Delta x) - g(o)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \ln(\Delta x + 1)(\Delta x + 1)^{\ln(\Delta x + 1)} = 0 \\ h'(1) &= \lim_{\Delta x \rightarrow 1} \frac{h(1 + \Delta x) - h(1)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} [(1 + \Delta x)^2 - 1] (1 + \Delta x)^{2\Delta x} = 0 \end{aligned}$$

所以 $\begin{cases} f'_1(1, 0) + f'_2(1, 0) = 3 \\ 2f'_1(1, 0) + f'_2(1, 0) = 5 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f'_1(1, 0) = 2 \\ f'_2(1, 0) = 1 \end{cases} \Rightarrow df(1, 0) = f'_1(1, 0)dx + f'_2(1, 0)dy = 2dx + dy.$

5.2.3 复合函数微分法 (链式法则)

对自变量作变量替换

例 5.2.21 (2023 四川大学). 设 $x = u + v^2, y = u^2 - v^3, z = 2uv$, 求 $\left. \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \right|_{\substack{u=2 \\ v=1}}$.

对方程组 $\begin{cases} x = u + v^2 \\ y = u^2 - v^3 \end{cases}$ 等式两边同时对 x 求导得

$$\begin{pmatrix} 1 & 2v \\ 2u & -3v^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3v}{3v+4u} \\ \frac{2u}{3v^2+4uv} \end{pmatrix}$$

于是

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{6v^3 + 4u^2}{3v^2 + 4uv}$$

再对上式两边的 y 求偏导, 得

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{8u(4uv + 3v^2) - (6v^3 + 4u^2) \cdot (4v)}{(4uv + 3v^2)^2} \frac{2}{4u + 3v} + \frac{18v^2 \cdot (4uv + 3v^2) - (6v^3 + 4u^2) \cdot (4u + 6v)}{(4uv + 3v^2)^2} \cdot \frac{-1}{4uv + 3v^2}$$

代入 $u = 2, v = 1$, 可得 $\left. \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \right|_{\substack{u=2 \\ v=1}} = \frac{26}{121}$.

例 5.2.22. 试用关系 $u = \ln \sqrt{x^2 + y^2}, v = \arctan \frac{y}{x}$, 将 $(x+y)\frac{\partial z}{\partial x} - (x-y)\frac{\partial z}{\partial y} = 0$ 变成关于 u, v 的方程.

依赖关系如图 5.2.1 所示,

$$\begin{array}{c} z \swarrow u \leqslant x \\ z \swarrow v \leqslant y \end{array} \quad \begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial x} &= \frac{\partial z}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial u} \cdot \frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial z}{\partial v} \cdot \frac{-y}{x^2 + y^2} \\ \frac{\partial z}{\partial y} &= \frac{\partial z}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial z}{\partial u} \cdot \frac{y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial z}{\partial v} \cdot \frac{x}{x^2 + y^2} \end{aligned}$$

图 5.2.1

于是

$$\begin{aligned} (x+y) \frac{\partial z}{\partial x} - (x-y) \frac{\partial z}{\partial y} &= (x+y) \left(\frac{\partial z}{\partial u} \frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{\partial z}{\partial v} \frac{-y}{x^2 + y^2} \right) - (x-y) \left(\frac{\partial z}{\partial u} \frac{y}{x^2 + y^2} + \frac{\partial z}{\partial v} \frac{x}{x^2 + y^2} \right) \\ &= \left(\frac{x^2 + xy}{x^2 + y^2} - \frac{xy - y^2}{x^2 + y^2} \right) \frac{\partial z}{\partial u} + \left(\frac{-xy - y^2}{x^2 + y^2} - \frac{x^2 - xy}{x^2 + y^2} \right) \frac{\partial z}{\partial v} = 0 \Rightarrow \frac{\partial z}{\partial u} - \frac{\partial z}{\partial v} = 0. \end{aligned}$$

例 5.2.23. 试用关系 $u = x^2 - y^2, v = 2xy$, 将 $\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = 0$ 变成关于 u, v 的方程.

依赖关系如图 5.2.2 所示, 于是有

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial W}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = 2x \frac{\partial W}{\partial u} + 2y \frac{\partial W}{\partial v} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x} = 2x \frac{\partial}{\partial u} + 2y \frac{\partial}{\partial v}$$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(2x \frac{\partial W}{\partial u} + 2y \frac{\partial W}{\partial v} \right) = 2 \frac{\partial W}{\partial u} + 2x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial W}{\partial u} \right) + 2y \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial W}{\partial v} \right)$$

其中

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial W}{\partial u} \right) = 2x \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{\partial W}{\partial u} \right) + 2y \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{\partial W}{\partial u} \right) = 2x \frac{\partial^2 W}{\partial u^2} + 2y \frac{\partial^2 W}{\partial u \partial v}$$

同理

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial W}{\partial v} \right) = 2x \frac{\partial^2 W}{\partial v \partial u} + 2y \frac{\partial^2 W}{\partial v^2}$$

故

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = 2 \frac{\partial W}{\partial u} + 4x^2 \frac{\partial^2 W}{\partial u^2} + 4xy \frac{\partial^2 W}{\partial v \partial u} + 4xy \frac{\partial^2 W}{\partial u \partial v} + 4y^2 \frac{\partial^2 W}{\partial v^2}$$

同理可得

$$\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = -2 \frac{\partial W}{\partial u} + 4y^2 \frac{\partial^2 W}{\partial u^2} - 4xy \frac{\partial^2 W}{\partial v \partial u} - 4xy \frac{\partial^2 W}{\partial u \partial v} + 4x^2 \frac{\partial^2 W}{\partial v^2}$$

两式相加得

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = (4x^2 + 4y^2) \left(\frac{\partial^2 W}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial v^2} \right) \Rightarrow \frac{\partial^2 W}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial v^2} = 0.$$

例 5.2.24. 试将方程 $\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0$ 变换为极坐标的形式.

因为 $z = z(x, y), x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$, 所以依赖关系如图 5.2.3 所示, 于是有

$$\frac{\partial z}{\partial r} = \frac{\partial z}{\partial x} \cos \theta + \frac{\partial z}{\partial y} \sin \theta, \quad \frac{\partial z}{\partial \theta} = -\frac{\partial z}{\partial x} r \sin \theta + \frac{\partial z}{\partial y} r \cos \theta$$

$$\begin{array}{c} x \leqslant r \\ z \swarrow \theta \\ y \leqslant r \end{array}$$

解得

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial r} \cos \theta - \frac{\partial z}{\partial \theta} \frac{1}{r} \sin \theta, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{\partial z}{\partial r} \sin \theta + \frac{\partial z}{\partial \theta} \frac{1}{r} \cos \theta$$

即

$$\frac{\partial}{\partial x} = \cos \theta \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta}, \quad \frac{\partial}{\partial y} = \sin \theta \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \cos \theta \frac{\partial}{\partial \theta}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} = \cos \theta \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right) \\ &= \cos \theta \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial z}{\partial r} \cos \theta - \frac{\partial z}{\partial \theta} \frac{1}{r} \sin \theta \right) - \frac{1}{r} \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial z}{\partial r} \cos \theta - \frac{\partial z}{\partial \theta} \frac{1}{r} \sin \theta \right) \\ &= \frac{\partial^2 z}{\partial r^2} \cos^2 \theta - \frac{\partial^2 z}{\partial \theta \partial r} \frac{1}{r} \sin \theta \cos \theta + \frac{\partial z}{\partial \theta} \frac{1}{r^2} \sin \theta \cos \theta \\ &\quad - \frac{\partial^2 z}{\partial r \partial \theta} \frac{1}{r} \sin \theta \cos \theta + \frac{\partial z}{\partial \theta} \frac{1}{r} \sin^2 \theta + \frac{\partial^2 z}{\partial \theta^2} \frac{1}{r^2} \sin^2 \theta + \frac{\partial z}{\partial \theta} \frac{1}{r^2} \sin \theta \cos \theta \end{aligned}$$

图 5.2.3

同理，有

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 z}{\partial r^2} \sin^2 \theta + \frac{\partial^2 z}{\partial r \partial \theta} \frac{1}{r} \sin \theta \cos \theta - \frac{\partial z}{\partial \theta} \frac{1}{r^2} \sin \theta \cos \theta + \frac{\partial^2 z}{\partial \theta^2} \frac{1}{r} \sin \theta \cos \theta \\ &\quad + \frac{\partial z}{\partial r} \frac{1}{r} \cos^2 \theta + \frac{\partial^2 z}{\partial \theta^2} \frac{1}{r^2} \cos^2 \theta - \frac{\partial z}{\partial \theta} \frac{1}{r^2} \sin \theta \cos \theta\end{aligned}$$

将上述结果代入原方程，化简即得

$$\frac{\partial^2 z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 z}{\partial \theta^2} = 0.$$

例 5.2.25. 设 $u = x + y$, $v = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}$, 试用 u , v 作新自变量变换方程

$$x^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - (x^2 + y^2) \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + y^2 \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0.$$

(假设出现的二阶偏导数都连续.)

依赖关系如图 5.2.4 所示,

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial u} - \frac{1}{x^2} \frac{\partial z}{\partial v}, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{\partial z}{\partial u} - \frac{1}{y^2} \frac{\partial z}{\partial v}$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial u} - \frac{1}{x^2} \frac{\partial z}{\partial v} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial u} \right) + \frac{2}{x^3} \frac{\partial z}{\partial v} - \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)$$

其中

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial u} \right) &= \left(\frac{\partial}{\partial u} - \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial v} \right) \left(\frac{\partial z}{\partial u} \right) = \frac{\partial^2 z}{\partial u^2} - \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2 z}{\partial u \partial v} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial v} \right) &= \left(\frac{\partial}{\partial u} - \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial v} \right) \left(\frac{\partial z}{\partial v} \right) = \frac{\partial^2 z}{\partial u \partial v} - \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2 z}{\partial v^2}\end{aligned}$$

于是

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 z}{\partial u^2} - \frac{2}{x^2} \frac{\partial^2 z}{\partial u \partial v} + \frac{2}{x^3} \frac{\partial z}{\partial v} + \frac{1}{x^4} \frac{\partial^2 z}{\partial v^2} \quad (1)$$

同理有

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 z}{\partial u^2} - \frac{2}{y^2} \frac{\partial^2 z}{\partial u \partial v} + \frac{2}{y^3} \frac{\partial z}{\partial v} + \frac{1}{y^4} \frac{\partial^2 z}{\partial v^2} \quad (2)$$

并且

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial u} - \frac{1}{y^2} \frac{\partial z}{\partial v} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial u} \right) - \frac{1}{y^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial v} \right) \\ &= \frac{\partial^2 z}{\partial u^2} - \left(\frac{1}{x^2} + \frac{1}{y^2} \right) \frac{\partial^2 z}{\partial u \partial v} + \frac{1}{x^2 y^2} \frac{\partial^2 z}{\partial v^2} \quad (3)\end{aligned}$$

将式 (1)、(2)、(3) 代入 $x^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - (x^2 + y^2) \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + y^2 \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0$, 化简得

$$uv(uv - 4) \frac{\partial^2 z}{\partial u \partial v} + 2v \frac{\partial z}{\partial v} = 0.$$

例 5.2.26. z 为 x, y 的可微函数, 试将方程

$$x^2 \frac{\partial z}{\partial x} + y^2 \frac{\partial z}{\partial y} = z^2$$

变成 $w = w(u, v)$ 的方程, 假设

$$x = u, \quad y = \frac{u}{1 + uv}, \quad z = \frac{u}{1 + uw}.$$

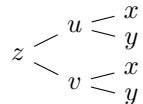


图 5.2.4

已知 $z = \frac{u}{1+uw}$, $w = w(u, v)$, $u = x$, $v = \frac{1}{y} - \frac{1}{x}$, 于是存在关系如图 5.2.5 所示,

$$\begin{aligned}\frac{\partial z}{\partial x} &= \frac{\partial z}{\partial u} \cdot \frac{du}{dx} + \frac{\partial z}{\partial w} \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial u} \cdot \frac{du}{dx} + \frac{\partial w}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ &= \frac{1+uw-uw}{(1+uw)^2} + \frac{-u^2}{(1+uw)^2} \left(\frac{\partial w}{\partial u} \cdot 1 + \frac{\partial w}{\partial v} \cdot \frac{1}{x^2} \right) = \frac{1-u^2 \left(\frac{\partial w}{\partial u} + \frac{\partial w}{\partial v} \cdot \frac{1}{x^2} \right)}{(1+uw)^2} \\ \frac{\partial z}{\partial y} &= \frac{\partial z}{\partial w} \cdot \frac{\partial w}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{-u^2}{(1+uw)^2} \cdot \frac{\partial w}{\partial v} \cdot \left(-\frac{1}{y^2} \right) = \frac{u^2}{(1+uw)^2 y^2} \cdot \frac{\partial w}{\partial v}\end{aligned}$$

于是

图 5.2.5

$$\begin{aligned}x^2 \frac{\partial z}{\partial x} + y^2 \frac{\partial z}{\partial y} &= \frac{x^2 - u^2 \left(x^2 \frac{\partial w}{\partial u} + \frac{\partial w}{\partial v} \right)}{(1+uw)^2} + \frac{u^2}{(1+uw)^2} \cdot \frac{\partial w}{\partial v} = \frac{u^2}{(1+uw)^2} \\ \Rightarrow \frac{x^2}{u^2} - \frac{\partial w}{\partial u} \cdot x^2 &= 1 \Rightarrow \frac{\partial w}{\partial u} = 0.\end{aligned}$$

例 5.2.27. 取 u, v 为新的自变量, 而 $w = w(u, v)$ 为新函数, 变化下列方程:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0 \quad u = x + y, \quad v = \frac{y}{x}, \quad w = \frac{z}{x}.$$

由已知得

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} = 1, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{y}{x^2}, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{x}, \quad \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{z}{x^2}, \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{x}$$

于是

$$\begin{aligned}\frac{\partial z}{\partial x} &= \frac{\partial w}{\partial x} \cdot x + w = \left(\frac{\partial w}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) \cdot x + w = x \frac{\partial w}{\partial u} - \frac{y}{x} \frac{\partial w}{\partial v} + w \\ \frac{\partial z}{\partial y} &= x \cdot \frac{\partial w}{\partial y} = x \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right) = x \frac{\partial w}{\partial u} + \frac{\partial w}{\partial v}\end{aligned}$$

令 $R = \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial y} = w - \left(1 + \frac{y}{x} \right) \frac{\partial w}{\partial v}$, 于是

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} &= \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \right) - \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial y} \right) \\ &= \frac{\partial R}{\partial x} - \frac{\partial R}{\partial y} = \frac{\partial R}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial R}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial R}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial R}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \\ &= \frac{\partial R}{\partial v} \left(-\frac{y}{x^2} - \frac{1}{x} \right) = \frac{\partial}{\partial v} \left[w - \left(1 + v \right) \frac{\partial w}{\partial v} \right] \left(-\frac{y}{x^2} - \frac{1}{x} \right) = \frac{1}{x} (1+v)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial v^2} = 0.\end{aligned}$$

由于 $x \neq 0, 1+v \neq 0$, 故原方程变为 $\frac{\partial^2 w}{\partial v^2} = 0$.

例 5.2.28. 取 u, v 为新的自变量, 而 $w = w(u, v)$ 为新函数, 变化下列方程:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + \left(1 + \frac{y}{x} \right) \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0 \quad u = x, \quad v = x + y, \quad w = x + y + z.$$

由已知得

$$\frac{du}{dx} = 1, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = 1$$

于是

$$\begin{aligned}\frac{\partial z}{\partial x} &= -1 + \frac{\partial w}{\partial x} = -1 + \frac{\partial w}{\partial u} \cdot \frac{du}{dx} + \frac{\partial w}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = -1 + \frac{\partial w}{\partial u} + \frac{\partial w}{\partial v} \\ \frac{\partial z}{\partial y} &= -1 + \frac{\partial w}{\partial y} = -1 + \frac{\partial w}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -1 + \frac{\partial w}{\partial v}\end{aligned}$$

令 $R = \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial u}$, 于是

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{\partial R}{\partial x} - \frac{\partial R}{\partial y} = \frac{\partial R}{\partial u} \cdot \frac{du}{dx} + \frac{\partial R}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial R}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial^2 w}{\partial u^2}$$

$$\frac{y}{x} \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \left(\frac{v}{u} - 1 \right) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w}{\partial v} - 1 \right) = \left(\frac{v}{u} - 1 \right) \left[\frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{\partial w}{\partial v} \right) \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{\partial w}{\partial v} \right) \frac{\partial v}{\partial y} \right] = \left(\frac{\partial v}{\partial u} - 1 \right) \frac{\partial^2 w}{\partial v^2}$$

将上述结果代入原方程得 $\frac{\partial^2 w}{\partial u^2} + \left(\frac{v}{u} - 1 \right) \frac{\partial^2 w}{\partial v^2} = 0$.

例 5.2.29. 取 u, v 为新的自变量, 而 $w = w(u, v)$ 为新函数, 变化下列方程:

$$(1-x^2) \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + (1-y^2) \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = x \frac{\partial z}{\partial x} + y \frac{\partial z}{\partial y}, \quad x = \sin u, \quad y = \sin v, \quad z = e^w.$$

由已知

$$\frac{du}{dx} = \frac{1}{\frac{dx}{du}} = \sec u, \quad \frac{dy}{dv} = \sec v$$

$$\frac{\partial z}{\partial w} = e^w \cdot \frac{\partial w}{\partial x} = e^w \cdot \frac{\partial w}{\partial u} \cdot \frac{du}{dx} = e^w \sec u \frac{\partial w}{\partial u}, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = e^w \sec v \frac{\partial w}{\partial v}$$

于是

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 z}{\partial w^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(e^w \sec u \frac{\partial w}{\partial u} \right) = \frac{\partial}{\partial u} \left(e^w \sec u \frac{\partial w}{\partial u} \right) \frac{du}{dx} = e^w \sec^2 u \left[\left(\frac{\partial w}{\partial u} \right)^2 + \frac{\partial^2 w}{\partial u^2} + \tan u \frac{\partial w}{\partial u} \right] \\ \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} &= e^w \sec^2 v \left[\left(\frac{\partial w}{\partial v} \right)^2 + \frac{\partial^2 w}{\partial v^2} + \tan v \frac{\partial w}{\partial v} \right] \end{aligned}$$

将上述结果代入原方程, 并注意到 $1-x^2 = \cos^2 u, 1-y^2 = \cos^2 v$, 化简即得

$$\frac{\partial^2 w}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial v^2} + \left(\frac{\partial w}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial v} \right)^2 = 0.$$

求变换中的常数

例 5.2.30. 设变换 $\begin{cases} u = x - 2y \\ v = x + ay \end{cases}$, 可把方程 $6 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0$ 化简为 $\frac{\partial^2 z}{\partial u \partial v} = 0$, 求常数 a , 其中 $z = z(x, y)$ 具有连续的二阶偏导数.

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial u} + \frac{\partial z}{\partial v}, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{\partial z}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = -2 \frac{\partial z}{\partial u} + a \frac{\partial z}{\partial v}, \quad \text{由此得到}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial u} + \frac{\partial}{\partial v}, \quad \frac{\partial}{\partial y} = -2 \frac{\partial}{\partial u} + a \frac{\partial}{\partial v}$$

于是

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right) = \left(\frac{\partial}{\partial u} + \frac{\partial}{\partial v} \right) \left(\frac{\partial z}{\partial u} + \frac{\partial z}{\partial v} \right) = \frac{\partial^2 z}{\partial u^2} + 2 \frac{\partial^2 z}{\partial u \partial v} + \frac{\partial^2 z}{\partial v^2} \\ \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right) = \left(-2 \frac{\partial}{\partial u} + a \frac{\partial}{\partial v} \right) \left(-2 \frac{\partial z}{\partial u} + a \frac{\partial z}{\partial v} \right) = 4 \frac{\partial^2 z}{\partial u^2} - 4a \frac{\partial^2 z}{\partial u \partial v} + a^2 \frac{\partial^2 z}{\partial v^2} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right) &= \left(\frac{\partial}{\partial u} + \frac{\partial}{\partial v} \right) \left(-2 \frac{\partial z}{\partial u} + a \frac{\partial z}{\partial v} \right) = -2 \frac{\partial^2 z}{\partial u^2} + (a-2) \frac{\partial^2 z}{\partial u \partial v} + a \frac{\partial^2 z}{\partial v^2} \end{aligned}$$

$$\text{由 } 6 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0 \text{ 得 } (10+5a) \frac{\partial^2 z}{\partial u \partial v} + (6+a-a^2) \frac{\partial^2 z}{\partial v^2} = 0, \text{ 于是有 } \begin{cases} 10+5a \neq 0 \\ 6+a-a^2 = 0 \end{cases} \Rightarrow a = 3.$$

例 5.2.31. 设函数 $z = z(u, v)$ 有连续 2 阶导数, 并且变换 $u = x + 2y, v = x + ay$ 能将方程 $2z''_{xx} + z''_{xy} - z''_{yy} = 0$ 变成 $z''_{uv} = 0$, 求 a .

因为 $z = z(u, v)$, $u = x + 2y$, $v = x + ay$, 所以依赖关系如图 5.2.4 所示, 那么有

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial u} + \frac{\partial z}{\partial v}$$

同理有

$$\frac{\partial z}{\partial y} = 2 \frac{\partial z}{\partial u} + a \frac{\partial z}{\partial v}$$

于是

$$z''_{xx} = z''_{uu} + z''_{vv}, z''_{xy} = 2z''_{uu} + az''_{vv}, z''_{yy} = 4z_{uu} + a^2 z''_{vv}$$

因此

$$0 = 2z''_{xx} + z''_{xy} - z''_{yy} = (2 + a - a^2)z''_{vv} = (1 + a)(2 - a)z''_{vv}$$

得 $a = -1$ 或 $a = 2$, 但 $a = 2$ 不合题意, 否则 $u = x + 2y = v$, 整个 xOy 平面将变成 $u = v$ 的一条直线, 将不可逆, 故 $a = -1$.

5.2.4 高阶全微分

定义 5.2.3 (二阶全微分). 设函数 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 在 x_0 处可微, 则

$$dy = \frac{\partial f(x_0)}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f(x_0)}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f(x_0)}{\partial x_n} dx_n$$

若函数 f 在开集 D 上的每一点都可微, 则对于给定的 dx_1, dx_2, \dots, dx_n , 全微分 dy 是 D 上的一个 n 元函数:

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n$$

若 f 在 D 上有二阶连续偏导数, 则 dy 就有一阶连续偏导数, 于是函数 dy 继续可微, 它的微分记作 d^2y , 称为 f 的二阶微分.

定义 5.2.4 (高阶全微分). 二阶微分实际上仍然是函数的全微分, 因此我们只需按照全微分的定义按部就班地计算二阶微分:

$$\begin{aligned} d^2y &= d(dy) = d\left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} dx_i\right) = \sum_{i=1}^n d\left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right) dx_i \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 y}{\partial x_j \partial x_i} dx_j \right) dx_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 y}{\partial x_j \partial x_i} dx_j dx_i \end{aligned}$$

用同样的方法可以继续定义三阶微分. 于是用数学归纳法可以定义 k 阶全微分:

$$d^k y = d(d^{k-1} y)$$

但是随着阶数的增加, 计算复杂度呈指数级增长, 为了使得形式上的简洁, 我们可以把一阶全微分等式的右侧看作一个算子对 y 作用:

$$\begin{aligned} dy &= \left(\frac{\partial}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial}{\partial x_n} dx_n \right) y \\ d^k y &= \left(\frac{\partial}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial}{\partial x_n} dx_n \right)^k y \end{aligned}$$

这里的算子

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial}{\partial x_n} dx_n \right).$$

定理 5.2.4. 当 x 与 y 是独立的自变量时 $d^2x = d(dx) = 0$, $d^2y = d(dy) = 0$.

例 5.2.32. 已知 $x^2 + 2xy - y^2 = a^2$, 求 $\frac{d^2y}{dx^2}$.

法一: 设 $F(x, y) = x^2 + 2xy - y^2 - a^2 = 0$, 则

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{F'_x}{F'_y} = -\frac{2x+2y}{2x-2y} = \frac{y+x}{y-x}$$

那么

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d}{dx}\left(\frac{y+x}{y-x}\right) = \frac{(y'+1)(y-x)-(y'-1)(y+x)}{(y-x)^2} = \frac{2y-2xy'}{(y-x)^2} = \frac{2y^2-4xy-2x^2}{(y-x)^3} = \frac{2a^2}{(x-y)^3}.$$

法二: 对等式两边全微分, 有

$$2xdx + 2ydx + 2xdy + 2ydy = 0 \Rightarrow xdx + ydx + xdy - ydy = 0$$

对上式再微分一次, 并注意到 $d^2x = 0$, 于是

$$dx^2 + 0 + dydx + 0 + dx dy + xd^2y - dy^2 - yd^2y = 0 \Rightarrow dx^2 + 2dx dy - dy^2 + (x-y)d^2y = 0$$

因此

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1+2\frac{dy}{dx}-\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}{y-x} = \frac{1+2\left(\frac{y+x}{y-x}\right)-\left(\frac{y+x}{y-x}\right)^2}{y-x} = \frac{2a^2}{(x-y)^3}.$$

5.2.5 高阶偏导数

例 5.2.33. 设函数 $u = f(\ln \sqrt{x^2 + y^2})$ 满足

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = (x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}$$

试求函数 f 的表达式.

令 $t = \frac{1}{2} \ln(x^2 + y^2)$, 于是

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= f'(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = f'(t) \cdot \frac{x}{x^2 + y^2} \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= f'(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial y} = f'(t) \cdot \frac{y}{x^2 + y^2} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= f''(t) \cdot \left(\frac{x}{x^2 + y^2}\right)^2 + f'(t) \cdot \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} &= f''(t) \cdot \left(\frac{y}{x^2 + y^2}\right)^2 + f'(t) \cdot \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2} \end{aligned}$$

于是

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f''(t) \cdot \frac{1}{x^2 + y^2} = (x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}} \Rightarrow f''(t) = (x^2 + y^2)^{\frac{5}{2}} = e^{5t}$$

两边积分两次得 $f(t) = \frac{1}{25}e^{5t} + C_1t + C_2$.

例 5.2.34. 已知 $z = xf\left(\frac{y}{x}\right) + 2y\varphi\left(\frac{x}{y}\right)$, 其中 f, φ 皆为二次可微函数.

(1) 求 $\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$.

(2) 当 $f = \varphi$, 且 $\left.\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right|_{x=a} = -by^2$ 时, 求 $f(y)$.

$$(1) \frac{\partial z}{\partial x} = f\left(\frac{y}{x}\right) - \frac{y}{x}f'\left(\frac{y}{x}\right) + 2\varphi'\left(\frac{x}{y}\right), \text{ 那么}$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[f\left(\frac{y}{x}\right) - \frac{y}{x}f'\left(\frac{y}{x}\right) + 2\varphi'\left(\frac{x}{y}\right) \right] = -\frac{y}{x^2}f''\left(\frac{y}{x}\right) - \frac{2x}{y^2}\varphi''\left(\frac{x}{y}\right).$$

(2) 当 $f = \varphi$, $x = a$ 时

$$I = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \Big|_{x=a} = -\frac{y}{a^2}f''\left(\frac{y}{a}\right) - \frac{2a}{y^2}f''\left(\frac{a}{y}\right) = -by^2$$

令 $y = au$ 得 $I = u^3f''(u) + 2f''\left(\frac{1}{u}\right) = a^3bu^4$, 用 $\frac{1}{u}$ 替换 u 得 $J = \frac{1}{u^3}f''\left(\frac{1}{u}\right) + 2f''(u) = \frac{a^3b}{u^4}$, 联立 I 和 J , 消去 $f''\left(\frac{1}{u}\right)$ 得 $f''(u) = \frac{1}{3}a^3b\left(\frac{2}{u^4} - u\right)$, 两次积分得

$$f(u) = \frac{1}{9}a^3b\left(\frac{1}{u^2} - \frac{1}{2}u^3\right) + C_1u + C_2$$

$$\text{所以 } f(y) = \frac{1}{9}a^3b\left(\frac{1}{y^2} - \frac{1}{2}y^3\right) + C_1y + C_2, \text{ 其中 } C_1, C_2 \text{ 是常数.}$$

例 5.2.35. 若函数 $f(x, y, z)$ 满足 $f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z)$, 则称它为 n 次齐次函数, 试证可微的 n 次齐次函数满足关系式:

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = nf.$$

证 由于 f 可微, 且 $f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z)$, 那么有

$$xf'_1 + yf'_2 + zf'_3 = nt^{n-1}f(x, y, z)$$

令 $t = 1$, 即得等式.

例 5.2.36. 设 $u = f(z)$, 其中 z 为方程式

$$z = x + y\varphi(z)$$

所定义的变量 (为 x 和 y 的隐函数). 证明 Lagrange 公式

$$\frac{\partial^n u}{\partial y^n} = \frac{\partial^{n-1}}{\partial x^{n-1}} \left[\varphi^n(z) \frac{\partial u}{\partial x} \right].$$

证 u 是 x, y 的复合函数, 存在依赖关系如图 5.2.6 所示,

由隐函数求导法则, 可得 $\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{\varphi(z)}{1 - y\varphi'(z)}$, $\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{1}{1 - y\varphi'(z)}$, 用数学归纳法, 当 $n = 1$ 时,

$$\frac{\partial u}{\partial y} = f'(z) \cdot \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{f'(z)\varphi(z)}{1 - y\varphi'(z)}$$

同理可得, $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{f'(z)}{1 - y\varphi'(z)}$, 所以有 $\frac{\partial u}{\partial y} = \varphi(z) \frac{\partial u}{\partial x}$, 这就是待证式当 $n = 1$ 时的情况. 现假设当 $n - 1$ 时等式成立, 来证明对 n 的情况也成立. 事实上,

$$\begin{aligned} I &= \frac{\partial^n u}{\partial y^n} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^{n-1} u}{\partial y^{n-1}} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial^{n-2}}{\partial x^{n-2}} \left[\varphi^{n-1}(z) \frac{\partial u}{\partial x} \right] = \frac{\partial^{n-2}}{\partial x^{n-2}} \frac{\partial}{\partial y} \left[\varphi^{n-1}(z) \frac{\partial u}{\partial x} \right] \\ &= \frac{\partial^{n-2}}{\partial x^{n-2}} \left[(n-1)\varphi^{n-2}(z) \cdot \varphi'(z) \frac{\partial z}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} + \varphi^{n-1}(z) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right] \end{aligned}$$

图 5.2.6
u — z
y ——————
y

$$J = \frac{\partial^{n-1}}{\partial x^{n-1}} \left[\varphi^{n-1}(z) \frac{\partial u}{\partial y} \right] = \frac{\partial^{n-2}}{\partial x^{n-2}} \left[(n-1)\varphi^{n-2}(z) \varphi'(z) \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \varphi^{n-1}(z) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right]$$

由于 $z'_y = \varphi(z)z'_x$ 及 $\frac{\partial u}{\partial y} = \varphi(z) \frac{\partial u}{\partial x}$, 有 $\frac{\partial z}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y}$, 故 $I = J$, 等式成立.

例 5.2.37. 若 $u = \frac{x+y}{x-y}$, 求 $\frac{\partial^{m+n} u}{\partial x^m \partial y^n} \Big|_{(2,1)}$.

因为 $u = 1 + \frac{2y}{x-y}$, 所以

$$\frac{\partial^m u}{\partial x^m} = (-1)^m \frac{m! 2y}{(x-y)^{m+1}} = -2m! \left[\frac{1}{(y-x)^m} + \frac{x}{(y-x)^{m+1}} \right]$$

由于

$$\begin{aligned} \frac{\partial^{m+1} u}{\partial x^m \partial y} &= -2m! \left[\frac{-m}{(y-x)^{m+1}} + \frac{-(m+1)x}{(y-x)^{m+2}} \right] \\ \frac{\partial^{m+2} u}{\partial x^m \partial y^2} &= -2m! \left[(-1)^2 \frac{m(m+1)}{(y-x)^{m+2}} + (-1)^2 \frac{(m+1)(m+2)x}{(y-x)^{m+3}} \right] \\ &\vdots \\ \frac{\partial^{m+n} u}{\partial x^m \partial y^n} &= -2m! \left[(-1)^n \frac{m(m+n-1)!}{(y-x)^{m+n}} + (-1)^n \frac{(m+n)!x}{(y-x)^{m+n+1}} \right] \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned} \frac{\partial^{m+n} u}{\partial x^m \partial y^n} \Big|_{(2,1)} &= -2m! \left[(-1)^n \frac{m(m+n-1)!}{(-1)^{m+n}} + (-1)^n \frac{2(m+n)!}{(-1)^{m+n+1}} \right] \\ &= 2(-1)^m (m+n-1)!(2m+2n-m) = 2(-1)^m (m+n-1)!(m+2n). \end{aligned}$$

5.2.6 偏微分方程

例 5.2.38. 已知可微函数 $f(u, v)$ 满足

$$\frac{\partial f(u, v)}{\partial u} - \frac{\partial f(u, v)}{\partial v} = 2(u-v)e^{-(u+v)}$$

且 $f(u, 0) = u^2 e^{-u}$,

(1) 记 $g(x, y) = f(x, y-x)$, 求 $\frac{\partial g(x, y)}{\partial x}$;

(2) 求 $f(u, v)$ 的表达式.

$$(1) \text{ 由题意, } \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} = \frac{\partial f(x, y-x)}{\partial x} = f'_u - f'_v = 2(u-v)e^{-(u+v)} = 2(2x-y)e^{-y}$$

$$(2) \text{ 由 (1) 可知, } f(x, y-x) = g(x, y) = \int 2(2x-y)e^{-y} dx + \varphi(y) = \frac{1}{2}(2x-y)^2 e^{-y} + \varphi(y), \text{ 令 } x=y=u, \text{ 得}$$

$$f(u, 0) = \frac{1}{2}u^2 e^{-u} + \varphi(u) = u^2 e^{-u}$$

$$\text{于是 } \varphi(u) = \frac{1}{2}u^2 e^{-u}, \text{ 再令 } x=u, y-x=v, \text{ 那么 } f(u, v) = (u^2 + v^2)e^{-(u+v)}.$$

例 5.2.39. 设函数 $u = u(x, y)$ 具有连续的二阶偏导数, 并且满足等式

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

(1) 证明: 用变量代换 $\xi = x-y$, $\eta = x+y$ 可将上式转化为 $\frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} = 0$;

(2) 求满足 $u(x, 2x) = x$, $\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{(x, 2x)} = x^2$ 和 $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$ 的函数 $u(x, y)$.

$$(1) \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \eta}, \text{ 于是 } \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + 2 \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} + \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2}, \text{ 同理可得}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} - 2 \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} + \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2}$$

$$\text{又 } \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, \text{ 故得证 } \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} = 0.$$

$$(2) \text{ 由 } \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} = 0 \text{ 两边对 } \eta \text{ 积分得 } \frac{\partial y}{\partial \xi} = f(\xi), \text{ 两边再对 } \xi \text{ 积分得}$$

$$u(\xi, \eta) = \int f(\xi) d\xi + g(\eta) = F(\xi) + g(\eta)$$

又 $\xi = x - y, \eta = x + y$, 于是 $u(x, y) = F(x - y) + g(x + y)$, 则 $u(x, 2x) = F(-x) + g(3x) = x$,

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{(x, 2x)} = F'(-x) + g'(3x) = x^2 \Rightarrow -F(-x) + \frac{1}{3}g(3x) = \frac{1}{3}x^3 + C$$

$$\text{于是 } \begin{cases} F(-x) &+ g(3x) = x \\ -F(-x) &+ \frac{1}{3}g(3x) = \frac{1}{3}x^3 + C \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} F(x) &= -\frac{1}{4}x + \frac{1}{4}x^3 + C \\ g(x) &= \frac{1}{4}x + \frac{1}{108}x^3 + C \end{cases}, \text{ 故}$$

$$u(x, y) = F(x - y) + g(x + y) = \frac{(x + y)^3}{108} + \frac{(x - y)}{4} + \frac{1}{2}y.$$

5.3 极值

5.3.1 二元函数的极值

定理 5.3.1 (二元函数取极值的必要条件). 可偏导的二元函数 $f(x, y)$ 在 (a, b) 取极值的必要条件是

$$f'_x(a, b) = 0, f'_y(a, b) = 0$$

称点 (a, b) 为 $f(x, y)$ 的驻点.

定理 5.3.2 (二元函数取极值的充分条件). 若 $f(x, y)$ 在 (a, b) 处二阶偏导函数连续, (a, b) 是 $f(x, y)$ 的驻点, 令

$$A = f''_{xx}(a, b), B = f''_{xy}(a, b), C = f''_{yy}(a, b)$$

- (1) 当 $\Delta = B^2 - AC < 0, A > 0$ 时, $f(a, b)$ 为极小值;
- (2) 当 $\Delta = B^2 - AC < 0, A < 0$ 时, $f(a, b)$ 为极大值;
- (3) 当 $\Delta = B^2 - AC > 0$ 时, $f(a, b)$ 不是 f 的极值;

例 5.3.1 (2009 数二). 设函数 $z = f(x, y)$ 的全微分为 $dz = xdx + ydy$, 则点 $(0, 0)$

- | | |
|----------------------|----------------------|
| A. 不是 $f(x, y)$ 的连续点 | B. 不是 $f(x, y)$ 的极值点 |
| C. 是 $f(x, y)$ 的极大值点 | D. 是 $f(x, y)$ 的极小值点 |

$A = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 1, B = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} = 0, C = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 1$, 又在点 $(0, 0)$ 处, $B^2 - AC < 0, A > 0$, 故 $(0, 0)$ 为函数 $z = f(x, y)$ 的一个极小值点, 选 D.

例 5.3.2 (2009 数一). 求二元函数 $f(x, y) = x^2(2 + y^2) + y \ln y$ 的极值.

令 $\begin{cases} f'_x(x, y) = 2x(2 + y^2) = 0 \\ f'_y(x, y) = 2x^2y + \ln y + 1 = 0 \end{cases}$, 解得驻点 $(0, \frac{1}{e})$, 因此

$$A = f''_{xx}\left(0, \frac{1}{e}\right) = 4 + 2y^2\Big|_{(0, \frac{1}{e})} = 4 + \frac{2}{e^2}, B = f''_{xy}\left(0, \frac{1}{e}\right) = 4xy\Big|_{(0, \frac{1}{e})} = 0, C = f''_{yy}\left(0, \frac{1}{e}\right) = 2x^2 + \frac{1}{y}\Big|_{(0, \frac{1}{e})} = e$$

则 $B^2 - AC = -4e - \frac{2}{e} < 0$, 又 $A > 0$, 从而 $f\left(0, \frac{1}{e}\right)$ 是 $f(x, y)$ 的极小值, 极小值为 $f\left(0, \frac{1}{e}\right) = -\frac{1}{e}$.

例 5.3.3. 求函数 $f(x, y) = 3(x - 2y)^2 + x^3 - 8y^3$ 的极值, 并证明 $f(0, 0) = 0$ 不是 $f(x, y)$ 的极值.

由 $\begin{cases} f'_x = 3x^2 + 6x - 12y = 0 \\ f'_y = -24y^2 + 24y - 12x = 0 \end{cases} \Rightarrow$ 驻点 $\begin{cases} P_1(-4, 2) \\ P_2(0, 0) \end{cases}$, 且

$$A = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 6x + 6, B = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = -12, C = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = -48y + 24$$

在 P_1 处 $A = -18, B = -12, C = -72, \Delta = -1152 < 0$, 且 $A < 0$, 所以 $f(-4, 2) = 64$ 为极大值; 在 P_2 处 $A = 6, B = -12, C = 24, \Delta = 0$, 所以不能用 Δ 来证明 $f(0, 0)$ 不是极值, 下面用极值的定义来判断, 任取 $(0, 0)$ 的去心邻域

$$U_\delta^\circ = \{(x, y) \mid 0 < \sqrt{x^2 + y^2} < \delta\}$$

(1) 在 $y = 0$ 上, 取 $(x_n, y_n) = \left(\frac{1}{n}, 0\right)$ ($n \in \mathbb{N}^*$), 则当 n 充分大时, 显然有 $(x_n, y_n) \in U_\delta^\circ$, 且

$$f(x_n, y_n) = f\left(\frac{1}{n}, 0\right) = \frac{1}{n^2} \left(3 + \frac{1}{n}\right) > 0$$

(2) 在 $x = ky$ ($0 < k < 2$) 上, 有 $f(ky, y) = (k^3 - 8)y^2 \left(y - \frac{3(2-k)}{4+2k+k^2}\right)$, 故取 $y = \frac{4(2-k)}{4+2k+k^2} (> 0)$ 时 $f(ky, y) = (k^3 - 8)y^2 \frac{2-k}{4+2k+k^2} < 0$, 即取

$$(x_k, y_k) = \left(\frac{4k(2-k)}{4+2k+k^2}, \frac{4(2-k)}{4+2k+k^2}\right)$$

时有

$$\begin{aligned} f(x_k, y_k) &= f\left(\frac{4k(2-k)}{4+2k+k^2}, \frac{4(2-k)}{4+2k+k^2}\right) \\ &= (k^3 - 8) \frac{16(2-k)^3}{(4+2k+k^2)^3} = -\frac{16(2-k)^4}{(4+2k+k^2)^2} < 0 \end{aligned}$$

又因为

$$\lim_{k \rightarrow 2^-} (x_k, y_k) = \lim_{k \rightarrow 2^-} \left(\frac{4k(2-k)}{4+2k+k^2}, \frac{4(2-k)}{4+2k+k^2}\right) = (0, 0)$$

所以当 k 小于 2 且充分接近 2 时, $(x_k, y_k) \in U_\delta^\circ$. 由上述 (1) 和 (2) 可得, 在 $P_2(0, 0)$ 的任意小邻域 U_δ° 内, 既存在点 (x_n, y_n) , 使得 $f(x_n, y_n) > 0$, 也存在点 (x_k, y_k) , 使得 $f(x_k, y_k) < 0$, 故 $f(0, 0) = 0$ 不是极值.

定理 5.3.3 (Hesse 矩阵与极值定理). 设 P_0 为稳定点, 若在 P_0 处 Hesse 矩阵

$$\mathbf{H}(P_0) = \begin{pmatrix} f''_{x_1 x_1} & f''_{x_1 x_2} & \cdots & f''_{x_1 x_n} \\ f''_{x_2 x_1} & f''_{x_2 x_2} & \cdots & f''_{x_2 x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f''_{x_n x_1} & f''_{x_n x_2} & \cdots & f''_{x_n x_n} \end{pmatrix}$$

为正定的, 则 f 在 P_0 处取极小值; 若 $\mathbf{H}(P_0)$ 为负定的, 则 f 在 P_0 处取极大值; 若 $\mathbf{H}(P_0)$ 为不定的, 则 f 在 P_0 处无极值. 关于正定性的介绍可阅读定理 14.1.1.

例 5.3.4. 求函数 $f(x, y) = x^4 + y^4 - (x + y)^2$ 的极值.

$$\begin{cases} f'_x(x, y) = 4x^3 - 2(x + y) = 0 \\ f'_y(x, y) = 4y^3 - 2(x + y) = 0 \end{cases} \quad \text{解得驻点 } P_1(0, 0), P_2(1, 1), P_3(-1, -1), \text{ 又}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 12x^2 - 2, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = 12y^2 - 2, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = -2, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} = -2$$

由 Hesse 矩阵 $\mathbf{H}(P_1) = \begin{pmatrix} -2 & -2 \\ -2 & -2 \end{pmatrix}$, $\mathbf{H}(P_2) = \begin{pmatrix} 10 & -2 \\ -2 & 10 \end{pmatrix}$, $\mathbf{H}(P_3) = \begin{pmatrix} 10 & -2 \\ -2 & 10 \end{pmatrix}$ 且 $\mathbf{H}(P_1)$ 不定, 故 $(0, 0)$ 不是极值点; $\mathbf{H}(P_2)$ 正定, 故 $(1, 1)$ 为极小值点; $\mathbf{H}(P_3)$ 正定, 故 $(-1, -1)$ 为极小值点, 综上, f 的极小值为 $f(1, 1) = f(-1, -1) = -2$.

例 5.3.5 (2004 数一). 设 $z = z(x, y)$ 是由 $x^2 - 6xy + 10y^2 - 2yz - z^2 + 18 = 0$ 确定的函数, 求 $z = z(x, y)$ 的极值点与极值.

$$\text{在 } x^2 - 6xy + 10y^2 - 2yz - z^2 + 18 = 0 \text{ 两边对 } x, y \text{ 求偏导, 得} \begin{cases} 2x - 6y - 2y \frac{\partial z}{\partial x} - 2z \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \\ -6x + 20y - 2z - 2y \frac{\partial z}{\partial y} - 2z \frac{\partial z}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad \text{令} \begin{cases} z'_x = 0 \\ z'_y = 0 \end{cases},$$

$$\text{得} \begin{cases} x = 3y \\ z = y \end{cases} \quad \text{代入 } x^2 - 6xy + 10y^2 - 2yz - z^2 + 18 = 0 \text{ 得} \begin{cases} x = 9 \\ y = 3 \\ z = 3 \end{cases} \quad \text{或} \begin{cases} x = -9 \\ y = -3 \\ z = -3 \end{cases} \quad \text{并且}$$

$$\begin{aligned} 0 &= 2 - 2y \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - 2 \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 - 2z \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \\ 0 &= -6 - 2 \frac{\partial z}{\partial x} - 2y \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} - 2 \frac{\partial z}{\partial y} \frac{\partial z}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \\ 0 &= 20 - 2 \frac{\partial z}{\partial y} - 2 \frac{\partial z}{\partial y} - 2y \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} - 2 \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 - 2z \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \end{aligned}$$

$$\text{于是 } \mathbf{H}(P_1) = \begin{pmatrix} z''_{xx} & z''_{xy} \\ z''_{yx} & z''_{yy} \end{pmatrix} \Big|_{(9, 3, 3)} = \begin{pmatrix} \frac{1}{6} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{5}{3} \end{pmatrix} \text{ 正定, 故点 } (9, 3) \text{ 是 } z(x, y) \text{ 的极小值点, 极小值为 } z(9, 3) = 3, \text{ 同理可}$$

$$\text{得 } \mathbf{H}(P_2) = \begin{pmatrix} -\frac{1}{6} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{5}{3} \end{pmatrix} \text{ 负定, 从而点 } (-9, -3) \text{ 是 } z(x, y) \text{ 的极大值点, 极大值为 } z(-9, -3) = -3.$$

例 5.3.6 (2012 数一). 求函数 $f(x, y) = xe^{-\frac{x^2+y^2}{2}}$ 的极值.

$$\text{法一: 令} \begin{cases} f'_x(x, y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2}} - x^2 e^{-\frac{x^2+y^2}{2}} = 0 \\ f'_y(x, y) = -xye^{-\frac{x^2+y^2}{2}} = 0 \end{cases} \quad \text{解得驻点 } P_1(1, 0), P_2(-1, 0), \text{ 且}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = -3xe^{-\frac{x^2+y^2}{2}} + x^3 e^{-\frac{x^2+y^2}{2}}, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = -xe^{-\frac{x^2+y^2}{2}} + xy^2 e^{-\frac{x^2+y^2}{2}}, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = -ye^{-\frac{x^2+y^2}{2}} + x^2 ye^{-\frac{x^2+y^2}{2}} = \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}$$

$$\text{由 Hesse 矩阵 } \mathbf{H}(P_1) = \begin{pmatrix} -2e^{-\frac{1}{2}} & 0 \\ 0 & -e^{-\frac{1}{2}} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}(P_2) = \begin{pmatrix} 2e^{-\frac{1}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-\frac{1}{2}} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}(P_1) \text{ 负定, 故 } (1, 0) \text{ 为极大值点; } \mathbf{H}(P_2) \text{ 正定,}$$

故 $(-1, 0)$ 为极大值点, 因此 f 的极大值为 $f(1, 0) = e^{-\frac{1}{2}}$; 极小值为 $f(-1, 0) = -e^{-\frac{1}{2}}$.

法二: 在驻点 $(1, 0)$ 处,

$$A = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \Big|_{(1, 0)} = -2e^{-\frac{1}{2}}, \quad B = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \Big|_{(1, 0)} = 0, \quad C = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \Big|_{(1, 0)} = -e^{-\frac{1}{2}}$$

由于 $AC - B^2 = 2e^{-1} > 0$, 且 $A < 0$, 故 $(1, 0)$ 为极大值点, $f(1, 0) = e^{-\frac{1}{2}}$ 为极大值; 在驻点 $(-1, 0)$ 处,

$$A = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \Big|_{(-1, 0)} = 2e^{-\frac{1}{2}}, \quad B = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \Big|_{(-1, 0)} = 0, \quad C = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \Big|_{(-1, 0)} = e^{-\frac{1}{2}}$$

由于 $AC - B^2 = 2e^{-1} > 0, A > 0$, 故 $(-1, 0)$ 为极小值点, $f(-1, 0) = -e^{-\frac{1}{2}}$ 为极小值.

例 5.3.7 (2015 数二). 已知函数 $f(x, y)$ 满足 $f''_{xy}(x, y) = 2(y+1)e^x$, $f'_x(x, 0) = (x+1)e^x$, $f(0, y) = y^2 + 2y$, 求 $f(x, y)$ 的极值.

方程 $f''_{xy}(x, y) = 2(y+1)e^x$ 两边对 y 求积分, 得 $f'_x = e^x(y+1)^2 + \varphi(x)$, 并令 $y=0$, 与 $f'_x(x, 0) = (x+1)e^x$ 对比得 $\varphi(x) = xe^x$, 那么 $f'_x(x, y) = e^x(y+1)^2 + xe^x$, 两边再对 x 求积分, 得

$$f(x, y) = (y+1)^2e^x + (x-1)e^x + \psi(y)$$

又 $f(0, y) = y^2 + 2y$, 得 $\psi(y) = 0$, 则 $f(x, y) = (y+1)^2e^x + (x-1)e^x$, 因此 $\begin{cases} f'_x = (y+1)^2e^x + xe^x = 0 \\ f'_y = 2(y+1)e^x = 0 \end{cases}$ 得 $x=0, y=-1$, 且 $f''_{xx} = (y+1)^2e^x + (x+1)e^x$, $f''_{xy} = 2(y+1)e^x$, $f''_{yy} = 2$, 则 $H(0, -1) = \begin{pmatrix} z''_{xx} & z''_{xy} \\ z''_{yx} & z''_{yy} \end{pmatrix} \Big|_{(0, -1)}$ 正定, 于是 $f(x, y)$ 在 $(0, -1)$ 处取得极小值, $f(0, -1) = -1$.

例 5.3.8 (2023 数一). 求函数 $f(x, y) = (y-x^2)(y-x^3)$ 的极值.

法一: 令 $\begin{cases} f'_x(x, y) = 5x^4 - 3x^2y - 2xy = 0 \\ f'_y(x, y) = 2y - x^3 - x^2 = 0 \end{cases}$ 解得驻点为 $P_1(0, 0)$, $P_2(1, 1)$, $P_3\left(\frac{2}{3}, \frac{10}{27}\right)$, 且

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 20x^3 - 6xy - 2y, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = 2, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = -3x^2 - 2x = \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}$$

由 Hesse 矩阵得 $H(P_1) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ 为不定, 故 $(0, 0)$ 非极值点; $H(P_2) = \begin{pmatrix} 12 & -5 \\ -5 & 2 \end{pmatrix}$ 为不定, 故 $(1, 1)$ 非极值点; $H(P_3) = \begin{pmatrix} \frac{100}{27} & -\frac{8}{3} \\ -\frac{8}{3} & 2 \end{pmatrix}$ 为正定, 故 $\left(\frac{2}{3}, \frac{10}{27}\right)$ 为极小值点, 且函数的极小值为 $f\left(\frac{2}{3}, \frac{10}{27}\right) = -\frac{4}{27^2}$.

法二: 计算二阶偏导以及二阶混合偏导, 有

$$\begin{aligned} A &= \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = -2y - 6xy + 20x^3 \\ B &= \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = -2x - 3x^2, C = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = 2 \end{aligned}$$

(i) 当驻点为 $(x, y) = (0, 0)$ 时, 有 $A=0, B=0, C=2$, 此时 $AC-B^2=0$, 多元函数取得极值的充分条件失效, 由 $f(x, y) = (y-x^2)(y-x^3)$ 可知 $f(0, 0)=0$, 取 $y=2x^2$, 当 x 为充分小的正数时, $f(x, y)=x^4(2-x)>0$; 取 $y=2x^3$, 当 x 为充分小的正数时, $f(x, y)=x^5(2x-1)<0$, 由极值点的定义可知, $(0, 0)$ 点不是 $f(x, y)$ 的极值点;

(ii) 当驻点为 $(x, y) = \left(\frac{2}{3}, \frac{10}{27}\right)$ 时, 有

$$A = \frac{100}{27}, B = -\frac{8}{3}, C = 2$$

则 $AC-B^2 = \frac{100}{27} \cdot 2 - \left(-\frac{8}{3}\right)^2 = \frac{8}{27} > 0$ 且 $A = \frac{100}{27} > 0$, 故 $f(x, y)$ 在 $\left(\frac{2}{3}, \frac{10}{27}\right)$ 取得极小值;

(iii) 当驻点为 $(x, y) = (1, 1)$ 时, 有

$$A = 12, B = -5, C = 2$$

此时 $AC-B^2 = 12 \cdot 2 - (-5)^2 = -1$, 所以 $f(x, y)$ 在 $(1, 1)$ 处不取极值, 综上可知, $f(x, y)$ 仅有一个极小值点 $\left(\frac{2}{3}, \frac{10}{27}\right)$ 且取得极小值为

$$f\left(\frac{2}{3}, \frac{10}{27}\right) = \left(\frac{10}{27} - \frac{4}{9}\right) \left(\frac{10}{27} - \frac{8}{27}\right) = -\frac{4}{729}.$$

5.3.2 条件极值

二元函数 $z=f(x, y)$ 在条件 $\varphi(x, y)=0$ 下的极值. 构造 Lagrange 函数:

$$F(x, y, \lambda) = f(x, y) + \lambda\varphi(x, y)$$

得方程组

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\partial f}{\partial y} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = \varphi(x, y) = 0 \end{cases}$$

解得满足方程组所有点 (x, y) , 即为可能的极值点, 然后再逐一判定.

单项链等法

当目标函数 $f(x, y, z) = mx^a y^b z^c$ ($mabc \neq 0$) 时, 可构造出相等的项, 将其放在等号一边使其连等, 消除 λ .

例 5.3.9. 设 $x, y, z > 0$, 求 $f(x, y, z) = 8xyz$, 在条件 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$ ($a, b, c > 0$) 下的最大值.

$F(x, y, z, \lambda) = 8xyz + \lambda \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1 \right)$, 那么

$$\begin{cases} F'_x = 8yz + \frac{2\lambda x}{a^2} = 0 \xrightarrow{*} -8xyz = \frac{2\lambda x^2}{a^2} \\ F'_y = 8xz + \frac{2\lambda y}{b^2} = 0 \xrightarrow{*} -8xyz = \frac{2\lambda y^2}{b^2} \\ F'_z = 8xy + \frac{2\lambda z}{c^2} = 0 \xrightarrow{*} -8xyz = \frac{2\lambda z^2}{c^2} \\ F'_\lambda = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1 = 0 \end{cases}$$

$$\text{由此可得 } \frac{x^2}{a^2} = \frac{y^2}{b^2} = \frac{z^2}{c^2} = \frac{1}{3} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{a}{\sqrt{3}} \\ y = \frac{b}{\sqrt{3}} \\ z = \frac{c}{\sqrt{3}} \end{cases}, \text{ 故 } f_{max} = \frac{8abc}{3\sqrt{3}}.$$

齐次构造法

如果目标函数 f 是齐次的, 同时约束条件可以转化成齐次函数 $g(x, y, z) = c$ 的形式. 若此时目标函数 $f(x, y, z)$ 为 m 次齐次函数, $g(x, y, z)$ 为 n 次齐次函数 ($m, n \neq 0$), 则可以构造出这个式子: $f(x, y, z) = -\frac{cn}{m}\lambda$, 此时再求出 λ 的值即可求出目标函数 $f(x, y, z)$ 的最值.

例 5.3.10 (2010 数三). 求函数 $u = xy + 2yz$ 在约束条件 $x^2 + y^2 + z^2 = 10$ 下的最大值和最小值.

令 $F(x, y, z, \lambda) = xy + 2yz + \lambda(x^2 + y^2 + z^2 - 10)$, 解方程组 $\begin{cases} F'_x = 2\lambda x + y = 0 \\ F'_y = 2\lambda y + x + 2z = 0 \\ F'_z = 2\lambda z + 2y = 0 \\ F'_\lambda = x^2 + y^2 + z^2 - 10 = 0 \end{cases}$ 那么

$$\frac{x}{2} \cdot F'_x + \frac{y}{2} \cdot F'_y + \frac{z}{2} \cdot F'_z = 0 \Rightarrow xy + 2yz = -10\lambda$$

由于 x, y, z 全为 0 显然不成立, 因此 $\begin{vmatrix} 2\lambda & 1 & 0 \\ 1 & 2\lambda & 2 \\ 0 & 2 & 2\lambda \end{vmatrix} = 0 \Rightarrow \lambda = 0, \pm \frac{\sqrt{5}}{2}$, 故 $u_{min} = -5\sqrt{5}$, $u_{max} = 5\sqrt{5}$.

多约束条件

例 5.3.11 (2019 数一). 已知曲线 $C : \begin{cases} x^2 + 2y^2 - z = 6 \\ 4x + 2y + z = 30 \end{cases}$ 求 C 上的点到 xOy 坐标平面的距离的最大值.

设 $P(x, y, z) \in C$, 到 xOy 坐标平面的距离为 $d = |z|$, 则目标函数 $f(x, y, z) = z^2$, 约束函数为 $x^2 + 2y^2 - z - 6 = 0$ 及 $4x + 2y + z - 30 = 0$, 则构造 Lagrange 函数

$$F(x, y, z, \lambda, \mu) = z^2 + \lambda(x^2 + 2y^2 - z - 6) + \mu(4x + 2y + z - 30) = 0$$

所以 $\begin{cases} F'_x = 2\lambda x + 4\mu = 0 \\ F'_y = 4\lambda y + 2\mu = 0 \\ F'_z = 2z - \lambda + \mu = 0 \\ F'_{\lambda} = x^2 + 2y^2 - z - 6 = 0 \\ F'_{\mu} = 4x + 2y + z - 30 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = 4 \\ y = 1 \\ z = 12 \end{cases}$ 或 $\begin{cases} x = -8 \\ y = -2 \\ z = 66 \end{cases}$ 得驻点 $(4, 1, 12)$ 和 $(-8, -2, 66)$, 故曲线 C 上的点到 xOy 坐标平面的距离的最大值 $d_{max} = 66$.

三角代换

例 5.3.12. 求 $f(x, y) = 3x^2 - 2xy + 2y^2$ 在单位圆周 $x^2 + y^2 = 1$ 上的最大值和最小值.

令 $x = \cos \theta$, $y = \sin \theta$, 那么 $f(\theta) = 3\cos^2 \theta + 2\sin^2 \theta - 2\sin \theta \cos \theta = \frac{1}{2}[5 - \sqrt{5}\sin(2\theta - \varphi)]$, 其中 $\varphi = \arctan \frac{1}{2}$, 由 $\theta \in [0, 2\pi]$ 可知 $2\theta - \varphi \in [-\varphi, 4\pi - \varphi]$, 所以 $\sin(2\theta - \varphi) \in [-1, 1]$, 故 $f_{max} = \frac{5 + \sqrt{5}}{2}$, $f_{min} = \frac{5 - \sqrt{5}}{2}$.

5.3.3 多元函数的最值问题

求连续函数在有界闭域 D 上最值的步骤:

- (1) 求 D 内的驻点和不可导点;
- (2) 用求极值的方法求 D 的边界上最值的可疑点;
- (3) 比较这些点的函数值的大小.

例 5.3.13 (2005 数二). 已知函数 $z = f(x, y)$ 的全微分 $dz = 2xdx - 2ydy$, 并且 $f(1, 1) = 2$, 求 $f(x, y)$ 在椭圆域 $D = \left\{ (x, y) \mid x^2 + \frac{y^2}{4} \leqslant 1 \right\}$ 上的最大值和最小值.

由 $dz = 2xdx - 2ydy$ 知, $\frac{\partial f}{\partial x} = 2x$, $\frac{\partial f}{\partial y} = -2y$, 那么 $f(x, y) = x^2 - y^2 + C$, 又 $f(1, 1) = 2$, 求得 $C = 2$, 因此 $f(x, y) = x^2 - y^2 + 2$, 那么 $f''_{xx} = 2$, $f''_{xy} = 0$, $f''_{yy} = -2$, 令 $f'_x = 0$, $f'_y = 0$, 得可疑极值点 $P(0, 0)$, 所以 $H(P) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$ 不定, $P(0, 0)$ 不是极值点, 从而也非最值点,

再考虑边界情况, $x^2 + \frac{y^2}{4} = 1$ 上的情形, 作 Lagrange 函数 $F(x, y, \lambda) = x^2 - y^2 + 2 + \lambda \left(x^2 + \frac{y^2}{4} - 1 \right)$, 那么

$$\begin{cases} F'_x = 2x(\lambda + 1) = 0 \\ F'_y = \frac{y(\lambda - 4)}{2} = 0 \\ F'_{\lambda} = x^2 + \frac{y^2}{4} - 1 = 0 \end{cases}$$

解得 $\begin{cases} x = 0 \\ y = \pm 2 \end{cases}$ 或 $\begin{cases} x = \pm 1 \\ y = 0 \end{cases}$ 代入 $f(x, y)$, 得 $f(0, \pm 2) = -2$, $f(\pm 1, 0) = 3$, 综上, $z = f(x, y)$ 在区域 D 上的最大值为 3, 最小值为 -2.

5.4 方向导数与梯度

方向导数和梯度是多元函数微积分中与偏导数密切相关的概念, 用于描述函数在某一点处的变化率和最大增长率.

5.4.1 方向导数的计算

定义 5.4.1 (方向导数). 设 \mathbf{l} 是空间的常向量, P_0 是定点, 动点 P 使得 $\overrightarrow{P_0P}$ 与 \mathbf{l} 方向相同, 则

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{l}} \Big|_{P_0} \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{P \rightarrow P_0} \frac{f(P) - f(P_0)}{|P_0P|}.$$

定理 5.4.1 (方向导数的计算). 设 $f(x, y, z)$ 在点 (a, b, c) 处可微, 则函数 $f(x, y, z)$ 在点 (a, b, c) 处沿任一方向 \mathbf{l} 的方向导数存在, 且若 $\mathbf{l}^0 = (\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$, 则有计算公式

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{l}} \Big|_{(a,b,c)} = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{(a,b,c)} \cos \alpha + \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_{(a,b,c)} \cos \beta + \frac{\partial f}{\partial z} \Big|_{(a,b,c)} \cos \gamma$$

例 5.4.1 (2017 数一). 函数 $f(x, y, z) = x^2y + z^2$ 在点 $(1, 2, 0)$ 处沿向量 $\mathbf{n} = \{1, 2, 2\}$ 的方向导数为

A. 12

B. 6

C. 4

D. 2

$$\frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{(1,2,0)} = 4, \quad \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_{(1,2,0)} = 1, \quad \frac{\partial f}{\partial z} \Big|_{(1,2,0)} = 0, \quad \text{且 } \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|} = \left\{ \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{2}{3} \right\}, \quad \text{因此 } \frac{\partial f}{\partial \mathbf{n}} = 4 \times \frac{1}{3} + 1 \times \frac{2}{3} + 0 \times \frac{2}{3} = 2.$$

例 5.4.2 (1996 数一). 求函数 $u = \ln(x + \sqrt{y^2 + z^2})$ 在点 $A(1, 0, 1)$ 处沿点 A 指向点 $B(3, -2, 2)$ 方向的方向导数.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{(1,0,1)} &= \frac{1}{2}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{(1,0,1)} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{(1,0,1)} = \frac{1}{2}, \quad \text{方向 } \overrightarrow{AB} = (2, -2, 1), \quad \text{方向余弦为 } \cos \alpha = \frac{2}{3}, \cos \beta = -\frac{2}{3}, \cos \gamma = \frac{1}{3}, \\ \text{那么 } \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} &= \frac{1}{2} \times \frac{2}{3} + 0 \times -\frac{2}{3} + \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

例 5.4.3. 求函数 $u = e^{xy} + x^2yz$ 在点 $(1, 2, 1)$ 处沿 x 轴负方向的方向导数.

由公式

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{l}} \Big|_{(a,b,c)} = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{(a,b,c)} \cos \alpha + \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_{(a,b,c)} \cos \beta + \frac{\partial f}{\partial z} \Big|_{(a,b,c)} \cos \gamma$$

其中 $(a, b, c) = (1, 2, 1)$, $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma) = (-1, 0, 0)$ 且 $f'_x = ye^{xy} + 2yzx$, 所以方向导数为

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{l}} \Big|_{(1,2,1)} = f'_x(1, 2, 1) \cos \alpha = -(2e^2 + 4).$$

例 5.4.4. 求函数 $u = xy^2z^3$ 处沿曲面 $x^2 + y^2 = 5$ 的外法向的方向导数.

已知 $F = x^2 + y^2 - 5 = 0$, $\mathbf{l} = 2(x, y, 0)$, 故曲面在 P 的外法向的方向余弦为

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{5}}, \quad \cos \beta = \frac{2}{\sqrt{5}}, \quad \cos \gamma = 0$$

并且

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) \Big|_P = (y^2 z^3, 2xyz^3, 2xy^2 z^2) \Big|_P = (-4, -4, 12)$$

于是

$$\frac{\partial u}{\partial \mathbf{l}} \Big|_P = u'_x(P) \cos \alpha + u'_y(P) \cos \beta + u'_z(P) \cos \gamma = -\frac{4}{\sqrt{5}} - \frac{8}{\sqrt{5}} + 0 = -\frac{12}{\sqrt{5}}.$$

5.4.2 梯度的计算

定理 5.4.2 (方向导数与梯度的关系). 设 $f(x, y, z)$ 在点 (a, b, c) 处可微, 则函数 $f(x, y, z)$ 在点 (a, b, c) 处沿梯度

$$\mathbf{grad} f|_{(a,b,c)} = (f'_x(a, b, c), f'_y(a, b, c), f'_z(a, b, c))$$

的方向导数取最大值, 且其值为梯度的模, 即

$$\max_l \left\{ \frac{\partial f}{\partial l} \Big|_{(a,b,c)} \right\} = |\mathbf{grad} f|_{(a,b,c)} = \sqrt{(f'_x(a, b, c))^2 + (f'_y(a, b, c))^2 + (f'_z(a, b, c))^2}$$

例 5.4.5 (2012 数一). 求 $\mathbf{grad} \left(xy + \frac{z}{y} \right) \Big|_{(2,1,1)}$.

由梯度的定义 $\mathbf{grad} f(x, y, z) = \left\{ \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \right\}$, 那么 $\mathbf{grad} \left(xy + \frac{z}{y} \right) \Big|_{(2,1,1)} = \left(y, x - \frac{z}{y^2}, \frac{1}{y} \right) \Big|_{(2,1,1)} = \{1, 1, 1\}$, 或 $i + j + k$.

例 5.4.6 (1992 数一). 函数 $u = \ln(x^2 + y^2 + z^2)$ 在点 $M(1, 2, -2)$ 处的梯度 $\mathbf{grad} u|_M$.

$$\mathbf{grad} u|_M = \frac{1}{x^2 + y^2 + z^2} (2xi + 2yj + 2zk) \Big|_{(1,2,-2)} = \frac{2}{9} \{1, 2, -2\} \cdot z$$

例 5.4.7 (2015 数一). 已知函数 $f(x, y) = x + y + xy$, 曲线 $C: x^2 + y^2 + xy = 3$, 求 $f(x, y)$ 在曲线 C 上的最大方向导数.

函数 f 在点 (x, y) 处的最大方向导数为

$$\sqrt{f'_x^2 + f'_y^2} = \sqrt{(1+y)^2 + (1+x)^2}$$

构造 Lagrange 函数 $F(x, y, \lambda) = (1+y)^2 + (1+x)^2 + \lambda(x^2 + y^2 + xy - 3)$, 所以 $\begin{cases} F'_x = \lambda(2x+y) + 2x + 2 = 0 \\ F'_y = \lambda(x+2y) + 2y + 2 = 0 \\ F'_\lambda = x^2 + y^2 + xy - 3 = 0 \end{cases}$ 解得

$\begin{cases} x = -1 \\ y = 2 \end{cases}$ 或 $\begin{cases} x = 2 \\ y = -1 \end{cases}$, 代入 $\sqrt{(1+y)^2 + (1+x)^2}$ 中, 得 $f(x, y)$ 在曲线 C 上的最大方向导数为 3.

例 5.4.8. 已知 a, b 为实数, 函数 $z = 2 + ax^2 + by^2$ 在点 $(3, 4)$ 的方向导数中沿方向 $\mathbf{l} = -3\mathbf{i} - 4\mathbf{j}$ 的方向导数最大, 且最大值为 10.

(1) 求 a, b 的值;

(2) 求曲面 $z = 2 + ax^2 + by^2$ ($z \geq 0$) 的面积.

(1) 函数 $z = 2 + ax^2 + by^2$ 在点 $(3, 4)$ 的梯度为

$$\mathbf{grad} z \Big|_{(3,4)} = \left(\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y} \right) \Big|_{(3,4)} = (6a, 8b)$$

因沿梯度的方向导数取最大值, 其值等于梯度的模, 所以有

$$\frac{\partial z}{\partial l} \Big|_{(3,4)} = \left| \mathbf{grad} z \Big|_{(3,4)} \right| = 10 \Rightarrow l^0 = \left(\frac{6a}{10}, \frac{8b}{10} \right) = \left(-\frac{3}{5}, -\frac{4}{5} \right)$$

于是 $a = -1, b = -1$.

(2) 曲面 $z = 2 - x^2 - y^2$ ($z \geq 0$) 是由 yOz 平面上的曲线 $y = \sqrt{2-z}$ ($0 \leq z \leq 2$) 绕 z 轴旋转而成, 于是所求曲面的面积为

$$S = 2\pi \int_0^2 y \sqrt{1 + (y'(z))^2} dz = 2\pi \int_0^2 \sqrt{2-z} \sqrt{1 + \left(\frac{-1}{2\sqrt{2-z}} \right)^2} dz = \pi \int_0^2 \sqrt{9-4z} dz = -\frac{\pi}{6} (9-4z)^{\frac{3}{2}} \Big|_0^2 = \frac{13}{3}\pi.$$

第 6 章

多元函数积分学

“给我最大快乐的，不是已懂得知识，而是不断的学习；

不是已达到的高度，而是继续不断的攀登。”

——高斯

多元函数积分是一元函数积分的推广，这种推广包括二重积分、三重积分、曲线积分和曲面积分。从定义分式上看，这些积分与定积分是相似的，它们的计算也都要化为定积分，因此，定积分是基础，学习本章的关键就是要掌握它们与定积分的关系，以及他们之间的相互关系。

6.1 重积分

重积分是对多元函数在一个区域上进行积分的过程。在二维空间中，重积分可以是对平面区域上的函数进行积分；在三维空间中，重积分可以是对立体区域上的函数进行积分。

6.1.1 重积分定义

二重积分

定义 6.1.1 (二重积分)。 设 $f(x, y)$ 是有界闭区域 D 上的有界函数，将闭区域 D 任意分成 n 个小闭区域 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \dots, \Delta\sigma_n$ ，其中 $\Delta\sigma_i$ 表示第 i 个小闭区域，也表示它的面积，在每个 $\Delta\sigma_i$ 上取一点 (ξ_i, η_i) ，作乘积 $f(\xi_i, \eta_i)\Delta\sigma_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$)，并作和 $\sum_{i=1}^n f(\xi_i, \eta_i)\Delta\sigma_i$ ，如果当各小闭区域的直径中的最大值 λ 趋近于零时，这和式极限存在，则称此极限为函数 $f(x, y)$ 在闭区间 D 上的二重积分，记作 $\iint_D f(x, y)d\sigma$ ，即

$$\iint_D f(x, y)d\sigma = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(\xi_i, \eta_i)\Delta\sigma_i$$

其中 $d\sigma$ 称为面积元。

例 6.1.1. 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi}{2n^4} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n i^2 \sin \frac{j\pi}{2n}$.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi}{2n^4} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n i^2 \sin \frac{j\pi}{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi}{2n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{i}{n}\right)^2 \sin \left(j \frac{\pi}{2n}\right) = \int_0^1 x^2 dx \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin y dy = \frac{1}{3}.$$

例 6.1.2 (2010 数一). 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{n}{(n+i)(n^2+j^2)}$.

由二重积分的定义

$$\begin{aligned} I &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{n}{(n+i)(n^2+j^2)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{n}{n \left(1 + \frac{i}{n}\right) n^2 \left[1 + \left(\frac{j}{n}\right)^2\right]} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{\left(1 + \frac{i}{n}\right) \left[1 + \left(\frac{j}{n}\right)^2\right]} = \int_0^1 dx \int_0^1 \frac{dy}{(1+x)(1+y^2)} = \ln 2 \cdot \arctan 1. \end{aligned}$$

例 6.1.3. 计算极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(\sqrt{1} + \sqrt{2} + \cdots + \sqrt{n}) \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{n}}\right)}{(n+1)(n+2)}$.

利用二重积分的定义, 得

$$\begin{aligned} I &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2}{(n+1)(n+2)} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt{k} \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{k}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2}{(n+1)(n+2)} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt{\frac{k}{n}} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{\frac{k}{n}}} \\ &= \int_0^1 \sqrt{x} dx \cdot \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx = \frac{2}{3} \cdot 2 = \frac{4}{3}. \end{aligned}$$

三重积分

定义 6.1.2 (三重积分). 设 $f(x, y, z)$ 是空间闭区域 Ω 上的有界函数, 将 Ω 任意分成 n 个小区域 $\Delta v_1, \Delta v_2, \dots, \Delta v_n$, 其中 Δv_i 表示第 i 个小区域, 也表示它的体积, 在每个 Δv_i 上取一点 (ξ_i, η_i, ζ_i) , 作乘积 $f(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) \Delta v_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 并作和 $\sum_{i=1}^n f(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) \Delta v_i$, 如果当各小区域的直径中的最大值 λ 趋近于零时, 这和式极限存在, 则称此极限为函数 $f(x, y, z)$ 在闭区间 Ω 上的三重积分, 记作 $\iiint_{\Omega} f(x, y, z) dv$, 即

$$\iiint_{\Omega} f(x, y, z) dv = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) \Delta v_i$$

其中 dv 称为体积元.

例 6.1.4. 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi}{2n^5} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n i^2 \sin \frac{\pi j}{2n} \cos \frac{k}{n}$.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi}{2n^3} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left(\frac{i}{n}\right)^2 \sin \frac{\pi j}{2n} \cos \frac{k}{n} = \frac{\pi}{2} \int_0^1 x^2 dx \int_0^1 \sin \left(\frac{\pi}{2} y\right) dy \int_0^1 \cos z dz = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2}{3\pi} \cdot \sin 1 = \frac{\sin 1}{3}.$$

重积分大小的比较

比较二重积分的大小, 本质上涉及用二重积分的不等式性质和函数的单调性进行分析讨论.

例 6.1.5 (2005 数一). 设 $I_1 = \iint_D \cos \sqrt{x^2 + y^2} d\sigma$, $I_2 = \iint_D \cos(x^2 + y^2) d\sigma$, $I_3 = \iint_D \cos(x^2 + y^2)^2 d\sigma$, 其中 $D = \{(x, y) | x^2 + y^2 \leq 1\}$, 则

- A. $I_3 > I_2 > I_1$ B. $I_1 > I_2 > I_3$ C. $I_2 > I_1 > I_3$ D. $I_3 > I_1 > I_2$

在区域 $D = \{(x, y) | x^2 + y^2 \leq 1\}$ 上有 $0 \leq x^2 + y^2 \leq 1$, 从而有

$$0 \leq (x^2 + y^2)^2 \leq x^2 + y^2 \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq 1 < \frac{\pi}{2}$$

又因为 $\cos x$ 在 $(0, \frac{\pi}{2})$ 上为单调递减函数, 于是

$$0 \leq \cos \sqrt{x^2 + y^2} \leq \cos(x^2 + y^2) \leq \cos(x^2 + y^2)^2$$

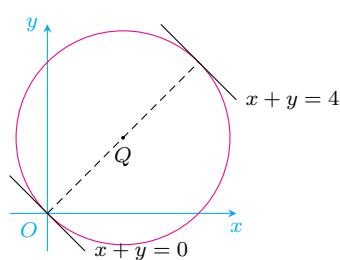
于是 $I_3 > I_2 > I_1$, 选 A.

例 6.1.6. 设区域 $D = \{(x, y) | (x - 1)^2 + (y - 1)^2 \leq 2\}$, $I_1 = \iint_D (x + y) d\sigma$, $I_2 = \iint_D \sin(x + y) d\sigma$, 则

下列结论正确的是

- A. $8\pi > I_1 > I_2$ B. $8\pi \geq I_1 \geq I_2$ C. $I_1 > 8\pi > I_2$ D. $I_1 \geq 8\pi \geq I_2$

作出积分区域后可分析 $x + y$ 的取值范围,



由图 6.1.1 易知, $0 \leq x + y \leq 4$, 所以 $x + y \geq \sin(x + y)$, 但取等的条件为 $(x, y) = (0, 0)$, 而在该点处的二重积分为 0, 因此

$$\iint_D (x + y) d\sigma > \iint_D \sin(x + y) d\sigma$$

排除 B、D 选项, 又因为当 $x + y = 4$ 时, 有

$$4 \iint_D d\sigma = 8\pi$$

并且同样地在 $(2, 2)$ 点处的二重积分为 0, 因此 $8\pi > I_1$, 故选 A.

图 6.1.1

例 6.1.7. 设 $I_1 = \iint_D \frac{x+y}{4} dx dy$, $I_2 = \iint_D \sqrt{\frac{x+y}{4}} dx dy$, $I_3 = \iint_D \sqrt[3]{\frac{x+y}{4}} dx dy$, 且 $D = \{(x, y) | (x - 1)^2 + (y - 1)^2 \leq 2\}$

则有

- A. $I_1 < I_2 < I_3$ B. $I_2 < I_3 < I_1$ C. $I_3 < I_1 < I_2$ D. $I_3 < I_2 < I_1$

由图 6.1.1 知, $0 < \frac{x+y}{4} < 1$, 且 $\frac{x+y}{4} < \sqrt{\frac{x+y}{4}} < \sqrt[3]{\frac{x+y}{4}}$, 因此 $I_1 < I_2 < I_3$, 选 A.

例 6.1.8 (2019 数二). 已知平面区域 $D = \{(x, y) | |x| + |y| \leq \frac{\pi}{2}\}$, 记 $I_1 = \iint_D \sqrt{x^2 + y^2} dx dy$, $I_2 = \iint_D \sin \sqrt{x^2 + y^2} dx dy$, $I_3 = \iint_D (1 - \cos \sqrt{x^2 + y^2}) dx dy$, 则

- A. $I_3 < I_2 < I_1$ B. $I_2 < I_1 < I_3$ C. $I_1 < I_2 < I_3$ D. $I_2 < I_3 < I_1$

作出积分区域 D :

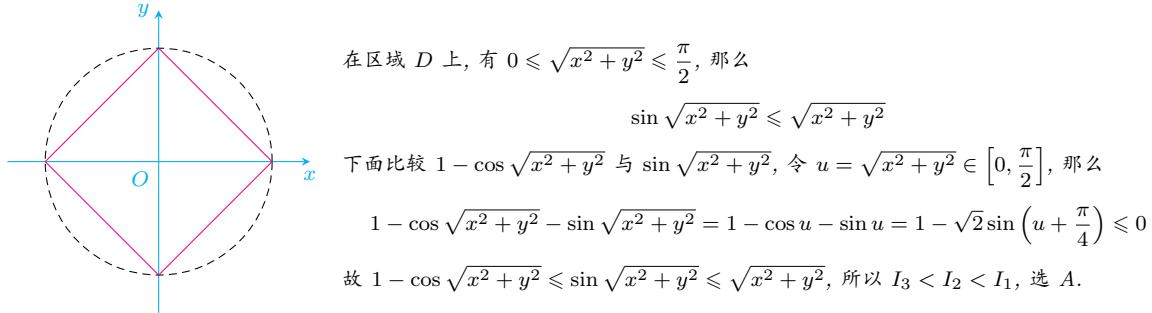


图 6.1.2

6.1.2 重积分的计算及相关方法

重积分的性质

例 6.1.9 (1993 年数三). 设 $f(x, y)$ 连续, 且

$$f(x, y) = xy + \iint_D f(u, v) dudv$$

其中 D 是由 $y = 0, y = x^2, x = 1$ 所围成区域, 求 $f(x, y)$.

设 $A = \iint_D f(u, v) dudv$, 则 $f(x, y) = xy + A$, 等式两边分别积分, 得

$$A = \iint_D f(x, y) dx dy = \iint_D (xy + A) dx dy = \int_0^1 dx \int_0^{x^2} (xy + A) dy = \int_0^1 \left(\frac{1}{2}x^5 + Ax^2 \right) dx = \frac{4A + 1}{12}$$

即 $A = \frac{1}{8}$, 于是 $f(x, y) = xy + \frac{1}{8}$.

例 6.1.10. 计算二重积分 $\iint_D y^2 dx dy$, 其中 D 是由摆线 $\begin{cases} x = a(t - \sin t) \\ y = a(1 - \cos t) \end{cases} \quad (0 \leq t \leq 2\pi, a > 0)$ 与 x 轴围成的区域.

因为 $y = a(1 - \cos t)$, $dx = a(1 - \cos t) dt$, 于是

$$\begin{aligned} \iint_D y^2 dx dy &= \int_0^{2\pi a} dx \int_0^{y(x)} y^2 dy = \frac{1}{3} \int_0^{2\pi a} y^3(x) dx = \frac{1}{3} \int_0^{2\pi} a^4 (1 - \cos t)^4 dt = \frac{a^4}{3} \int_0^{2\pi} \left(2 \sin^2 \frac{t}{2} \right)^4 dt \\ &\stackrel{\frac{t}{2}=u}{=} \frac{a^4}{3} \cdot 2^4 \cdot 2 \int_0^{\pi} \sin^8 u du = \frac{a^4}{3} \cdot 2^6 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^8 u du = \frac{a^4}{3} \cdot 2^6 \cdot \frac{1 \times 3 \times 5 \times 7}{2 \times 4 \times 6 \times 8} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{35\pi}{12} a^4. \end{aligned}$$

例 6.1.11. 设 D 由 $\begin{cases} x = t - \sin t \\ y = 1 - \cos t \end{cases} \quad (0 \leq t \leq 2\pi)$ 与 x 围成, 求 $\iint_D (x + 2y) dx dy$.

$$I = \iint_D (x+2y) dx dy = \int_0^{2\pi} dx \int_0^{y(x)} (x+2y) dy = \int_0^{2\pi} (xy + y^2) dx = \int_0^{2\pi} [(t - \sin t)(1 - \cos t)^2 + (1 - \cos t)^3] dt$$

令 $I_1 = \int_0^{2\pi} t(1 - \cos t)^2 dt$, $I_2 = \int_0^{2\pi} \sin t(1 - \cos t)^2 dt$, $I_3 = \int_0^{2\pi} (1 - \cos t)^3 dt$, 则

$$I_1 = \int_0^{2\pi} t \left(2 \sin^2 \frac{t}{2}\right)^2 dt \stackrel{\frac{t}{2}=u}{=} 16 \int_0^\pi u \cdot \sin^4 u du \stackrel{x \cdot f(\sin x) dx = \frac{\pi}{2} \int_0^\pi f(\sin x) dx}{=} 16\pi \cdot \frac{1 \times 3}{2 \times 4} \cdot \frac{\pi}{2} = 3\pi^2$$

$$I_3 = \int_0^{2\pi} \left(2 \sin^2 \frac{t}{2}\right)^3 dt = 8 \int_0^{2\pi} \sin^6 \frac{t}{2} dt \stackrel{\frac{t}{2}=u}{=} 32 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^6 u du = 32 \times \frac{1 \times 3 \times 5}{2 \times 4 \times 6} \cdot \frac{\pi}{2} = 5\pi$$

且 $I_2 = \int_0^{2\pi} \sin t(1 - \cos t)^2 dt \stackrel{u=\pi-t}{=} 0$, 故 $I = I_1 - I_2 + I_3 = 3\pi^2 + 5\pi$.

运用分部积分法

例 6.1.12. 计算 $\int_0^1 dy \int_1^{\sqrt{y}} \sqrt{\frac{1}{x^2} + 1} dx$.

由分部积分公式,

$$I = \int_0^1 \left[\int_1^{\sqrt{y}} \sqrt{\frac{1}{x^2} + 1} dx \right] dy = y \int_1^{\sqrt{y}} \sqrt{\frac{1}{x^2} + 1} dx \Big|_{y=0}^{y=1} - \int_0^1 y d \left[\int_1^{\sqrt{y}} \sqrt{\frac{1}{x^2} + 1} dx \right] = 0 - \frac{1}{2} \int_0^1 \sqrt{1+y} dy = 1 - 2\sqrt{2}.$$

例 6.1.13. 计算二重积分 $I = \int_0^1 dx \int_{x-x^3}^1 (3x^2 - 1)e^{y^2} dy$.

令 $\varphi(x) = \int_{x-x^3}^1 e^{y^2} dy$, 于是原式可化为

$$I = \int_0^1 (3x^2 - 1)\varphi(x) dx = \int_0^1 \varphi(x) d(x^3 - x) = (x^3 - x)\varphi(x) \Big|_{x=0}^{x=1} - \int_0^1 (x^3 - x)(3x^2 - 1)e^{(x-x^3)^2} dx \\ = -\frac{1}{2} \int_0^1 e^{(x-x^3)^2} d(x-x^3)^2 = -\frac{1}{2} e^{(x-x^3)^2} \Big|_{x=0}^{x=1} = 0.$$

例 6.1.14. 计算二重积分 $\int_0^1 dx \int_{x^2}^1 x^3 \sin y^3 dy$.

令 $\varphi(x) = \int_{x^2}^1 \sin y^3 dy$, 于是原式可化为

$$I = \int_0^1 x^3 \varphi(x) dx = \frac{1}{4} \int_0^1 \varphi(x) dx^4 = \frac{1}{4} x^3 \varphi(x) \Big|_{x=0}^{x=1} - \frac{1}{4} \int_0^1 x^4 \cdot (-2x \sin x^6) dx \\ = \frac{1}{2} \int_0^1 x^5 \sin x^6 dx = \frac{1}{12} \int_0^1 \sin x^6 dx^6 = \frac{-\cos x^6}{12} \Big|_{x=0}^{x=1} = \frac{1 - \cos 1}{12}.$$

交换积分顺序

例 6.1.15 (2004 数一). 设 $f(x)$ 为连续函数, $F(t) = \int_0^t dy \int_y^t f(x) dx$, 则 $F'(2)$ 等于

- A. $2f(2)$. B. $f(2)$. C. $-f(2)$. D. 0.

交换积分次序, $F(t) = \int_1^t dx \int_1^x f(x) dy = \int_1^t (x-1)f(x) dx$, 于是 $F'(2) = (2-1)f(2) = f(2)$, 故选 B.

例 6.1.16. 计算 $I = \int_0^1 dx \int_0^x dy \int_0^y \frac{\sin z}{1-z} dz$.

逐次交换积分顺序, 得

$$I = \int_0^1 dx \int_0^x dz \int_z^x \frac{\sin z}{1-z} dy = \int_0^1 dz \int_z^1 dx \int_z^x \frac{\sin z}{1-z} dy = \int_0^1 \frac{\sin z}{1-z} \frac{(1-z)^2}{2} dz = \frac{1-\sin 1}{2}.$$

例 6.1.17. 计算 $I = \int_0^1 dx \int_x^1 dy \int_y^1 y \sqrt{1+z^4} dz$.

逐次交换积分顺序, 得

$$\begin{aligned} I &= \int_0^1 dx \int_x^1 dz \int_x^z y \sqrt{1+z^4} dy = \int_0^1 dz \int_0^z dx \int_x^z y \sqrt{1+z^4} dy = \int_0^1 dz \int_0^z \frac{z^2-x^2}{2} \sqrt{1+z^4} dx \\ &= \frac{1}{3} \int_0^1 z^3 \sqrt{1+z^4} dz = \frac{1}{12} \int_0^1 \sqrt{1+z^4} d(1+z^4) = \left. \frac{(1+z^4)^{\frac{3}{2}}}{18} \right|_0^1 = \frac{2\sqrt{2}-1}{18}. \end{aligned}$$

例 6.1.18. 计算 $I = \int_0^1 dx \int_0^{1-x} dz \int_0^{1-x-z} (1-y)e^{-(1-y-z)^2} dy$.

逐次交换积分顺序, 得

$$\begin{aligned} I &= \int_0^1 dz \int_0^{1-z} dx \int_0^{1-x-z} (1-y)e^{-(1-y-z)^2} dy = \int_0^1 dz \int_0^{1-z} dy \int_0^{1-y-z} (1-y)e^{-(1-y-z)^2} dx \\ &= \int_0^1 dz \int_0^{1-z} (1-y-z)(1-y)e^{-(1-y-z)^2} dy = \int_0^1 dy \int_0^{1-y} (1-y-z)(1-y)e^{-(1-y-z)^2} dz \\ &= \int_0^1 \frac{1-y}{2} e^{-(1-y-z)^2} \Big|_0^{1-y} dy = \frac{1}{4e}. \end{aligned}$$

例 6.1.19. 求极限 $I = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^{\sqrt{t}} dx \int_{x^2}^t \sin y^2 dy}{\left(e^{-\frac{2}{\pi} t^2} - 1\right) \arctan t^{\frac{3}{2}}}.$

$$\int_0^{\sqrt{t}} dx \int_{x^2}^t \sin y^2 dy = \int_0^t \sin y^2 dy \int_0^{\sqrt{y}} dx = \int_0^t \sqrt{y} \sin y^2 dy, I = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^t \sqrt{y} \sin y^2 dy}{-\frac{2}{\pi} t^{\frac{7}{2}}} \stackrel{L'H}{=} -\frac{\pi}{7}.$$

例 6.1.20. 计算 $\int_0^1 dx \int_0^x \sqrt{1+y^2} dy + 3 \int_0^1 dy \int_1^{\sqrt{2-y^2}} \sqrt{x^2+y^2} dx$.

对前部分交换积分次序, 后部分采用极坐标换元,

$$\begin{aligned} \int_0^1 dx \int_0^x \sqrt{1+y^2} dy &= \int_0^1 dy \int_y^1 \sqrt{1+y^2} dx = \int_0^1 \sqrt{1+y^2} dy - \frac{1}{3}(2\sqrt{2}-1) \\ 3 \int_0^1 dy \int_1^{\sqrt{2-y^2}} \sqrt{x^2+y^2} dx &= 3 \int_0^{\frac{\pi}{4}} d\theta \int_{\sec \theta}^{\sqrt{2}} \rho^2 d\rho = \frac{\sqrt{2}\pi}{2} - \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sec^3 \theta d\theta \\ &= \frac{\sqrt{2}\pi}{2} - \int_0^{\frac{\pi}{4}} \sqrt{1+\sec^2 \theta} d\theta \tan \theta = \frac{\sqrt{2}\pi}{2} - \int_0^1 \sqrt{1+t^2} dt \end{aligned}$$

两式相加得 $\frac{\sqrt{2}\pi}{2} - \frac{1}{3}(2\sqrt{2}-1)$.

例 6.1.21. 计算 $\int_0^1 dy \int_0^1 \sqrt{e^{2x}-y^2} dx + \int_1^e dy \int_{\ln y}^1 \sqrt{e^{2x}-y^2} dx$.

交换积分次序先 x 后 y 有,

$$I = \int_0^1 dx \int_0^{e^x} \sqrt{e^{2x}-y^2} dy = \int_0^1 e^{2x} dx \int_0^{e^x} \sqrt{1-\left(\frac{y}{e^x}\right)^2} d\left(\frac{y}{e^x}\right)$$

其中 $\int_0^{e^x} \sqrt{1-\left(\frac{y}{e^x}\right)^2} d\left(\frac{y}{e^x}\right) \stackrel{\frac{y}{e^x}=\sin t}{=} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 t dt = \frac{\pi}{4}, \int_0^1 e^{2x} dx = \left. \frac{1}{2} e^{2x} \right|_0^1 = \frac{e^2-1}{2}$,

综上, 原式等于 $\frac{\pi-1}{2}(e^2-1)$.

圆代换与球代换

例 6.1.22 (2011 数二). 设平面区域 D 由直线 $y = x$, 圆 $x^2 + y^2 = 2y$ 及 y 轴所围成, 计算 $\iint_D xy \mathrm{d}\sigma$.

圆的极坐标为 $r = 2 \sin \theta$, 于是

$$I = \iint_D xy \mathrm{d}\sigma = \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} \mathrm{d}\theta \int_0^{2 \sin \theta} r^2 \cos \theta \sin \theta r \mathrm{d}r = 4 \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} \sin^5 \theta \mathrm{d}\sin \theta = \frac{7}{12}.$$

例 6.1.23 (2015 数一). 设 D 是第一象限中由曲线 $2xy = 1, 4xy = 1$ 与直线 $y = x, y = \sqrt{3}x$ 围成的平面区域, 函数 $f(x, y)$ 在 D 上连续, 则 $\iint_D f(x, y) \mathrm{d}x \mathrm{d}y$.

A. $\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{3}} \mathrm{d}\theta \int_{\frac{1}{2 \sin 2\theta}}^{\frac{1}{\sin 2\theta}} f(r \cos \theta, r \sin \theta) r \mathrm{d}r$

B. $\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{3}} \mathrm{d}\theta \int_{\frac{1}{\sqrt{2 \sin 2\theta}}}^{\frac{1}{\sqrt{\sin 2\theta}}} f(r \cos \theta, r \sin \theta) r \mathrm{d}r$

C. $\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{3}} \mathrm{d}\theta \int_{\frac{1}{2 \sin 2\theta}}^{\frac{1}{\sin 2\theta}} f(r \cos \theta, r \sin \theta) \mathrm{d}r$

D. $\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{3}} \mathrm{d}\theta \int_{\frac{1}{\sqrt{2 \sin 2\theta}}}^{\frac{1}{\sqrt{\sin 2\theta}}} f(r \cos \theta, r \sin \theta) \mathrm{d}r$

积分区域可用极坐标表示为 $D = \left\{ (r, \theta) \mid \frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}, \frac{1}{\sqrt{2 \sin 2\theta}} \leq r \leq \frac{1}{\sqrt{\sin 2\theta}} \right\}$, 于是有

$$\iint_D f(x, y) \mathrm{d}x \mathrm{d}y = \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{3}} \mathrm{d}\theta \int_{\frac{1}{\sqrt{2 \sin 2\theta}}}^{\frac{1}{\sqrt{\sin 2\theta}}} f(r \cos \theta, r \sin \theta) r \mathrm{d}r.$$

故选 B.

例 6.1.24. 设函数 $f(u)$ 连续, 区域 $D = \{(x, y) \mid x^2 + y^2 \leq 2y\}$, 则 $\iint_D f(xy) \mathrm{d}x \mathrm{d}y$.

A. $\int_{-1}^1 \mathrm{d}x \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} f(xy) \mathrm{d}y$

B. $2 \int_0^2 \mathrm{d}y \int_0^{\sqrt{2y-y^2}} f(xy) \mathrm{d}x$

C. $\int_0^\pi \mathrm{d}\theta \int_0^{2 \sin \theta} f(r^2 \sin \theta \cos \theta) \mathrm{d}r$

D. $\int_0^\pi \mathrm{d}\theta \int_0^{2 \sin \theta} f(r^2 \sin \theta \cos \theta) r \mathrm{d}r$

在直角坐标系下

$$\iint_D f(xy) \mathrm{d}x \mathrm{d}y = \int_0^2 \mathrm{d}y \int_{-\sqrt{1-(y-1)^2}}^{\sqrt{1-(y-1)^2}} f(xy) \mathrm{d}x = \int_{-1}^1 \mathrm{d}x \int_{1-\sqrt{1-x^2}}^{1+\sqrt{1-x^2}} f(xy) \mathrm{d}y$$

故排除 A、B, 在极坐标下

$$\iint_D f(xy) \mathrm{d}x \mathrm{d}y = \int_0^\pi \mathrm{d}\theta \int_0^{2 \sin \theta} f(r^2 \sin \theta \cos \theta) r \mathrm{d}r$$

故选 D.

例 6.1.25. 计算三重积分 $I = \iiint_{\Omega} z \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z$, 其中 Ω 是两个球面 $x^2 + y^2 + z^2 = 2z$ 和 $x^2 + y^2 + z^2 = z$ 围成的区域.

由球坐标变化, $\begin{cases} x = r \sin \varphi \cos \theta \\ y = r \sin \varphi \sin \theta \\ z = r \cos \varphi \end{cases}$, 则 $\Omega' = \left\{ 0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, \cos \varphi \leq r \leq 2 \cos \varphi \right\}$, 则

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{2\pi} \mathrm{d}\theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \mathrm{d}\varphi \int_{\cos \varphi}^{2 \cos \varphi} r \cos \varphi \cdot r^2 \sin \varphi \mathrm{d}r = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi \cos \varphi \mathrm{d}\varphi \int_{\cos \varphi}^{2 \cos \varphi} r^3 \mathrm{d}r \\ &= \frac{15\pi}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi \cos^5 \varphi \mathrm{d}\varphi = \frac{5\pi}{4}. \end{aligned}$$

例 6.1.26. 设积分区域 $\Omega_t : x^2 + y^2 + z^2 \leq 2tz, f(0) = 0, f'(0) = 15$, 求极限

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{1}{t^5} \iiint_{\Omega_t} f(x^2 + y^2 + z^2) dV.$$

法一：由三重积分的球坐标计算方法，积分区域可用球坐标变量表示为

$$0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq r \leq 2t \cos \varphi$$

故三重积分表示为 $g(t) = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi d\varphi \int_0^{2t \cos \varphi} f(r^2) r^2 dr$, 设 $F'(r) = f(r^2) r^2$, 则

$$\begin{aligned} g(t) &= 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} [F(2t \cos \varphi) - F(0)] \sin \varphi d\varphi = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} F(2t \cos \varphi) \sin \varphi d\varphi - 2\pi F(0) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi d\varphi \\ &= -2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} F(2t \cos \varphi) d\cos \varphi - 2\pi F(0) = \frac{\pi}{t} \int_0^{2t} F(u) du - 2\pi F(0) \end{aligned}$$

故

$$\begin{aligned} I &= \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{1}{t^5} \iiint_{\Omega_t} f(x^2 + y^2 + z^2) dV = \pi \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^{2t} F(u) du - 2tF(0)}{t^6} \stackrel{L'H}{=} \pi \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{2F(2t) - 2F(0)}{6t^5} \\ &= \frac{\pi}{3} \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{F(2t) - F(0)}{t^5} \stackrel{L'H}{=} \frac{\pi}{3} \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{2F'(2t)}{5t^4} = \frac{2\pi}{15} \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{4t^2 f(4t^2)}{t^4} = \frac{32\pi}{15} f'(0) = 32\pi. \end{aligned}$$

法二：有题意可假设 $f(x) = 15x + o(x)$, 并令 $g(t) = \iiint_{\Omega_t} f(x^2 + y^2 + z^2) dV$, 于是

$$\begin{aligned} g(t) &= \iiint_{\Omega_t} [15(x^2 + y^2 + z^2) + o(x^2 + y^2 + z^2)] dV = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_0^{2t \cos \varphi} [15r^2 + o(r^2)] r^2 \sin \varphi dr \\ &= 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi [3r^5 + o(r^5)] \Big|_0^{2t \cos \varphi} d\varphi = -6\pi \cdot 32t^5 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^5 \varphi d\varphi + o(t^5) = 32\pi t^5 + o(t^5) \end{aligned}$$

所以 $\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{g(t)}{t^5} = 32\pi$.

例 6.1.27. 设 $f(x)$ 是 $(0, +\infty)$ 上连续可导的函数, $f(x) \neq 0$ 且 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{xf'(x)}{f(x)} = c > 0$, 记

$$F(t) = \iiint_{x^2+y^2+z^2 \leq t^2} f(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) dV, \quad G(t) = \iint_{x^2+y^2 \leq t^2} f(\sqrt{x^2 + y^2}) d\sigma$$

求函数 $h(t)$, 使得 $\lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{F(t)}{h(t)G(t)} = 1$.

由三重积分的球坐标计算公式和二重积分的极坐标计算公式, 得

$$\begin{aligned} F(t) &= \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\pi \sin \varphi d\varphi \int_0^t f(r) r^2 dr = 4\pi \int_0^t f(r) r^2 dr \\ G(t) &= \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^t f(r) r dr = 2\pi \int_0^t f(r) r^2 dr \end{aligned}$$

由 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{xf'(x)}{f(x)} = c > 0$ 知, $\exists X_0 > 0$, 当 $x > X_0$ 时, $f(x)$ 与 $f'(x)$ 同号, 故 $f(x) > 0$ 时, $f(x)$ 单调递增, 则

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} F(t) = +\infty, \quad \lim_{t \rightarrow +\infty} G(t) = +\infty, \quad \int_{X_0}^{+\infty} f(t) dt = +\infty$$

那么

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{F(t)}{tG(t)} = \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{\frac{4\pi}{2\pi t} \int_0^t f(r) r^2 dr}{\int_0^t f(t) t dt} = 2 \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^t f(r) r^2 dr}{t \int_0^t f(t) t dt} \stackrel{L'H}{=} 2 \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^t f(t) t^2}{\int_0^t f(t) t dt + f(t) t^2}$$

$$\stackrel{L'}{=} 2 \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{2tf(t) + t^2f'(t)}{3tf(t) + t^2f'(t)} = 2 \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{\frac{2f(t)}{t} + f'(t)}{3 + \frac{tf'(t)}{f(t)}} = \frac{2(2+c)}{3+c}$$

故 $\lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{F(t)}{\frac{2(2+c)}{3+c}tG(t)} = 1$, 所以取 $h(t) = \frac{2(2+c)}{3+c}t$ 即为所求函数.

Jacobian 行列式

例 6.1.28. 设 D 是 $y = \sqrt{x}$, $x = \sqrt{y}$ 和 $x^2 + y^2 - x - y + \frac{1}{4} = 0$, $\left(x, y \in \left[0, \frac{1}{2}\right]\right)$ 围成的封闭区域, 求积分

$$\iint_D (x - y^2)(y - x^2)(1 - 4xy) dx dy.$$

令 $u = x - y^2$, $v = y - x^2$, 那么 $D' = \left\{(u, v) | u, v \geq 0, u + v \leq \frac{1}{4}\right\}$

$$|J| = \left| \begin{matrix} \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} \end{matrix} \right| = \frac{1}{\left| \begin{matrix} \frac{\partial(u, v)}{\partial(x, y)} \end{matrix} \right|} = \frac{1}{|1 - 4xy|}$$

$$\text{原式} = \iint_{D'} uv du dv = \int_0^{\frac{1}{4}} du \int_0^{\frac{1}{4}-u} uv dv = \int_0^{\frac{1}{4}} \left(\frac{1}{2}u^3 - \frac{1}{4}u^2 + \frac{1}{32}u \right) du = \frac{1}{6144}.$$

例 6.1.29. 设 $z = z(x, y)$ 是由 $\varphi(y - bz) = x - az$ 确定的隐函数, 其中 φ 是连续可微函数, 且 $a - b\varphi'(y - bz) \neq 0$, 求二重积分

$$I = \iiint_D (az'_x + bz'_y) e^{\frac{x-y}{x+y}} dx dy$$

其中 D 是由 $x = 0$, $y = 0$, $x + y = 1$ 所围成的区域.

令 $F(x, y, z) = x - az - \varphi(y - bz)$, 那么

$$F'_x = 1, F'_y = -\varphi'(y - bz), F'_z = -a + b\varphi'(y - bz)$$

当 $a - b\varphi'(y - bz) \neq 0$ 时, 由隐函数求导公式, 得

$$z'_x = -\frac{F'_x}{F'_z} = \frac{1}{a - b\varphi'(y - bz)}, z'_y = -\frac{F'_y}{F'_z} = -\frac{\varphi'(y - bz)}{a - b\varphi'(y - bz)}$$

于是 $az'_x + bz'_y = 1$, 代入被积函数表达式, 得 $I = \iint_D e^{\frac{x-y}{x+y}} dx dy$ 令 $u = x - y$, $v = x + y$, $J = \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = \frac{1}{2}$, 且变换后的积分区域为 $D_{uv} = \{(u, v) : -v \leq u \leq v, 0 \leq v \leq 1\}$, 所以二重积分化为

$$I = \iint_{D_{uv}} e^{\frac{u}{v}} \frac{1}{2} du dv = \frac{1}{2} \int_0^1 dv \int_{-v}^v e^{\frac{u}{v}} du = \frac{e - e^{-1}}{4}.$$

例 6.1.30 (2007 湖南大学). 计算积分

$$I = \iint_D \frac{(x+y)[\ln(x+y) - \ln y]}{\sqrt{2-x-y}} dx dy$$

其中区域 D 为 $x = 0, x + y = 1, y = x$ 所围成的三角形区域.

原式改写为 $I = \iint_D \frac{(x+y) \ln \left(1 + \frac{x}{y}\right)}{\sqrt{2-(x+y)}} dx dy$, 则令 $u = x+y, v = \frac{x}{y}$, 那么 $\begin{cases} x = \frac{uv}{1+v} \\ y = \frac{u}{1+v} \end{cases}$, 并且

$$J = \frac{\partial(x,y)}{\partial(u,v)} = \begin{vmatrix} \frac{v}{1+v} & \frac{u}{(1+v)^2} \\ \frac{1}{1+v} & \frac{-u}{(1+v)^2} \end{vmatrix} = -\frac{u}{(1+v)^2}$$

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \iint_{D_{uv}} \frac{u \ln(1+v)}{\sqrt{2-u}} |J| du dv = \iint_{D_{uv}} \frac{u \ln(1+v)}{\sqrt{2-u}} \cdot \frac{u}{(1+v)^2} du dv \\ &= \int_0^1 \frac{u^2}{\sqrt{2-u}} du \cdot \int_0^1 \frac{\ln(1+v)}{(1+v)^2} dv = \frac{2}{15} (32\sqrt{2}-43) \cdot \frac{1}{2} (1-\ln 2) = \frac{32\sqrt{2}-43}{15} (1-\ln 2). \end{aligned}$$

例 6.1.31. 设 Ω 是由曲面 $z = y^2, z = 4y^2$ ($y > 0$), 平面 $z = x, z = 2x$ 及 $z = 2$ 所围区域, 求积分

$$\iiint_{\Omega} \frac{z\sqrt{z}}{y^3} \cos \frac{z}{y^2} dx dy dz.$$

令 $u = \frac{z}{y^2}, v = \frac{z}{x}, z = z$, 即 $x = \frac{z}{v}, y = \sqrt{\frac{z}{u}}, z = z$, $\Omega' : 0 \leq z \leq 2, 1 \leq v \leq 2, 1 \leq u \leq 4$.

$$J = \frac{\partial(x,y,z)}{\partial(u,v,z)} = \begin{vmatrix} 0 & -\frac{z}{v^2} & \frac{1}{v} \\ -\frac{1}{2}\sqrt{\frac{z}{u^3}} & 0 & \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{uz}} \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = -\frac{z}{2v^2} \left(\frac{z}{u}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} \frac{z\sqrt{z}}{y^3} \cos \frac{z}{y^2} dx dy dz &= \iiint_{\Omega'} u^{\frac{3}{2}} \cos u |J| du dv dz = \iiint_{\Omega'} u^{\frac{3}{2}} \cos u \cdot \frac{z}{2v^2} \left(\frac{z}{u}\right)^{\frac{3}{2}} du dv dz \\ &= \frac{1}{2} \int_1^4 \cos u du \int_1^2 \frac{1}{v^2} dv \int_0^2 z^{\frac{5}{2}} dz = \frac{4\sqrt{2}}{7} (\sin 4 - \sin 1). \end{aligned}$$

例 6.1.32. 设 $x = x(u, v)$, $y = y(u, v)$ 有连续偏导数, 一一对应地将区域 D' 映射到 xOy 平面的区域 D , 满足 $J \neq 0$, 且

$$\frac{\partial x}{\partial u} = \frac{\partial y}{\partial v}, \quad \frac{\partial x}{\partial v} = -\frac{\partial y}{\partial u}$$

$$\text{证明: } \iint_D \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy = \iint_{D'} \left[\left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)^2 \right] du dv.$$

证 由已知得

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)^2 &= \left(\frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial u} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial y}{\partial v} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 \\ \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)^2 &= \left(\frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial v} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial v} \right)^2 = \left(-\frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial y}{\partial u} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial v} \right)^2 \end{aligned}$$

两式相加

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)^2 &= \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial y}{\partial v} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial v} \right)^2 \right] \\ &= \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial v} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

另外

$$J = \frac{\partial(x,y)}{\partial(u,v)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix} = \frac{\partial x}{\partial u} \cdot \frac{\partial y}{\partial v} - \frac{\partial x}{\partial v} \cdot \frac{\partial y}{\partial u} = \left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial v} \right)^2$$

从而

$$dudv = |J^{-1}| dxdy = \frac{dxdy}{\left(\frac{\partial y}{\partial u}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial v}\right)^2}$$

综上所述, 得证 $\iint_D \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right] dxdy = \iint_{D'} \left[\left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)^2 \right] du dv.$

四重积分换元

例 6.1.33. 求 $\iiint_V \sqrt{\frac{1-x^2-y^2-z^2-u^2}{1+x^2+y^2+z^2+u^2}} dxdydzdu$, 其中 V 为 $x, y, z, u \geq 0$, $x^2+y^2+z^2+u^2 \leq 1$.

法一: 用球坐标

$$x = r \cos \psi, \quad y = r \sin \psi \cos \varphi, \quad z = r \sin \psi \sin \varphi \cos \theta, \quad u = r \sin \psi \sin \varphi \sin \theta$$

此时

$$\begin{aligned} J &= \frac{\partial(x, y, z, u)}{\partial(r, \psi, \varphi, \theta)} = r^3 \sin^2 \phi \sin \varphi, \quad x^2 + y^2 + z^2 + u^2 = r^2 \\ V &= \left\{ (r, \phi, \varphi, \theta) \mid 0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq r \leq 1 \right\} \end{aligned}$$

故原积分

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \psi d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \psi d\psi \int_0^1 \sqrt{\frac{1-r^2}{1+r^2}} r^3 dr = \frac{\pi^2}{16} \int_0^1 \sqrt{\frac{1-r^2}{1+r^2}} r^2 dr^2 \\ &\stackrel{r^2=\sin t}{=} \frac{\pi^2}{16} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin t - \sin^2 t) dt = \frac{\pi^2}{16} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right). \end{aligned}$$

法二: 用双极坐标

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta, \quad z = \rho \cos \varphi, \quad u = \rho \sin \varphi$$

此时

$$\begin{aligned} J &= \frac{\partial(x, y, z, u)}{\partial(r, \theta, \rho, \varphi)} = r\rho, \quad x^2 + y^2 + z^2 + u^2 = r^2 + \rho^2 \\ V &= \left\{ (r, \theta, \rho, \varphi) \mid 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, r \geq 0, \rho \geq 0, r^2 + \rho^2 \leq 1 \right\} \end{aligned}$$

故原积分

$$I = \iiint_V \sqrt{\frac{1-r^2-\rho^2}{1+r^2+\rho^2}} r\rho dr d\rho d\theta d\varphi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \iint_{\substack{r^2+\rho^2 \leq 1 \\ r, \rho \geq 0}} \sqrt{\frac{1-r^2-\rho^2}{1+r^2+\rho^2}} r\rho dr d\rho = \frac{\pi^2}{16} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right).$$

分区积分及对称性的应用

定理 6.1.1 (重积分的对称性). (1) 二重积分情形:

(i) 若积分区域 D 关于 x 轴对称, 而 D_1 是 D 中对应于 $y \geq 0$ 的部分, 则

$$\iint_D f(x, y) dxdy = \begin{cases} 2 \iint_{D_1} f(x, y) dxdy, & f(x, -y) = f(x, y), \\ 0, & f(x, -y) = -f(x, y). \end{cases}$$

(ii) 若积分区域 D 关于 y 轴对称, 而 D_1 是 D 中对应于 $x \geq 0$ 的部分, 则

$$\iint_D f(x, y) dxdy = \begin{cases} 2 \iint_{D_1} f(x, y) dxdy, & f(-x, y) = f(x, y), \\ 0, & f(-x, y) = -f(x, y). \end{cases}$$

(iii) 若积分区域 D 关于 x 轴和 y 轴均对称, 而 D_1 是 D 中对应于 $x \geq 0, y \geq 0$ 的部分, 则

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \begin{cases} 4 \iint_{D_1} f(x, y) dx dy, & f(-x, y) = f(x, -y) = f(x, y), \\ 0, & f(-x, y) \text{ 或 } f(x, -y) = -f(x, y). \end{cases}$$

(2) 三重积分情形:

(i) 若积分区域 Ω 关于 xOy 平面对称, 而 Ω_1 是 Ω 中对应于 $z \geq 0$ 的部分, 则

$$\iiint_{\Omega} f(x, y, z) dv = \begin{cases} 2 \iiint_{\Omega_1} f(x, y, z) dv, & f \text{ 关于 } z \text{ 为偶函数}, \\ 0, & f \text{ 关于 } z \text{ 为奇函数}. \end{cases}$$

如果积分区域 Ω 关于 xOz 或 yOz 平面对称, 那么也有类似的结果.

(ii) 若积分区域 Ω 关于 xOy 平面和 xOz 平面均对称, 而 Ω_1 是 Ω 中对应于 $z \geq 0, y \geq 0$ 的部分, 则

$$\iiint_{\Omega} f(x, y, z) dv = \begin{cases} 4 \iiint_{\Omega_1} f(x, y, z) dv, & f \text{ 关于 } y, z \text{ 均为偶函数}, \\ 0, & f \text{ 关于 } y \text{ 或 } z \text{ 为奇函数}. \end{cases}$$

如果积分区域 Ω 关于 xOz 平面和 yOz 平面均对称, 或者关于 xOy 平面和 yOz 平面均对称, 那么也有类似的结果.

(iii) 如果积分区域 Ω 关于 3 个坐标平面均对称, 而 Ω_1 是 Ω 中位于第一卦限的部分, 则

$$\iiint_{\Omega} f(x, y, z) dv = \begin{cases} 8 \iiint_{\Omega_1} f(x, y, z) dv, & f \text{ 关于 } x, y, z \text{ 均为偶函数}, \\ 0, & f \text{ 关于 } x \text{ 或 } y \text{ 或 } z \text{ 为奇函数}. \end{cases}$$

例 6.1.34. 计算积分.

(1) $\iint_{[0,1] \times [0,1]} \left xy - \frac{1}{4} \right dx dy.$	(2) $\iint_{x^2+y^2 \leqslant 5} \operatorname{sgn}(x^2 - y^2 + 3) dx dy.$
(3) $\iint_{ x \leqslant 1, 0 \leqslant y \leqslant 2} \sqrt{ y - x^2 } dx dy.$	(4) $\iint_{0 \leqslant x, y \leqslant 2} [x + y] dx dy$ ([·] 表示不大于 · 最大整数).
(5) $\iint_{x^2+y^2 \leqslant a^2} \frac{ xy (1 + e^{x^2})}{2 + e^{x^2} + e^{y^2}} dx dy.$	(6) (2024 数一) $\iint_{\substack{\sqrt{1-y^2} \leqslant x \leqslant 1 \\ -1 \leqslant y \leqslant 1}} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx dy.$

(1) $\left| xy - \frac{1}{4} \right| = \begin{cases} \frac{1}{4} - xy, & (x, y) \text{ 在双曲线 } xy = \frac{1}{4} \text{ 之下} \\ xy - \frac{1}{4}, & (x, y) \text{ 在双曲线 } xy = \frac{1}{4} \text{ 之上} \end{cases}$, 如图 (a) 所示, 将积分区域划分为三个区域, 于是

$$I = \iint_{D_2 \cup D_3} \left(\frac{1}{4} - xy \right) dx dy + \iint_{D_1} \left(xy - \frac{1}{4} \right) dx dy$$

$$\begin{aligned}
&= \int_0^{\frac{1}{4}} dx \int_0^1 \left(\frac{1}{4} - xy \right) dy + \int_{\frac{1}{4}}^1 dx \int_0^{\frac{1}{4x}} \left(\frac{1}{4} - xy \right) dy + \int_{\frac{1}{4}}^1 dx \int_{\frac{1}{4x}}^1 \left(xy - \frac{1}{4} \right) dy \\
&= \frac{3}{64} + \frac{\ln 2}{16} + \frac{1}{16} \left(\frac{3}{4} + \ln 2 \right) = \frac{1}{8} \left(\frac{3}{4} + \ln 2 \right).
\end{aligned}$$

(2) 被积函数 $\operatorname{sgn}(x^2 - y^2 + 3) = \begin{cases} 1, & x^2 - y^2 + 3 > 0 \\ 0, & x^2 - y^2 + 3 = 0 \\ -1, & x^2 - y^2 + 3 < 0 \end{cases}$, 如图 (b) 所示, 被积函数和积分区域都关于坐标轴对称, 因此只要计算第一象限的部分, 再乘 4 即为原积分值, 故

$$\begin{aligned}
\text{原式} &= 4 \iint_{\substack{x^2+y^2 \leqslant 5 \\ x,y \geqslant 0}} \operatorname{sgn}(x^2 - y^2 + 3) dxdy = 4 \int_0^1 dx \int_0^{\sqrt{x^2+3}} dy - 4 \int_0^1 dx \int_{\sqrt{x^2+5}}^{\sqrt{5-x^2}} dy + 4 \int_1^{\sqrt{5}} dx \int_0^{\sqrt{5-x^2}} dy \\
&= 8 \int_0^1 \sqrt{x^2+3} dx - 4 \int_0^1 \sqrt{5-x^2} dx + 4 \int_0^{\sqrt{5}} \sqrt{5-x^2} dx = 6 \ln 3 + 5\pi - 20 \arcsin \frac{1}{\sqrt{5}}.
\end{aligned}$$

(3) 如图 (c) 所示,

$$\begin{aligned}
I &= \iint_{|x| \leqslant 1, 0 \leqslant y \leqslant 2} \sqrt{|y-x^2|} dxdy = \iint_{|x| \leqslant 1, x^2 \leqslant y \leqslant 2} \sqrt{y-x^2} dxdy + \iint_{|x| \leqslant 1, 0 \leqslant y \leqslant x^2} \sqrt{x^2-y} dxdy \\
&= \int_{-1}^1 dx \int_{x^2}^2 \sqrt{y-x^2} dy + \int_{-1}^1 dx \int_0^{x^2} \sqrt{x^2-y} dy = \frac{\pi}{2} + \frac{5}{3}.
\end{aligned}$$

(4) 如图 (d) 所示, 原式 $= S_{ABCD} + 2S_{CDEF} + 3S_{\triangle EFG} + 3S_{\triangle CDG} = 6$.

(5) 积分区域关于 x, y 都对称, 且具有轮换对称性, 则有

$$\begin{aligned}
\text{原式} &= 4 \iint_{\substack{x^2+y^2 \leqslant a^2 \\ x,y \geqslant 0}} \frac{xy(1+e^{x^2})}{2+e^{x^2}+e^{y^2}} dxdy = 2 \iint_{\substack{x^2+y^2 \leqslant a^2 \\ x,y \geqslant 0}} \left[\frac{xy(1+e^{x^2})}{2+e^{x^2}+e^{y^2}} + \frac{yx(1+e^{y^2})}{2+e^{y^2}+e^{x^2}} \right] dxdy \\
&= 2 \iint_{\substack{x^2+y^2 \leqslant a^2 \\ x,y \geqslant 0}} xy dxdy = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \sin \theta d\theta \int_0^a \rho^3 d\rho = \frac{a^4}{4}.
\end{aligned}$$

(6) 积分区域关于 x 轴对称, 被积函数是 y 的偶函数, 那么

$$\begin{aligned}
\text{原式} &= 2 \iint_{\substack{\sqrt{1-y^2} \leqslant x \leqslant 1 \\ 0 \leqslant y \leqslant 1}} \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} dxdy = 2 \int_0^1 dy \int_{\sqrt{1-y^2}}^1 \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} dx = 2 \int_0^1 dy \int_{\sqrt{1-y^2}}^1 \frac{d(x^2+y^2)}{\sqrt{x^2+y^2}} \\
&= 2 \int_0^1 \sqrt{1+y^2} dy - 2 = y \sqrt{1+y^2} + \ln(y + \sqrt{1+y^2}) \Big|_0^1 - 2 = \sqrt{2} - 2 + \ln(1 + \sqrt{2}).
\end{aligned}$$

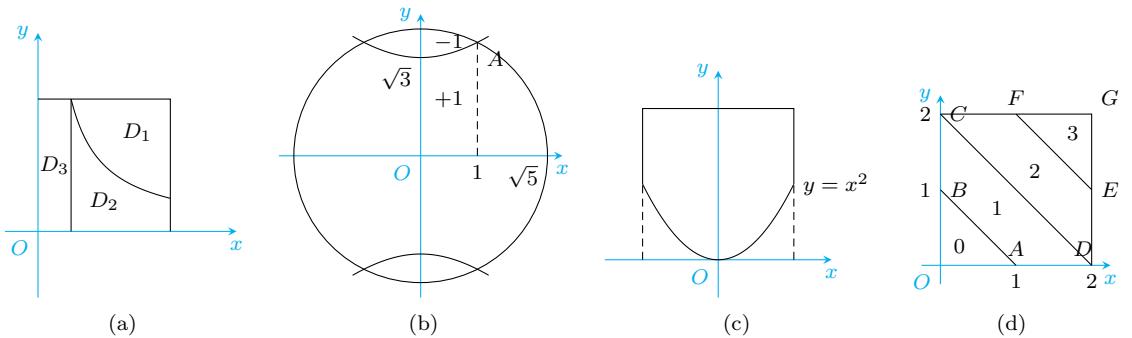


图 6.1.3

例 6.1.35. 设函数 $f(x)$ 满足

$$f(x) = x^2 + x \int_0^{x^2} f(x^2 - t) dt + \iint_D f(xy) dx dy$$

其中 D 是以 $(-1, -1), (1, -1), (1, 1)$ 为顶点的三角形, 且 $f(1) = 0$, 求 $\int_0^1 f(x) dx$.

令 $\iint_D f(xy) dx dy = A$, 那么 $f(x) = x^2 + x \int_0^{x^2} f(x^2 - t) dt + A$, 将 x 替换为 xy 得

$$f(xy) = x^2 y^2 + xy \int_0^{x^2 y^2} f(x^2 y^2 - t) dt + A \Rightarrow f(xy) = x^2 y^2 + xy \int_0^{x^2 y^2} f(u) du + A$$

对等式两边二重积分得

$$A = \iint_D x^2 y^2 dx dy + \iint_D \left[xy \int_0^{x^2 y^2} f(u) du \right] dx dy + A \iint_D dx dy$$

其中 $\iint_D x^2 y^2 dx dy = \int_{-1}^1 x^2 dx \int_{-1}^x y^2 dy = \frac{2}{9}$, $\iint_D dx dy = 2$, 作 $y = -x$, 将 D 划分为关于 x 轴对称的 D_1 和关于 y 轴对称

的 D_2 , 并令函数 $g(x, y) = \int_0^{x^2 y^2} f(u) du$, 关于 x 和 y 都是奇函数, 利用二重积分的对称性知

$$\iint_D g(x, y) dx dy = \iint_{D_1} g(x, y) dx dy + \iint_{D_2} g(x, y) dx dy = 0$$

故 $A = -\frac{2}{9}$, 又由已知条件 $f(0) = 1$, 那么

$$0 = 1 + \int_0^1 f(1-t) dt - \frac{2}{9} \Rightarrow \int_0^1 f(x) dx = -\frac{7}{9}.$$

例 6.1.36. 求积分 $I = \int_{-1}^1 dz \iint_{x^2+y^2 \leq 1-z^2} \frac{(\cos x + \sin y + \sqrt{3}z)^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^2 + 1} dx dy$.

记 $\Omega = \{(x, y, z) \mid x^2 + y^2 + z^2 \leq 1\}$, 由对称性得

$$\begin{aligned} I &= \iiint_{\Omega} \frac{(\cos x + \sin y + \sqrt{3}z)^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^2 + 1} dV = \iiint_{\Omega} \frac{(\cos x + \sin y)^2 + 3z^2 + 2\sqrt{3}z(\cos x + \sin y)}{(x^2 + y^2 + z^2)^2 + 1} dV \\ &= \iiint_{\Omega} \frac{(\cos x + \sin y)^2 + 3z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^2 + 1} dV = \iiint_{\Omega} \frac{(\cos x + \sin y)^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^2 + 1} dV + 3 \iiint_{\Omega} \frac{z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^2 + 1} dV \\ &= \iiint_{\Omega} \frac{\cos^2 x + \sin^2 y}{(x^2 + y^2 + z^2)^2 + 1} dV + 3 \iiint_{\Omega} \frac{z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^2 + 1} dV \\ &= \frac{1}{2} \iiint_{\Omega} \frac{\cos^2 x + \cos^2 y + \sin^2 x + \sin^2 y}{(x^2 + y^2 + z^2) + 1} dV + 3 \iiint_{\Omega} \frac{z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^2 + 1} dV \\ &= \iiint_{\Omega} \frac{dV}{(x^2 + y^2 + z^2)^2 + 1} + 3 \iiint_{\Omega} \frac{z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^2 + 1} dV \\ &= \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\pi \sin \varphi d\varphi \int_0^1 \frac{r^2}{r^4 + 1} dr + 3 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\pi \sin \varphi \cos^2 \varphi d\varphi \int_0^1 \frac{r^4}{r^4 + 1} dr \\ &= 4\pi \int_0^1 \frac{r^4 + r^2}{r^4 + 1} dr = 4\pi + \sqrt{2}\pi \ln(3 - 2\sqrt{2}) \end{aligned}$$

其中 $\int_0^1 \frac{r^4 + r^2}{r^4 + 1} dr = \int_0^1 \frac{r^4 + 1 + r^2 - 1}{r^4 + 1} dr = \int_0^1 dr + \int_0^1 \frac{r^2 - 1}{r^4 + 1} dr$,

$$\int \frac{r^2 - 1}{r^4 + 1} dr = \int \frac{1 - \frac{1}{r^2}}{\left(r + \frac{1}{r}\right)^2 - 2} dr \stackrel{r + \frac{1}{r} = t}{=} \int \frac{dt}{(t - \sqrt{2})(t + \sqrt{2})} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \ln \left| \frac{t - \sqrt{2}}{t + \sqrt{2}} \right| + C = \frac{1}{2\sqrt{2}} \ln \left| \frac{r + \frac{1}{r} - \sqrt{2}}{r + \frac{1}{r} + \sqrt{2}} \right| + C.$$

6.1.3 反常二重积分与含参变量积分

反常二重积分

定义 6.1.3 (反常二重积分). 若 $\iint_D f(x, y) d\sigma$ 为反常积分, 则取 D' , 使 $D' \subset D$ 并且 $\iint_{D'} f(x, y) d\sigma$ 为一般的二重积分, 则

$$\iint_D f(x, y) d\sigma = \lim_{D' \rightarrow D} \iint_{D'} f(x, y) d\sigma$$

事实上, 当反常二重积分可积时, 其计算方法与一般二重积分基本相同.

例 6.1.37. 计算二重积分 $I = \iint_{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \geq 1} e^{-\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}\right)} dx dy$.

令 $x = ar \cos \theta$, $y = br \sin \theta$, 那么 $dx dy = ab r dr d\theta$, 故

$$I = ab \iint_{\substack{0 \leq \theta \leq 2\pi \\ 1 \leq r \leq +\infty}} e^{-r^2} r dr d\theta = ab \int_0^{2\pi} d\theta \int_1^{+\infty} r e^{-r^2} dr = \frac{\pi ab}{e}.$$

例 6.1.38. 求不定积分 $\int_0^{+\infty} \frac{1 - e^{-ax}}{x} \cos x dx$, $a > 0$.

注意到

$$\int_a^b e^{-yx} \cos x dy = -\frac{\cos x}{x} \int_a^b e^{-yx} d(-yx) = -\frac{\cos x}{x} (e^{-yx}) \Big|_{y=a}^{y=b} = -\frac{e^{-bx} - e^{-ax}}{x} \cos x$$

所以 $\int_0^a e^{-yx} \cos x dy = \frac{1 - e^{-ax}}{x} \cos x$, 交换积分次序可知: 原式 $= \int_0^a dy \int_0^{+\infty} e^{-yx} \cos x dx$

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} e^{-yx} \cos x dx &= \int_0^{+\infty} e^{-yx} d(\sin x) = e^{-yx} \sin x \Big|_{x=0}^{x=+\infty} - \int_0^{+\infty} \sin x d(e^{-yx}) \\ &= -y \int_0^{+\infty} e^{-yx} \sin x dx = y \int_0^{+\infty} e^{-yx} d(\cos x) = y \left(e^{-yx} \cos x \Big|_{x=0}^{x=+\infty} + y \int_0^{+\infty} \cos x e^{-yx} dx \right) \\ &\Rightarrow \int_0^{+\infty} e^{-yx} \cos x dx = \frac{y}{1+y^2} \end{aligned}$$

故

$$\int_0^{+\infty} \frac{1 - e^{-ax}}{x} \cos x dx = \int_0^a \frac{y}{1+y^2} dy = \frac{1}{2} \ln(1+y^2) \Big|_0^a = \frac{1}{2} \ln(1+a^2).$$

例 6.1.39. 计算 $\int_0^{+\infty} \frac{\sin(5x) - \sin(3x)}{x} e^{-2x} dx$.

注意到 $\frac{\sin(5x) - \sin(3x)}{x} = \int_3^5 \cos(xy) dy$, 所以原式 $= \int_0^{+\infty} dx \int_3^5 e^{-2x} \cos(xy) dy$,

由于 $|e^{-2x} \cos(xy)| \leq e^{-2x}$, 且 $\int_0^{+\infty} e^{-2x} dx$ 收敛, 所以 $\int_3^5 \cos(xy) dy$ 关于 $y \in [3, 5]$ 一致收敛, 再结合 $e^{-2x} \cos(xy)$ 为 $[0, +\infty) \times [3, 5]$ 上的连续函数, 所以

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{+\infty} dx \int_3^5 e^{-2x} \cos(xy) dy = \int_3^5 dy \int_0^{+\infty} e^{-2x} \cos(xy) dx \\ &= \int_3^5 \frac{e^{-2x}}{4+y^2} [-2 \cos(xy) + y \sin(xy)]_0^{+\infty} dy = 2 \int_3^5 \frac{dy}{4+y^2} \\ &= \arctan \frac{y}{2} \Big|_3^5 = \arctan \frac{5}{2} - \arctan \frac{3}{2} = \arctan \frac{4}{19}. \end{aligned}$$

例 6.1.40. 计算 $I = \iint_D e^{-(x^2+y^2)} \cos(x^2+y^2) dx dy$, 其中 D 是全平面.

用极坐标, 化为先 θ 后 ρ 次序的二次积分,

$$I = \int_0^{+\infty} d\rho \int_0^{2\pi} \rho e^{-\rho^2} \cos \rho^2 d\theta = 2\pi \int_0^{+\infty} \rho e^{-\rho^2} \cos \rho^2 d\rho.$$

其中,

$$\begin{aligned} \int \rho e^{-\rho^2} \cos \rho^2 d\rho &= \int \frac{4\rho \cos \rho^2}{4e^{\rho^2}} d\rho = \int \frac{2\rho \cos \rho^2 + 2\rho \sin \rho^2 - 2\rho (\sin \rho^2 - \cos \rho^2)}{4e^{\rho^2}} d\rho \\ &= \int \frac{(2\rho \cos \rho^2 + 2\rho \sin \rho^2) 4e^{\rho^2} - 8\rho e^{\rho^2} (\sin \rho^2 - \cos \rho^2)}{16e^{\rho^2}} d\rho \\ &= \int d\left(\frac{\sin \rho^2 - \cos \rho^2}{4e^{\rho^2}}\right) = \frac{\sin \rho^2 - \cos \rho^2}{4e^{\rho^2}} + C \end{aligned}$$

$$\text{所以, } I = 2\pi \cdot \left. \frac{\sin \rho^2 - \cos \rho^2}{4e^{\rho^2}} \right|_0^{+\infty} = \frac{\pi}{2}.$$

例 6.1.41. 计算 $\iint_D \frac{x^2 + y^2 - 2}{(x^2 + y^2)^{\frac{5}{2}}} dx dy$, 其中 $D : x^2 + y^2 \geq 2, x \leq 1$.

注意到 D 关于 x 轴对称, 且被积函数关于 y 变量为偶函数, 记 x 轴上方部分积分区域为 D_1 , 令 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$, 则在极坐标下, D_1 可以描述为两部分, 如图 6.1.4 所示, 记作

$$D'_1 : \frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, \sqrt{2} \leq r \leq \sec \theta, D'_2 : \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi, \sqrt{2} \leq r \leq +\infty$$

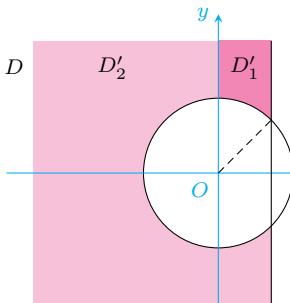


图 6.1.4

$$\begin{aligned} I &= 2 \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_{\sqrt{2}}^{\sec \theta} \frac{r^2 - 2}{r^5} r dr + 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} d\theta \int_{\sqrt{2}}^{+\infty} \frac{r^2 - 2}{r^5} r dr \\ &= 2 \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{2}{3r^3} - \frac{1}{r} \right)_{\sqrt{2}}^{\sec \theta} d\theta + 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \left(\frac{2}{3r^3} - \frac{1}{r} \right)_{\sqrt{2}}^{+\infty} d\theta \\ &= 2 \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{2 \cos^3 \theta}{3} - \cos \theta + \frac{\sqrt{2}}{3} \right) d\theta + 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \frac{\sqrt{2}}{3} d\theta \\ &= 2 \left[\frac{2}{3} \left(\sin \theta - \frac{\sin^3 \theta}{3} \right) - \sin \theta + \frac{\sqrt{2}}{3} \theta \right]_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} + 2 \cdot \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \\ &= 2 \cdot \left(\frac{\pi}{3\sqrt{2}} - \frac{5}{9} - \frac{\pi}{6\sqrt{2}} + \frac{2\sqrt{2}}{9} \right) + \frac{\sqrt{2}}{3}\pi = \frac{4\sqrt{2}}{9} - \frac{10}{9} + \frac{\sqrt{2}}{2}\pi \end{aligned}$$

例 6.1.42. 计算 $I = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \min\{x, y\} e^{-(x^2+y^2)} dx dy$.

由题意

$$\begin{aligned} I &= \int_{-\frac{3\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} d\theta \int_0^{+\infty} r \sin \theta e^{-r^2} r dr + \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} d\theta \int_0^{+\infty} r \cos \theta e^{-r^2} r dr = -2\sqrt{2} \int_0^{+\infty} r^2 e^{-r^2} dr \\ &= -\sqrt{2} \cdot 2 \int_0^{+\infty} r^2 e^{-r^2} dr = -\sqrt{2} \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = -\sqrt{2} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = -\frac{\sqrt{2}\pi}{2}. \end{aligned}$$

含参变量积分

含参变量积分是指在积分运算中, 被积函数中包含一个或多个参数的情况. 这种情况下, 参数被视
为常数, 而不是变量, 因此在积分时需要将参数视为常数处理.

定理 6.1.2 (含参变量积分求导公式). 设 $f(t, x), f_x(t, x)$ 在 $R = [a, b] \times [p, q]$ 上连续, $\alpha(x), \beta(x)$ 为定义在 $[a, b]$ 上其值含于 $[p, q]$ 内的可微函数, 则函数

$$F(t, x) = \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} f(t, x) dt$$

在 $[a, b]$ 上可微, 且

$$F'(t, x) = \frac{d}{dx} \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} f(t, x) dt = \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} f_x(t, x) dt + f[\beta(x), x]\beta'(x) - f[\alpha(x), x]\alpha'(x).$$

例 6.1.43. 已知 $F(x) = \int_{\sin x}^{\cos x} e^{(xt+x^2)} dt$, 求 $\frac{dF(x)}{dx} \Big|_{x=0}$.

法一: 由含参变量积分求导公式, 有

$$\begin{aligned} I &= \frac{d}{dx} \int_{\sin x}^{\cos x} e^{(xt+x^2)} dt = \left[\int_{\sin x}^{\cos x} (t+2x)e^{(xt+x^2)} dt - \sin x e^{(x \cos x + x^2)} - \cos x e^{(x \sin x + x^2)} \right]_{x=0} \\ &= \int_0^1 t dt - 1 = -\frac{1}{2} \end{aligned}$$

法二: 由题意,

$$F(x) = \int_{\sin x}^{\cos x} e^{(xt+x^2)} dt = e^{x^2} \int_{\sin x}^{\cos x} e^{xt} dt \stackrel{xt=u}{=} \frac{e^{x^2}}{x} \int_{x \sin x}^{x \cos x} e^u du = \frac{e^{x^2}}{x} (e^{x \cos x} - e^{x \sin x})$$

其中 $x \neq 0$, 且 $F(0) = 1$, 所以考虑导数定义式, 有

$$\frac{dF(x)}{dx} \Big|_{x=0} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{F(x) - F(0)}{x - 0} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{e^{x^2}}{x} (e^{x \cos x} - e^{x \sin x}) - 1}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^{x^2} (e^{x \cos x} - e^{x \sin x}) - x}{x^2}$$

由 $e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + o(x^2)$, $\cos x = 1 - \frac{x^2}{2} + o(x^2)$, $\sin x = x + o(x)$ 得

$$\begin{aligned} e^{x \cos x} &= 1 + x \cos x + \frac{1}{2}(x \cos x)^2 + o((x \cos x)^2) \\ &= 1 + x \left(1 - \frac{x^2}{2} + o(x^2)\right) + \frac{x^2}{2} \left(1 - \frac{x^2}{2} + o(x^2)\right)^2 + o(x^2) \\ &= 1 + x + \frac{x^2}{2} + o(x^2) \\ e^{x \sin x} &= 1 + x \sin x + (x \sin x)^2 + o((x \sin x)^2) = 1 + x^2 + o(x^2) \\ e^{x^2} &= 1 + x^2 + o(x^2) \end{aligned}$$

将上述展开式代入原极限式, 化简最终求得原极限等于 $-\frac{1}{2}$.

例 6.1.44. 设 $f(x)$ 为连续函数, $t > 0$, 区域 Ω 是由抛物面 $z = x^2 + y^2$ 和球面 $x^2 + y^2 + z^2 = t^2$ ($t > 0$) 所围成的部分, 定义三重积分 $F(t) = \iiint_{\Omega} f(x^2 + y^2 + z^2) dv$, 求 $F'(t)$.

利用柱坐标系, 令 $\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = z \end{cases}$, 则由 $\begin{cases} z = x^2 + y^2 \\ x^2 + y^2 + z^2 = t^2 \end{cases}$ 联立得 $z^2 = z + t^2$, 解得 $z = \frac{\sqrt{1+4t^2}-1}{2} := b^2(t)$, 于是区域 Ω 在 xOy 平面上的投影区域为 $D_{xy} : x^2 + y^2 \leq b^2(t)$, 从而

$$F(t) = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{b(t)} r dr \int_{r^2}^{\sqrt{t^2-r^2}} f(r^2 + z^2) dz = 2\pi \int_0^{b(t)} r \left[\int_{r^2}^{\sqrt{t^2-r^2}} f(r^2 + z^2) dz \right] dr$$

记 $g(t, r) = r \left[\int_{r^2}^{\sqrt{t^2 - r^2}} f(r^2 + z^2) dz \right]$, 则由 $f(x)$ 的连续知, $g(t, r)$ 及 $\frac{\partial g(t, r)}{\partial r}$ 连续, 于是由含参变量积分的求导公式, 得

$$\begin{aligned} F'(t) &= 2\pi \left[\int_0^{b(t)} \frac{\partial g}{\partial t} dr + g(t, b(t)) \cdot b'(t) \right] \\ &= 2\pi \left[\int_0^{b(t)} r f(t^2) \frac{t}{\sqrt{t^2 - r^2}} dr + b(t) \int_{b^2(t)}^{\sqrt{t^2 - b^2(t)}} f(b^2(t) + z^2) dz \cdot b'(t) \right] \\ &= 2\pi t f(t^2) \int_0^{b(t)} \frac{r}{\sqrt{t^2 - r^2}} dr = -\pi t f(t^2) \int_0^{b(t)} \frac{d(t^2 - r^2)}{\sqrt{t^2 - r^2}} \\ &= 2\pi t f(t^2) \left(t - \sqrt{t^2 - b^2(t)} \right) = 2\pi t f(t^2) (t - b^2(t)) = \pi t f(t^2) (2t + 1 - \sqrt{1 + 4t^2}). \end{aligned}$$

例 6.1.45. 求 $\frac{d^n}{dx^n} \left[\int_0^x e^{nt} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(x-t)^k}{k!} dt \right]$.

记 $f_k(x) = \int_0^x e^{nt} \frac{(x-t)^k}{k!} dt$, 那么 $\frac{d}{dx} f_k(x) = \int_0^x e^{nt} \frac{(x-t)^{k-1}}{(k-1)!} dt = f_{k-1}(x)$, 于是

$$f_k''(x) = f'_{k-1}(x) = f_{k-2}(x), \dots, f_k^{(k)}(x) = f_0(x)$$

由于 $f'_0(x) = \left(\int_0^x e^{nt} dt \right)' = e^{nx}$, $f''_0(x) = ne^{nx}$, \dots , $f_0^{(n)}(x) = n^{n-1} e^{nx}$, 所以

$$\frac{d^n}{dx^n} \left[\int_0^x e^{nt} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(x-t)^k}{k!} dt \right] = \sum_{k=0}^{n-1} f_k^{(n)}(x) = f_0^{(n)}(x) + \sum_{k=1}^{n-1} [f_k^{(k)}(x)]^{(n-k)} = \sum_{k=1}^n f_0^{(k)}(x) = \frac{1-n^n}{1-n} e^{nx}.$$

6.1.4 重积分的积分中值定理

定理 6.1.3 (二重积分中值定理). 若函数 $f(x, y)$ 在有界闭区域 D 上连续, 函数 $g(x, y)$ 在 D 上可积且不变号, 则 $\exists(\xi, \eta) \in D$, 使得

$$\iint_D f(x, y)g(x, y) dx dy = f(\xi, \eta) \iint_D g(x, y) dx dy.$$

例 6.1.46. 已知 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^x dv \int_{\ln(1+v)}^v \sin(u^2) du}{x^k} = c \neq 0$, 求 c .

错解. 记积分区域为 D , 则由二重积分中值定理知, $\exists(\xi, \eta) \in D$, 使得 $\iint_D \sin(u^2) du dv = \sin(\eta^2) \iint_D du dv$, 下求 D 的面积 S ,

记 $I_1 = \frac{1}{2}x^2$, $I_2 = \int_0^x \ln(1+t) dt$, 于是

$$I_2 = \int_0^x \ln(1+t) dt = x \ln(1+x) - x + \ln(1+x)$$

因此 $S = I_1 - I_2 = \frac{1}{2}x^2 - x \ln(1+x) + x - \ln(1+x)$, 故极限式化为

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^2 \left[\frac{1}{2}x^2 - x \ln(1+x) + x - \ln(1+x) \right]}{x^k} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^2 \left[\frac{1}{2}x^2 - x^2 + \frac{1}{2}x^3 + x - x + \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{3}x^3 + o(x^3) \right]}{x^k} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\frac{5}{6}x^5}{x^k}$$

因为 $c \neq 0$, 所以分子与分母等阶, 因此 $c = \frac{1}{6}$.

错因: 对二重积分中值定理内容了解不透彻, 该定理说的是: 若函数 $f(x, y)$ 在有界闭区域 D 上连续, 函数 $g(x, y)$ 在 D 上可积且不变号, 则存在一点 $(\xi, \eta) \in D$, 使得

$$\iint_D f(x, y)g(x, y) dx dy = f(\xi, \eta) \iint_D g(x, y) dx dy.$$

法一：先使用 L'Hospital 法则，将二重积分转化为定积分，再使用积分中值定理，有

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^x dv \int_{\ln(1+v)}^v \sin(u^2) du}{x^k} \stackrel{L'}{\longrightarrow} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_{\ln(1+x)}^x \sin(u^2) du}{kx^{k-1}} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\sin \xi^2 [x - \ln(1+x)]}{kx^{k-1}}$$

其中 $x \leftarrow \ln(1+x) < \xi < x$ ($x \rightarrow 0^+$)，因此原极限等于 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\frac{1}{2}x^4}{kx^{k-1}}$ ，因此 $k=5, c=\frac{1}{10}$.

法二：因为 $\sin(u^2)$ 在积分区间内不变号，因此 $\int_{\ln(1+v)}^v \sin(u^2) du \sim \int_{\ln(1+v)}^v u^2 du$ ，又因为 $\ln(1+v) \sim v$ ($v \rightarrow 0^+$)，因此原极限等价为

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^x dv \int_{\ln(1+v)}^v \sin(u^2) du}{x^k} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^x [v - \ln(1+v)] \xi_v^2 dv}{x^k} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^x \frac{1}{2}v^4 dv}{x^k} = c$$

因为 $c \neq 0$ ，因此分子与分母等阶，即 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{5}x^5}{x^k} = c \Rightarrow c = \frac{1}{10}$.

例 6.1.47. 设区域 D 为 $x^2 + y^2 \leq r^2$ ，求极限 $\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{\pi r^2} \iint_D e^{x^2 - y^2} \cos(x+y) dx dy$.

由二重积分的积分中值定理知， $\exists(\xi, \eta) \in D$ ，使得

$$\iint_D e^{x^2 - y^2} \cos(x+y) dx dy = \pi r^2 \cdot e^{\xi^2 - \eta^2} \cos(\xi + \eta)$$

于是， $\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{\pi r^2} \iint_D e^{x^2 - y^2} \cos(x+y) dx dy = \lim_{\xi, \eta \rightarrow 0} e^{\xi^2 - \eta^2} \cos(\xi + \eta) = 1$.

例 6.1.48 (2009 南京工业大学). 求极限 $\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{1}{t^2} \int_0^t dx \int_0^{t-x} e^{x^2 + y^2} dy$.

由二重积分的积分中值定理知， $\exists(\xi, \eta) \in \{(x, y) | 0 \leq x \leq t, 0 \leq y \leq t-x\}$ ，使得

$$\int_0^t dx \int_0^{t-x} e^{x^2 + y^2} dy = \frac{t^2}{2} e^{\xi^2 + \eta^2}$$

于是， $\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{1}{t^2} \int_0^t dx \int_0^{t-x} e^{x^2 + y^2} dy = \frac{1}{2} \lim_{\xi, \eta \rightarrow 0^+} e^{\xi^2 + \eta^2} = \frac{1}{2}$.

例 6.1.49 (2016 年天津市 (理工)). 设函数 $f(x, y)$ 在点 $(0, 0)$ 的某个领域内连续，求 $\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{F'(t)}{t}$ 其中

$$F(t) = \iint_{x^2 + y^2 \leq t^2} f(x, y) dx dy.$$

由二重积分的积分中值定理知， $\exists(\xi, \eta) \in x^2 + y^2 \leq t^2$ ，使得

$$F(t) = \iint_{x^2 + y^2 \leq t^2} f(x, y) dx dy = \pi t^2 f(\xi, \eta)$$

于是， $\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{F'(t)}{t} = \lim_{\xi, \eta \rightarrow 0^+} \frac{2\pi t f(\xi, \eta)}{t} = 2\pi t f(0, 0)$.

例 6.1.50 (第十届“景润杯”). 计算极限 $\lim_{R \rightarrow +\infty} \iint_{D_R} e^{-x} \arctan \frac{y}{x} dx dy$ ，其中 D_R 是由 $x=R, y=0, y=\frac{2}{R}x-1$ 所围成。

由二重积分的积分中值定理知, $\exists(\xi, \eta) \in D_R$, 使得

$$\iint_{D_R} e^{-x} \arctan \frac{y}{x} dx dy = e^{-\xi} \arctan \frac{\eta}{\xi} \iint_{D_R} dx dy = \frac{R}{4} e^{-\xi} \arctan \frac{\eta}{\xi}$$

其中 $R \in \left(\frac{R}{2}, R\right)$, $\eta \in (0, 1)$, 故

$$\left| \iint_{D_R} e^{-x} \arctan \frac{y}{x} dx dy \right| = e^{-\xi} \arctan \frac{\eta}{\xi} \iint_{D_R} dx dy \leq \frac{R}{4} e^{-\frac{R}{2}} \arctan \frac{\eta}{\xi} \rightarrow 0 (R \rightarrow +\infty)$$

所以 $\lim_{R \rightarrow +\infty} \iint_{D_R} e^{-x} \arctan \frac{y}{x} dx dy = 0$.

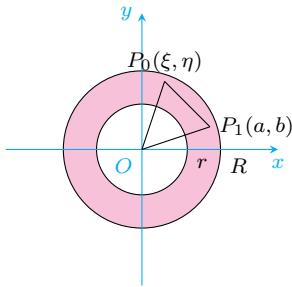
例 6.1.51. 证明:

$$\frac{\pi(R^2 - r^2)}{R + K} \leq \iint_D \frac{d\sigma}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}} \leq \frac{\pi(R^2 - r^2)}{r - K}$$

其中 $0 < K = \sqrt{a^2 + b^2} < r < R$, $D : r^2 \leq x^2 + y^2 \leq R^2$.

证 函数 $f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}}$ 在环形闭域 $D : r^2 \leq x^2 + y^2 \leq R^2$ 上连续, 则由积分中值定理知, 存在 $P_0(\xi, \eta) \in D$, 使

$$\iint_D \frac{d\sigma}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}} = \frac{1}{\sqrt{(\xi-a)^2 + (\eta-b)^2}} \iint_D d\sigma = \frac{1}{|P_0 P_1|} \pi(R^2 - r^2)$$



由图 6.1.5 知, $r \leq |OP_0| \leq R$, 且存在关系

$$r - K \leq |OP_0| - |OP_1| \leq |P_0 P_1| \leq |OP_1| + |OP_0| \leq R + K$$

所以

$$\frac{1}{R + K} \leq \frac{1}{|P_0 P_1|} \leq \frac{1}{r - K}$$

代入上式得证不等式成立.

图 6.1.5

6.1.5 重积分的应用

重积分在几何上的应用

例 6.1.52. 求球面 $x^2 + y^2 + z^2 = 4$ 和抛物面 $x^2 + y^2 = 3z$ 所围的立体 (Ω 含在抛物面内部) Ω 的体积 V .

法一: “先一后二” 法, 配合柱坐标

$$V = \iiint_{\Omega} dv = \iint_{D_{xy}} dx dy \int_{\frac{x^2+y^2}{3}}^{\sqrt{4-x^2-y^2}} dz = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\sqrt{3}} \rho d\rho \int_{\frac{\rho^2}{3}}^{\sqrt{4-\rho^2}} dz = \frac{19}{6}\pi.$$

法二: “先二后一” 法

$$\begin{aligned} V &= \iiint_{\Omega} dv = \iint_{\Omega_1} dv + \iint_{\Omega_2} dv = \int_0^1 dz \iint_{D_{z1}} dx dy + \int_1^2 dz \iint_{D_{z2}} dx dy \\ &= \int_0^1 \pi(\sqrt{3z})^2 dz + \int_1^2 \pi(\sqrt{4-z^2})^2 dz = \frac{19}{6}\pi. \end{aligned}$$

法三：利用球坐标

$$V = \iiint_{\Omega} dv = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\frac{\pi}{3}} d\varphi \int_0^2 \rho^2 \sin \varphi d\rho + \int_0^{2\pi} d\theta \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_0^{3 \frac{\cos \varphi}{\sin^2 \varphi}} \rho^2 \sin \varphi d\rho = \frac{19}{6}\pi.$$

例 6.1.53. 求由方程 $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}\right)^2 + \frac{z^4}{c^4} = z$ 所确定的曲面 Σ 所围成空间立体 Ω 的体积，其中 a, b, c 为正常数。

利用广义球坐标公式 $\begin{cases} x = a\rho \cos \theta \sin \varphi \\ y = b\rho \sin \theta \sin \varphi \\ z = c\rho \cos \varphi \end{cases}$, 于是 $\left| \frac{\partial x, y, z}{\partial \rho, \theta, \varphi} \right| = abc\rho^2 \sin \varphi$, 且

$$\Omega' = \left\{ (\rho, \theta, \varphi) \mid 0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq \rho \leq \left(\frac{c \cos \varphi}{\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}$$

$$\begin{aligned} V &= \iiint_{\Omega'} dv = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_0^{\left(\frac{c \cos \varphi}{\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi} \right)^{\frac{1}{3}}} abc\rho^2 \sin \varphi d\rho = \frac{2}{3}\pi abc^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi} d\varphi \\ &= \frac{2}{3}\pi abc^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{(\sin^2 \varphi - \cos^2 \varphi) + 2\sin^2 \varphi \cos^2 \varphi} d\varphi = \frac{2}{3}\pi abc^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{2\cos^4 \varphi - 2\cos^2 \varphi + 1} d\varphi \\ &\stackrel{\cos^2 \varphi = t}{=} \frac{\pi}{3}abc^2 \int_0^1 \frac{dt}{2t^2 - 2t + 1} = \frac{\pi}{3}abc^2 \cdot \arctan(2t - 1) \Big|_0^1 = \frac{\pi^2}{6}abc^2. \end{aligned}$$

重积分在力学上的应用

定理 6.1.4 (物体的质量). 若一物体占有区域 V , $\rho = \rho(x, y, z)$ 为它在点 (x, y, z) 的密度, 则该物体的质量等于 $M = \iiint_V \rho dx dy dz$.

例 6.1.54. 设某物体所在的空间区域为 $\Omega : x^2 + y^2 + 2z^2 \leq x + y + 2z$, 密度函数为 $x^2 + y^2 + z^2$, 求质量 $M = \iiint_{\Omega} (x^2 + y^2 + z^2) dx dy dz$.

将 $x^2 + y^2 + 2z^2 \leq x + y + 2z$ 化为

$$\left(x - \frac{1}{2} \right)^2 + \left(y - \frac{1}{2} \right)^2 + \left[\sqrt{2} \left(z - \frac{1}{2} \right) \right]^2 \leq 1$$

于是 Ω 为一椭球, 令 $u = x - \frac{1}{2}$, $v = y - \frac{1}{2}$, $w = \sqrt{2} \left(z - \frac{1}{2} \right)$, 则区域 $\Omega \rightarrow \Omega' : u^2 + v^2 + w^2 \leq 1$, 且 Jacobian 行列式

$$J = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(u, v, w)} = \frac{1}{\frac{\partial(u, v, w)}{\partial(x, y, z)}} = \frac{1}{\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} \end{vmatrix}} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \text{ 于是}$$

$$\begin{aligned} M &= \iiint_{\Omega} (x^2 + y^2 + z^2) dx dy dz = \frac{1}{\sqrt{2}} \iiint_{\Omega'} \left[\left(u + \frac{1}{2} \right)^2 + \left(v + \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{w}{\sqrt{2}} + \frac{1}{2} \right)^2 \right] du dv dw \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \iiint_{\Omega'} \left(u^2 + v^2 + \frac{w^2}{2} \right) du dv dw = \frac{1}{\sqrt{2}} \iiint_{\Omega'} \left(u + v + \frac{w}{\sqrt{2}} \right) du dv dw + \frac{1}{\sqrt{2}} \iiint_{\Omega'} \frac{3}{4} du dv dw \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \iiint_{\Omega'} \left(u^2 + v^2 + \frac{w^2}{2} \right) du dv dw + 0 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{4\pi}{3} \end{aligned}$$

记 $I = \iiint_{\Omega'} \left(u^2 + v^2 + \frac{w^2}{2} \right) du dv dw$, 则

$$I = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\pi} \sin \varphi d\varphi \int_0^1 \rho^4 d\rho = \frac{4\pi}{5}$$

由对称性知, $\iiint_{\Omega'} u^2 \mathrm{d}u \mathrm{d}v \mathrm{d}w = \iiint_{\Omega'} v^2 \mathrm{d}u \mathrm{d}v \mathrm{d}w = \iiint_{\Omega'} w^2 \mathrm{d}u \mathrm{d}v \mathrm{d}w = \frac{I}{3} = \frac{4\pi}{15}$, 故

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{4\pi}{15} + \frac{4\pi}{15} + \frac{1}{2} \cdot \frac{4\pi}{15} \right) + \frac{\pi}{\sqrt{2}} = \frac{5}{6}\sqrt{2}\pi.$$

定理 6.1.5 (物体的质心). 物体的质心坐标 (x_0, y_0, z_0) 按下列公式来计算

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{M} \iiint_V \rho x \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z, \\ y_0 = \frac{1}{M} \iiint_V \rho y \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z, \\ z_0 = \frac{1}{M} \iiint_V \rho z \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z, \end{cases}$$

若物体是均匀的, 则 $\rho = 1$.

例 6.1.55. 求以下列曲面为界的均匀物体的质心坐标.

$$(1) \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \frac{z^2}{c^2}, z = c. \quad (2) \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, x, y, z \geq 0.$$

(1) 令 $x = ar \cos \theta, y = br \sin \theta, z = z$, 则质量为

$$M = \iiint_V \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z = ab \int_0^c \mathrm{d}z \int_0^{2\pi} \mathrm{d}\theta \int_0^{\frac{z}{c}} r \mathrm{d}r = \frac{\pi abc}{3}$$

设质心坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 由对称性知, $x_0 = y_0 = 0$, 而

$$z_0 = \frac{1}{M} \iiint_V z \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z = \frac{1}{M} \int_0^c z \mathrm{d}z \int_0^{2\pi} \mathrm{d}\theta \int_0^{\frac{z}{c}} r \mathrm{d}r = \frac{3c}{4}$$

于是质心坐标为 $\left(0, 0, \frac{3c}{4}\right)$.

(2) 令 $x = a\rho \sin \varphi \cos \theta, y = b\rho \sin \varphi \cos \theta, z = c\rho \cos \varphi$, 则质量为

$$M = abc \int_0^{\frac{\pi}{2}} \mathrm{d}\theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi \mathrm{d}\varphi \int_0^1 \rho^2 \mathrm{d}\rho = \frac{\pi abc}{6}$$

设质心坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 那么

$$x_0 = \frac{1}{M} \iiint_V x \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z = \frac{a^2 bc}{M} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \mathrm{d}\theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \varphi \mathrm{d}\varphi \int_0^1 \rho^3 \mathrm{d}\rho = \frac{3}{8}a$$

由对称性知质心坐标为 $\left(\frac{3}{8}a, \frac{3}{8}b, \frac{3}{8}c\right)$.

定理 6.1.6 (转动惯量). 积分

$$I_{xy} = \iiint_V \rho z^2 \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z, I_{yz} = \iiint_V \rho x^2 \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z, I_{zx} = \iiint_V \rho y^2 \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z$$

分别称为物体对坐标平面的转动惯量;

$$I_l = \iiint_V \rho r^2 \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z$$

其中 r 为物体各点 (x, y, z) 与轴 l 的距离, 特别地, 对于坐标轴 Ox, Oy, Oz 分别有

$$I_x = I_{xy} + I_{xz}, I_y = I_{yx} + I_{yz}, I_z = I_{zx} + I_{zy}$$

物体对坐标原点的转动惯量 $I_0 = I_{xy} + I_{yz} + I_{zx}$.

与重积分有关的不等式证明

例 6.1.56. 证明不等式 $\frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{1}{e}\right) < \left(\int_0^1 e^{-x^2} dx\right)^2 < \frac{16}{25}$.

证 因为

$$\begin{aligned} \left(\int_0^1 e^{-x^2} dx\right)^2 &= \int_0^1 e^{-x^2} dx \int_0^1 e^{-y^2} dy = \iint_{\substack{0 \leq x, y \leq 1 \\ x^2 + y^2 \leq 1 \\ x, y \geq 0}} e^{-(x^2 + y^2)} dxdy \\ &\geq \iint_{\substack{x^2 + y^2 \leq 1 \\ x, y \geq 0}} e^{-(x^2 + y^2)} dxdy = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_0^1 \rho e^{-\rho^2} d\rho = \frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{1}{e}\right) \end{aligned}$$

又因为 $e^x < 1 + x + \frac{x^2}{2}$ ($x < 0$), 所以 $e^{-x^2} < 1 - x^2 + \frac{x^4}{2}$, 于是

$$\left(\int_0^1 e^{-x^2} dx\right)^2 < \left[\int_0^1 \left(1 - x^2 + \frac{x^4}{2}\right) dx\right]^2 = \left(1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{10}\right)^2 < \frac{16}{25}.$$

例 6.1.57. 设正值函数 $f(x)$ 在闭区间 $[a, b]$ 上连续, 且有

$$\int_a^b f(x) dx = A$$

证明: $\int_a^b f(x) e^{f(x)} dx \int_a^b \frac{1}{f(x)} dx \geq (b-a)(b-a+A)$.

证 记 $D = \{(x, y) \mid a \leq x \leq b, a \leq y \leq b\}$, 则

$$\begin{aligned} I &= \int_a^b f(x) e^{f(x)} dx \int_a^b \frac{1}{f(x)} dx = \int_a^b f(x) e^{f(x)} dx \int_a^b \frac{1}{f(y)} dy = \iint_D \frac{f(x)}{f(y)} e^{f(x)} dxdy \\ &= \frac{1}{2} \iint_D \left[\frac{f(y)}{f(x)} e^{f(y)} + \frac{f(x)}{f(y)} e^{f(x)} \right] dxdy \geq \iint_D e^{\frac{f(x)+f(y)}{2}} dxdy \geq \iint_D \left(\frac{f(x)+f(y)}{2} + 1 \right) dxdy \\ &= \int_a^b dx \int_a^b \left(\frac{1}{2} f(x) + \frac{1}{2} f(y) + 1 \right) dy = (b-a)^2 + \int_a^b dx \int_a^b f(y) dy = (b-a)(b-a+A) \end{aligned}$$

故得证.

例 6.1.58. 设 $f \in [a, b]$, 不恒为 0, 满足 $0 \leq f(x) \leq M$, 证明:

$$\left(\int_a^b f(x) dx\right)^2 \leq \left(\int_a^b f(x) \sin x dx\right)^2 + \left(\int_a^b f(x) \cos x dx\right)^2 + \frac{M^2(b-a)^4}{12}.$$

证 设 $D = \{(x, y) \mid a \leq x, y \leq b\}$, 那么

$$\begin{aligned} I_1 &= \left(\int_a^b f(x) dx\right)^2 = \iint_D f(x) f(y) dxdy \\ I_2 &= \left(\int_a^b f(x) \sin x dx\right)^2 = \iint_D f(x) f(y) \sin x \sin y dxdy \\ I_3 &= \left(\int_a^b f(x) \cos x dx\right)^2 = \iint_D f(x) f(y) \cos x \cos y dxdy \end{aligned}$$

故

$$I_1 - I_2 - I_3 = \iint_D f(x) f(y) (1 - \cos x \cos y - \sin x \sin y) dxdy = \iint_D f(x) f(y) [1 - \cos(x-y)] dxdy$$

$$= \iint_D f(x)f(y) \cdot 2 \sin^2\left(\frac{x-y}{2}\right) dx dy \leq \iint_D M^2 \cdot \frac{(x-y)^2}{2} dx dy$$

即得证 $\left(\int_a^b f(x) dx\right)^2 \leq \left(\int_a^b f(x) \sin x dx\right)^2 + \left(\int_a^b f(x) \cos x dx\right)^2 + \frac{M^2(b-a)^4}{12}$.

例 6.1.59. 设函数 $f(x)$ 是 $[0, 1]$ 上单调递减且连续的正值函数, 证明

$$\frac{\int_0^1 xf^2(x) dx}{\int_0^1 xf(x) dx} \leq \frac{\int_0^1 f^2(x) dx}{\int_0^1 f(x) dx}.$$

证法一 要证不等式成立, 即证 $\int_0^1 f^2(x) dx \cdot \int_0^1 xf(x) dx - \int_0^1 xf^2(x) dx \cdot \int_0^1 f(x) dx \geq 0$, 为此

$$\begin{aligned} I &= \int_0^1 f^2(x) dx \cdot \int_0^1 xf(x) dx - \int_0^1 xf^2(x) dx \cdot \int_0^1 f(x) dx \\ &= \int_0^1 f^2(x) dx \int_0^1 yf(y) dy - \int_0^1 xf^2(x) dx \int_0^1 f(y) dy = \int_0^1 \int_0^1 f^2(x)f(y)(y-x) dx dy \end{aligned}$$

又因为 $I = \int_0^1 xf(x) dx \int_0^1 f^2(y) dy - \int_0^1 f(x) dx \int_0^1 yf^2(y) dy = \int_0^1 \int_0^1 f^2(y)f(x)(x-y) dx dy$, 则有

$$2I = \int_0^1 \int_0^1 f(x)f(y)(x-y)[f(y)-f(x)] dx dy$$

因为 $f(x)$ 单调递减, 所以当 $y \geq x$ 时, $f(y) \leq f(x)$, 从而 $2I \geq 0$, 故得证.

证法二 $\frac{\int_0^1 xf^2(x) dx}{\int_0^1 xf(x) dx} - \frac{\int_0^1 f^2(x) dx}{\int_0^1 f(x) dx} = \frac{\int_0^1 xf^2(x) dx \int_0^1 f(x) dx - \int_0^1 f^2(x) dx \int_0^1 xf(x) dx}{\int_0^1 xf(x) dx \int_0^1 f(x) dx}$, 上式右边分母显然为正, 上式

右边分子令为 $F(x) = \int_0^x tf^2(t) dt \int_0^x f(t) dt - \int_0^x f^2(t) dt \int_0^x tf(t) dt$, 则

$$\begin{aligned} F'(x) &= xf^2(x) \cdot \int_0^x f(t) dt + f(x) \int_0^x tf^2(t) dt - f^2(x) \int_0^x tf(t) dt - xf(x) \int_0^x f^2(t) dt \\ &= f^2(x) \left[\int_0^x (x-t)f(t) dt \right] + f(x) \left[\int_0^x (t-x)f^2(t) dt \right] = f(x) \left[\int_0^x (x-t)f(t)f(x) dt - \int_0^x (x-t)f^2(t) dt \right] \\ &= f(x) \left[\int_0^x (x-t)f(t)[f(x)-f(t)] dt \right]. \end{aligned}$$

因 $f(x)$ 单调减少, 所以当 $x > t$ 时, $f(x) - f(t) < 0$, 因此 $F'(x) < 0$, 所以 $F(x)$ 单调减少, 所以 $F(x) \leq F(0) = 0$, 当 $0 \leq x \leq 1$ 时, 命题得证.

例 6.1.60 (第五届数学竞赛决赛). 设 $I = \iint_D f(x, y) dx dy$, 函数 $f(x, y)$ 在 D 上有连续的二阶偏导数,

其中 $D = \{(x, y) | 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$, 若对任何 x, y 有 $f(0, y) = f(x, 0) = 0$, 且 $\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \leq A$, 证明:

$$I \leq \frac{A}{4}.$$

证 令 $g(x, y) = (1-x)(1-y)$, 那么

$$\begin{aligned} \iint_D g(x, y) \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} dx dy &= \int_0^1 dx \int_0^1 g(x, y) \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} dy = \int_0^1 dx \int_0^1 g(x, y) d_y \frac{\partial f}{\partial x} \\ &= \int_0^1 dx \left[g(x, y) \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{y=0}^{y=1} - \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial g}{\partial y} dy \right] = - \int_0^1 dx \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial g}{\partial y} dy \\ &= - \int_0^1 dy \int_0^1 \frac{\partial g}{\partial y} dx f = - \int_0^1 dy \left[f(x, y) \frac{\partial g}{\partial y} \Big|_{x=0}^{x=1} - \int_0^1 f(x, y) \frac{\partial^2 g}{\partial y \partial x} dx \right] \end{aligned}$$

$$= \int_0^1 dx \int_0^1 f(x, y) dy = \iint_D f(x, y) dxdy = I$$

所以

$$I = \iint_D g(x, y) \frac{\partial^2 f}{\partial x^2 \partial y^2} \leq A \iint_D g(x, y) dxdy = A \left[\int_0^1 (1-x) dx \right]^2 = \frac{A}{4}.$$

例 6.1.61 (广东省 1991 年竞赛题). 设二元函数 $f(x, y)$ 在区域 $D = \{0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$ 上具有连续的四阶偏导数, 并且 $f(x, y)$ 在区域 D 的边界上恒为 0, 又已知 $\left| \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} \right| \leq 3$, 试证明:

$$\left| \iint_D f(x, y) dxdy \right| \leq \frac{1}{48}.$$

证 令 $g(x, y) = xy(1-x)(1-y)$, 那么

$$\begin{aligned} \iint_D g(x, y) \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} dxdy &= \int_0^1 dx \int_0^1 g(x, y) \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} dy = \int_0^1 dx \int_0^1 g(x, y) dy \frac{\partial^3 f}{\partial x^2 \partial y} \\ &= \int_0^1 dx \left[g(x, y) \frac{\partial^3 f}{\partial x^2 \partial y} \Big|_{y=0}^{y=1} - \int_0^1 \frac{\partial^3 f}{\partial x^2 \partial y} \frac{\partial g}{\partial y} dy \right] \\ &= - \int_0^1 dx \int_0^1 \frac{\partial^3 f}{\partial x^2 \partial y} \frac{\partial g}{\partial y} dy = - \int_0^1 dx \int_0^1 \frac{\partial g}{\partial y} dy \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \\ &= - \int_0^1 dx \left(\frac{\partial g}{\partial y} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \Big|_{y=0}^{y=1} - \int_0^1 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} dy \right) = \iint_D \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} dxdy. \end{aligned}$$

同理可得

$$\iint_D f(x, y) \frac{\partial^4 g}{\partial x^2 \partial y^2} dxdy = \iint_D \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} dxdy.$$

则

$$\iint_D g(x, y) \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} dxdy = \iint_D f(x, y) \frac{\partial^4 g}{\partial x^2 \partial y^2} dxdy = 4 \iint_D f(x, y) dxdy$$

$$\left| \iint_D f(x, y) dxdy \right| \leq \frac{1}{4} \iint_D g(x, y) \left| \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} \right| dxdy \leq \frac{3}{4} \iint_D g(x, y) dxdy = \frac{3}{4} \left[\int_0^1 x(1-x) dx \right]^2 = \frac{1}{48}.$$

例 6.1.62. 设 $f(x, y, z)$ 在 $\Omega = \{(x, y, z) | 0 \leq x, y, z \leq 1\}$ 上有六阶连续偏导数, f 在边界上恒为零, 且 $\left| \frac{\partial^6 f(x, y, z)}{\partial x^2 \partial y^2 \partial z^2} \right| \leq M$, 证明:

$$\left| \iiint_{\Omega} f(x, y, z) dxdydz \right| \leq \frac{1}{8} \cdot \frac{M}{6^3}.$$

证 令 $g(x, y, z) = xyz(x-1)(y-1)(z-1)$, 因为 f, g 在 Ω 上均有六阶连续偏导数, 且 f 在边界上恒为零, 故

$$\iiint_{\Omega} g(x, y, z) \frac{\partial^6 f(x, y, z)}{\partial x^2 \partial y^2 \partial z^2} dV = \iiint_{\Omega} f(x, y, z) \frac{\partial^6 g(x, y, z)}{\partial x^2 \partial y^2 \partial z^2} dV = 8 \iiint_{\Omega} \Omega f(x, y, z) dV$$

所以

$$\left| \iiint_{\Omega} f(x, y, z) dxdydz \right| \leq \frac{1}{8} \iiint_{\Omega} g(x, y, z) \left| \frac{\partial^6 f(x, y, z)}{\partial x^2 \partial y^2 \partial z^2} \right| dV \leq \frac{M}{8} \left[\int_0^1 x(1-x) dx \right]^3 = \frac{1}{8} \cdot \frac{M}{6^3}$$

例 6.1.63. 设 $f(x, y)$ 在区域 $D : x^2 + y^2 \leq 1$ 上有连续的二阶偏导数, 且满足 $f_{xx}^2 + 2f_{xy}^2 + f_{yy}^2 \leq M$ 及 $f(0, 0) = f_x(0, 0) = f_y(0, 0) = 0$, 证明:

$$\left| \iint_D f(x, y) dxdy \right| \leq \frac{\pi \sqrt{M}}{4}.$$

证 由二元函数的 *Taylor* 公式, 存在 $\theta \in (0, 1)$, 使得

$$\begin{aligned} f(x, y) &= f(0, 0) + \left(x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y} \right) f \Big|_{(0,0)} + \frac{1}{2} \left(x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y} \right)^2 f \Big|_{(\theta x, \theta y)} \\ &= \frac{1}{2} [x^2 f_{xx}(\theta x, \theta y) + 2xy f_{xy}(\theta x, \theta y) + y^2 f_{yy}(\theta x, \theta y)] \end{aligned}$$

由 *Cauchy* 不等式, 得

$$\left| \left(x^2, \sqrt{2}xy, y^2 \right) \cdot \left(f_{xx}(\theta x, \theta y), \sqrt{2}f_{xy}(\theta x, \theta y), f_{yy}(\theta x, \theta y) \right) \right| \leq \sqrt{M}(x^2 + y^2)$$

所以

$$\left| \iint_D f(x, y) dx dy \right| \leq \frac{\sqrt{M}}{2} \iint_D (x^2 + y^2) dx dy = \frac{\sqrt{M}}{2} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 r^3 dr = \frac{\pi \sqrt{M}}{4}.$$

例 6.1.64 (第十五届北京市数学竞赛). 设区域 $\Omega : x^2 + y^2 + z^2 \leq 1$, 证明

$$\frac{4\sqrt[3]{2}\pi}{3} \leq \iiint_{\Omega} \sqrt[3]{x+2y-2z+5} dv \leq \frac{8\pi}{3}.$$

证 由 *Cauchy* 不等式, 当 $(x, y, z) \in \Omega$, 即 $x^2 + y^2 + z^2 \leq 1$ 时, 有

$$(x+2y-2z)^2 \leq [1^2 + 2^2 + (-2)^2] \cdot (x^2 + y^2 + z^2) \leq 9$$

于是, $-3 \leq x+2y-2z \leq 3$, 从而 $2 \leq x+2y-2z+5 \leq 8$, 故

$$\frac{4\sqrt[3]{2}\pi}{3} = \sqrt[3]{2} \iiint_{\Omega} dv \leq \iiint_{\Omega} \sqrt[3]{x^2+2y-2z} dv \leq 2 \iiint_{\Omega} dv = \frac{8\pi}{3}.$$

例 6.1.65. 设 $\Omega : x^2 + y^2 + z^2 \leq 3$, 证明 $28\sqrt{3}\pi \leq \iiint_{\Omega} (x+y-z+10) dx dy dz \leq 52\sqrt{3}\pi$.

证 由 *Cauchy* 不等式, 当 $(x, y, z) \in \Omega$, 即 $x^2 + y^2 + z^2 \leq 3$ 时, 有

$$(x+y-z)^2 \leq [1^2 + 1^2 + (-1)^2]^2 \cdot (x^2 + y^2 + z^2)^2 \leq 9$$

于是, $7 \leq x+y-z \leq 13$, 故

$$28\sqrt{3}\pi = 7 \iiint_{\Omega} dv \leq \iiint_{\Omega} (x+y-z+10) dv \leq 13 \iiint_{\Omega} dv = 52\sqrt{3}\pi.$$

6.2 曲线积分

曲线积分是对向量场沿着曲线进行积分的数学工具, 用于描述向量场沿着曲线的积分值. 曲线积分可以分为第一类曲线积分和第二类曲线积分.

6.2.1 两类曲线积分

第一类曲线积分的计算

定义 6.2.1 (对弧长的曲线积分 (第一类曲线积分)). $\int_L f(x, y) ds = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(\xi_i, \eta_i) \Delta s_i$, 如果函数 $f(x, y)$ 在曲线 L 上连续, 则 $f(x, y)$ 在曲线 L 上对弧长的曲线积分 $\int_L f(x, y) ds$ 一定存在. 上述概念可以推广到空间, 如果 $f(x, y, z)$ 是定义在空间中分段光滑曲线 L 上的有界函数, 则函数 $f(x, y, z)$ 在曲线 L 上对弧长的曲线积分是

$$\int_L f(x, y, z) ds = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) \Delta s_i.$$

定理 6.2.1. 第一类曲线积分有如下基本性质:

$$(1) \int_L [f_1(x, y) \pm f_2(x, y)] ds = \int_L f_1(x, y) ds + \int_L f_2(x, y) ds;$$

$$(2) \int_L kf(x, y) ds = k \int_L f(x, y) ds, \text{ 其中 } k \text{ 为常数};$$

(3) 若 $L = L_1 + L_2$, 且 L_1 与 L_2 无公共点, 则

$$\int_L f(x, y) ds = \int_{L_1} f(x, y) ds + \int_{L_2} f(x, y) ds.$$

定理 6.2.2 (轴对称性). 若积分弧段 L 关于 y 轴对称, 则

$$I = \begin{cases} 2 \int_{L_1} f(x, y) ds, & f(x, y) = f(-x, y) \\ 0, & f(x, y) = -f(-x, y) \end{cases}$$

其中 $L_1 = \{(x, y) \mid (x, y) \in L, x \geq 0\}$.

若积分弧段 L 关于 x 轴对称, 则

$$I = \begin{cases} 2 \int_{L_2} f(x, y) ds, & f(x, y) = f(x, -y) \\ 0, & f(x, y) = -f(x, -y) \end{cases}$$

其中 $L_2 = \{(x, y) \mid (x, y) \in L, y \geq 0\}$.

定理 6.2.3 (轮换对称性). 若把 x 与 y 对调后, L 不变, 则

$$\int_L f(x, y) ds = \int_L f(y, x) ds.$$

例 6.2.1. 设曲线 $L : \begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = a^2 \\ x + y + z = 0 \end{cases}$ 求 $\oint_L (x^2 + 2y^2 + z) ds$.

有轮换对称性 $\oint_L x^2 ds = \oint_L y^2 ds = \oint_L z^2 ds = \frac{1}{3} \oint_L (x^2 + y^2 + z^2) ds$, $\oint_L x ds = \oint_L y ds = \oint_L z ds = \frac{1}{3} \oint_L (x + y + z) ds$, 因此

$$\oint_L (x^2 + 2y^2 + z) ds = \oint_L (x^2 + y^2 + z^2) ds + \frac{1}{3} \oint_L (x + y + z) ds = a^2 \oint_L ds + 0 = 2\pi a^3.$$

例 6.2.2. 设 $L : \begin{cases} (x-1)^2 + (y-1)^2 + (z-1)^2 = 3 \\ x + y + z = 3 \end{cases}$ 求 $\oint_L (x^2 + y^2 + z^2) ds$.

将球心平移到坐标原点, 即 $\begin{cases} X = x - 1 \\ Y = y - 1 \\ Z = z - 1 \end{cases}$ 那么 $L' : \begin{cases} X^2 + Y^2 + Z^2 = 3 \\ X + Y + Z = 0 \end{cases}$ 因此

$$\begin{aligned} \oint_L (x^2 + y^2 + z^2) ds &= \oint_{L'} [(X+1)^2 + (Y+1)^2 + (Z+1)^2] ds \\ &= \oint_{L'} (X^2 + Y^2 + Z^2) ds + 2 \oint_{L'} (X+Y+Z) ds + 3 \oint_{L'} ds = 6 \oint_{L'} ds = 12\sqrt{3}\pi. \end{aligned}$$

定理 6.2.4 (第一类曲线积分化为定积分). (1) 直角坐标形式

平面曲线 L 由直角坐标 $y = y(x), a \leq x \leq b$ 给出, 则:

$$\int_L f(x, y) ds = \int_a^b f(x, y(x)) \sqrt{1 + [y'(x)]^2} dx.$$

(2) 参数方程形式

平面曲线 L 由参数方程 $\begin{cases} x = \varphi(t) \\ y = \psi(t) \\ \alpha \leq t \leq \beta \end{cases}$ 给出, 则:

$$\int_L f(x, y) ds = \int_{\alpha}^{\beta} f(\varphi(t), \psi(t)) \sqrt{[\varphi'(t)]^2 + [\psi'(t)]^2} dt.$$

(3) 极坐标形式

平面曲线 L 由极坐标 $r = r(\theta), \alpha \leq \theta \leq \beta$ 给出, 则:

$$\int_L f(x, y) ds = \int_{\alpha}^{\beta} f(r(\theta) \cos \theta, r(\theta) \sin \theta) \sqrt{[r(\theta)]^2 + [r'(\theta)]^2} d\theta.$$

(4) 空间曲线 Γ 由参数方程 $\begin{cases} x = \varphi(t) \\ y = \psi(t) \\ z = \omega(t) \\ \alpha \leq t \leq \beta \end{cases}$ 给出, 则:

$$\int_{\Gamma} f(x, y, z) ds = \int_{\alpha}^{\beta} f(\varphi(t), \psi(t), \omega(t)) \sqrt{[\varphi'(t)]^2 + [\psi'(t)]^2 + [\omega'(t)]^2} dt.$$

例 6.2.3. 设 L 是由点 $O(0, 0)$, $A(2, 0)$ 及 $B(2, 2)$ 所围成的三角形的周界, 计算曲线积分 $\oint_L (x + y) ds$.

$$OA : y = 0, x \in [0, 2], \int_{OA} (x + y) ds = \int_0^2 x dx = 2; AB : x = 2, y \in [0, 2], \int_{AB} (x + y) ds = \int_0^2 (2 + y) dy = 6;$$

$$OB : y = x, x \in [0, 2], \int_{OB} (x + y) ds = \int_0^2 (2x) \sqrt{1 + y'^2} dx = 4\sqrt{2}$$

$$\text{因此 } \oint_L (x + y) ds = 8 + 4\sqrt{2}.$$

例 6.2.4 (2009 数一). 已知曲线 $L : y = x^2 (0 \leq x \leq \sqrt{2})$, 求 $\int_L x ds$.

$$ds = \sqrt{1 + y'^2} dx = \sqrt{1 + 4x^2} dx, \text{ 于是}$$

$$\int_L x ds = \int_0^{\sqrt{2}} x \sqrt{1 + 4x^2} dx = \frac{1}{8} \cdot \frac{2}{3} (1 + 4x^2)^{\frac{3}{2}} \Big|_0^{\sqrt{2}} = \frac{13}{6}.$$

例 6.2.5. 设 $\Gamma : \begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = a^2 \\ x + y + z = 0 \end{cases}$ 求曲线积分 $\int_{\Gamma} (x + y)^2 ds$.

法一：由 $x + y = -z$, 于是 $\int_{\Gamma} (x + y)^2 ds = \int_{\Gamma} z^2 ds$, 由轮换对称性知

$$\int_{\Gamma} x^2 ds = \int_{\Gamma} y^2 ds = \int_{\Gamma} z^2 ds = \frac{1}{3} (x^2 + y^2 + z^2) ds$$

又 $x^2 + y^2 + z^2 = a^2$, 于是

$$\int_{\Gamma} (x + y)^2 ds = \frac{1}{3} \int_{\Gamma} (x^2 + y^2 + z^2) ds = \frac{a^2}{3} \int_{\Gamma} ds = \frac{2\pi}{3} a^3.$$

法二：由 $z = -(x + y)$, 代入 $x^2 + y^2 + z^2 = a^2$, 得 $x^2 + y^2 + xy = \frac{a^2 A}{2}$, 故由旋转变换

$$x = \frac{\sqrt{2}}{2}(X + Y), \quad y = \frac{\sqrt{2}}{2}(X - Y)$$

将其转换为 $3X^2 + Y^2 = a^2$, 并令 $X = \frac{a}{\sqrt{3}} \cos t, Y = a \sin t, 0 \leq t \leq 2\pi$, 可得 Γ 的参数方程为

$$\begin{cases} x = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{a}{\sqrt{3}} \cos t - a \sin t \right) \\ y = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{a}{\sqrt{3}} \cos t + a \sin t \right) \\ z = -\frac{\sqrt{6}}{3} a \cos t \\ 0 \leq t \leq 2\pi \end{cases}$$

又 $ds = \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2 + [z'(t)]^2} dt = adt$, 于是

$$I = \int_0^{2\pi} (x(t) + y(t))^2 \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2 + [z'(t)]^2} dt = \int_0^{2\pi} \left(\frac{\sqrt{6}}{3} a \cos t \right)^2 \cdot adt = \frac{2}{3} a^3 \int_0^{2\pi} \cos^2 t dt = \frac{2}{3} \pi a^3.$$

第二类曲线积分的计算

定义 6.2.2 (对坐标的曲线积分 (第二类曲线积分)).

$$\begin{aligned} \int_L P(x, y) dx &= \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n P(\xi_i, \eta_i) \Delta x_i \\ \int_L Q(x, y) dy &= \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n Q(\xi_i, \eta_i) \Delta y_i \end{aligned}$$

如果函数 $P(x, y), Q(x, y)$ 在有向曲线 L 上连续时, 上述积分都存在. 类似地, 在空间中有向曲线 Γ 上对坐标 x, y, z 的曲线积分

$$\begin{aligned} \int_L P(x, y, z) dx &= \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n P(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) \Delta x_i \\ \int_L Q(x, y, z) dy &= \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n Q(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) \Delta y_i \\ \int_L R(x, y, z) dz &= \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n R(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) \Delta z_i. \end{aligned}$$

定理 6.2.5. $\int_{\widehat{AB}} P dx + Q dy = - \int_{\widehat{BA}} P dx + Q dy.$

定理 6.2.6 (第二类曲线积分化为定积分). (1) 设函数 $P(x, y), Q(x, y)$ 在有向曲线 L 上连续, L 的参

数方程为 $\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \end{cases}$ ($\alpha \leq t \leq \beta$), 且 $x'(t), y'(t)$ 连续, 而 $t = \alpha$ 时对应于起点 A , $t = \beta$ 时对应于终点 B , 则

$$\int_{\widehat{AB}} P(x, y) dx = \int_{\alpha}^{\beta} P[x(t), y(t)] x'(t) dt$$

$$\int_{\widehat{AB}} Q(x, y) dy = \int_{\alpha}^{\beta} Q[x(t), y(t)] y'(t) dt$$

(2) 如果曲线 L 由方程 $y = y(x)$ ($a \leq x \leq b$) 给出, 曲线 L 的起点 A 的横坐标为 $x = a$, 终点 B 的横坐标为 $x = b$, 函数 $y(x)$ 具有连续的一阶导数, 则

$$\int_{\widehat{AB}} P(x, y) dx = \int_a^b P[x, y(x)] dx$$

$$\int_{\widehat{AB}} Q(x, y) dy = \int_a^b Q[x, y(x)] y'(x) dx$$

(3) 如果曲线 L 由方程 $x = x(y)$ ($c \leq y \leq d$) 给出, 曲线 L 的起点 A 的横坐标为 $y = c$, 终点 B 的横坐标为 $y = d$, 函数 $x(y)$ 具有连续的一阶导数, 则

$$\int_{\widehat{AB}} P(x, y) dx = \int_c^d P[x(y), y] x'(y) dy$$

$$\int_{\widehat{AB}} Q(x, y) dy = \int_c^d Q[x(y), y] dy$$

(4) 对于空间曲线积分, 如果函数 $P(x, y, z), Q(x, y, z), R(x, y, z)$ 在有向曲线 Γ 上连续, Γ 的参数方

程为 $\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases}$ ($\alpha \leq t \leq \beta$), 且 $x'(t), y'(t), z'(t)$ 连续, 而 $t = \alpha$ 时对应于起点 A , $t = \beta$ 时对应于终点 B , 则

$$\int_{\widehat{AB}} P(x, y, z) dx = \int_{\alpha}^{\beta} P[x(t), y(t), z(t)] x'(t) dt$$

$$\int_{\widehat{AB}} Q(x, y, z) dy = \int_{\alpha}^{\beta} Q[x(t), y(t), z(t)] y'(t) dt$$

$$\int_{\widehat{AB}} R(x, y, z) dz = \int_{\alpha}^{\beta} R[x(t), y(t), z(t)] z'(t) dt.$$

例 6.2.6 (2004 数一). 设 L 为正向圆周 $x^2 + y^2 = 2$ 在第一象限中的部分, 求曲线积分 $\int_L x dy - 2y dx$.

正向圆周在第一象限内可表示为 $\begin{cases} x = \sqrt{2} \cos \theta \\ y = \sqrt{2} \sin \theta \\ \theta \in [0, \frac{\pi}{2}] \end{cases}$ 于是

$$\int_L x dy - 2y dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (2 + 2 \sin^2 \theta) d\theta = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta + 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \theta d\theta = \frac{3\pi}{2}.$$

例 6.2.7. 设 L 是从点 $A(-1, 1)$ 沿曲线 $x^2 + y^2 = -2y$ ($y \geq -1$) 到点 $B(-1, -1)$ 的有向线段, $f(x)$ 是连续函数, 计算

$$I = \int_L x[f(x) + 1] dy - \frac{y^2[f(x) + 1] + 2yf(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx.$$

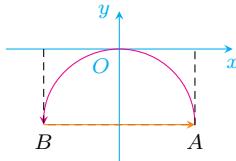


图 6.2.1

错解. 补一有向线段 \overrightarrow{BA} , 然后用 Green 公式计算,

$$\text{令 } P = -\frac{y^2[f(x) + 1] + 2yf(x)}{\sqrt{1-x^2}}, Q = x[f(x) + 1], \text{ 那么 } \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} = \dots$$

错因: 这道题考查了第二型曲线积分的计算, 注意到题目只说 f 连续, 并没有说可导, 所以不能用 Green 公式, 只能用基本方法将 I 化为定积分来计算.

令 $x = \cos t, y = \sin t - 1$, ($0 \leq t \leq \pi$) 代入 I 并化简, 有

$$\begin{aligned} I &= \int_0^\pi \cos t [f(\cos t) + 1] \cos t dt + \frac{(\sin t - 1)^2 [f(\cos t) + 1] + 2(\sin t - 1)f(\cos t)}{\sin t} \sin t dt \\ &= \int_0^\pi \{ \cos^2 t [f(\cos t) + 1] + (\sin t - 1)[f(\cos t) + 1] + (2 \sin t - 2)f(\cos t) \} dt \\ &= 2 \int_0^\pi (1 - \sin t) dt = 2(t + \cos t) \Big|_0^\pi = 2\pi - 4. \end{aligned}$$

方向导数与两类曲线积分的联系

例 6.2.8. 设 $u(x, y)$ 于圆盘 $D = \{(x, y) : x^2 + y^2 \leq \frac{\pi}{2}\}$ 内有二阶连续的偏导数, 并且满足:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = (x^2 + y^2) \sin^6(x^2 + y^2)$$

记 D 的正向边界曲线为 ∂D , ∂D 的外法线向量为 \vec{n} , 求 $\oint_{\partial D} \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} ds$.

设 $\vec{T} = (\cos \alpha, \cos \beta)$ 对应的正向切线的单位向量, 则单位向量为 $\vec{n} = (\cos \alpha, -\cos \beta)$, 由题设可知 $u(x, y)$ 可微, 故由方向导数计算公式和两类曲线积分之间的关系, 得

$$I = \oint_{\partial D} \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} ds = \oint_{\partial D} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \cos \beta - \frac{\partial u}{\partial y} \cos \alpha \right) ds = \oint_{\partial D} \frac{\partial u}{\partial x} dy - \frac{\partial u}{\partial y} dx$$

于是由 Green 公式和二重积分的极坐标计算公式, 得

$$I = \iint_D \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) dx dy = \iint_D (x^2 + y^2) \sin^6(x^2 + y^2) dx dy = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\sqrt{\frac{\pi}{2}}} r^2 \sin^6 r^2 dr = \pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} u \sin^6 u du$$

$$\text{又因为 } \sin^n x = \begin{cases} \frac{1}{(2i)^{n-1}} \sum_{k=0}^{\frac{n-1}{2}} (-1)^k C_n^k \cos((n-2k)x) \\ \frac{2}{(2i)^n} \left[\sum_{k=0}^{\frac{n-1}{2}} (-1)^k C_n^k \cos((n-2k)x) + \frac{(-1)^{\frac{n}{2}}}{2} C_n^{\frac{n}{2}} \right] \end{cases} \Rightarrow \sin^6 x = -\frac{1}{8} \cos^3 2x + \frac{3}{16} \cos 4x - \frac{3}{8} \cos 2x + \frac{5}{16}, \text{ 由分部积分公式}$$

$$\int u \cos n u du = \frac{\cos n u}{n^2} + \frac{u \sin n u}{n} + C$$

分别取 $n = 2, 4, 6$, 得 $I = \pi \left(\frac{17}{72} + \frac{5\pi^2}{128} \right)$.

6.2.2 Green 公式

定理 6.2.7 (Green 公式). Green 公式给出了平面上有限条逐段光滑封闭曲线上的线积分与它们所包围区域上的二重积分的关系:

$$\oint_{L^+} P dx + Q dy = \iint_D \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy$$

这里 L^+ 表示沿 L 的正向取积分. 正向指前进时保持在左边的方向, 当 D 为单连通区域时, 即是逆时针方向; 当 D 为多联通区域时, 外边界为逆时针方向, 内边界为顺时针方向. P, Q 要求在区域 D 内直到边界 L 上连续, 并且连续偏导数. 由此可得 D 的面积公式为:

$$S = \iint_D dx dy = \oint_{L^+} x dy = - \oint_{L^-} y dx = \frac{1}{2} \int_L x dy - y dx.$$

计算封闭曲线上的线积分

例 6.2.9. 已知 L 是区域 $D : \frac{x}{2} \leq y \leq 2x, 1 \leq xy \leq 2$ 的正向边界曲线, 求

$$\oint_L e^{x^2 y^2} \left[\left(y - \frac{1}{x} \right) dx + \left(x + \frac{1}{y} \right) dy \right].$$

令 $u = \frac{y}{x}, v = xy$, 那么 $x = \sqrt{\frac{v}{u}}, y = \sqrt{uv}$, $du = d\left(\frac{y}{x}\right) = \frac{xdy - ydx}{x^2}, dv = d(xy) = ydx + xdy$, L' 是区域 $D' : \frac{1}{2} \leq u \leq 2, 1 \leq v \leq 2$ 的正向边界曲线, 于是

$$\begin{aligned} I &= \oint_L e^{x^2 y^2} \left[\left(y - \frac{1}{x} \right) dx + \left(x + \frac{1}{y} \right) dy \right] = \oint_L e^{x^2 y^2} \left(ydx + xdy + \frac{x}{y} \cdot \frac{xdy - ydx}{x^2} \right) \\ &= \oint_{L'} e^{v^2} \left(dv + \frac{1}{u} du \right) = \iint_{D'} \frac{2ve^{v^2}}{u} du dv = \int_{\frac{1}{2}}^2 du \int_1^2 \frac{2ve^{v^2}}{u} dv = 2 \ln 2(e^4 - e). \end{aligned}$$

例 6.2.10. 设 Γ 为 $x^2 + y^2 = 2x (y \geq 0)$ 上从 $O(0,0)$ 到 $A(2,0)$ 的一段弧, 连续函数 $f(x)$ 满足

$$f(x) = x^2 + \int_{\Gamma} y[f(x) + e^x]dx + (e^x + xy^2)dy$$

求 $f(x)$.

设 $\int_{\Gamma} y[f(x) + e^x]dx + (e^x + xy^2)dy = a$, 那么

$$\begin{aligned} a &= \left(\int_{\Gamma + \overline{AO}} - \int_{\overline{AO}} \right) y[f(x) + e^x]dx + (e^x + xy^2)dy = - \iint_D \left[\frac{\partial}{\partial x} (e^x - xy^2) - \frac{\partial}{\partial y} (y(f(x) + e^x)) \right] dx dy \\ &= - \iint_D (e^x - y^2 - x^2 - a - e^x) dx dy = \iint_D (x^2 + y^2) dx dy + a \iint_D dx dy = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_0^2 \rho^3 d\rho + \frac{\pi a}{2} \\ &= 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^4 \theta d\theta + \frac{\pi a}{2} = \frac{3}{4}\pi + \frac{\pi a}{2} \Rightarrow a = \frac{3\pi}{2(2-\pi)} \Rightarrow f(x) = x^2 + \frac{3\pi}{2(2-\pi)}. \end{aligned}$$

例 6.2.11. 计算积分 $I = \oint_{L^+} \frac{x dy - y dx}{[(\alpha x + \beta y)^2 + (\gamma x + \delta y)^2]^{\alpha}}$ ($\alpha\delta - \beta\gamma \neq 0$), 其中 L^+ 为椭圆 $(\alpha x + \beta y)^2 + (\gamma x + \delta y)^2 = 1$, 取逆时针方向.

L 上 $(\alpha x + \beta y)^2 + (\gamma x + \delta y)^2 = 1$, 因此

$$I = \oint_{L^+} x dy - y dx = 2 \iint_{(\alpha x + \beta y)^2 + (\gamma x + \delta y)^2 \leq 1} dx dy$$

令 $u = \alpha x + \beta y$, $v = \gamma x + \delta y$, 作变换, 有 $I = 2 \iint_{u^2 + v^2 \leq 1} |J| dx dy$, 其中

$$J = \frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = \frac{1}{\alpha\delta - \beta\gamma}$$

$$\text{因此 } I = \frac{2}{|\alpha\delta - \beta\gamma|} \iint_{u^2 + v^2 \leq 1} du dv = \frac{2\pi}{|\alpha\delta - \beta\gamma|}.$$

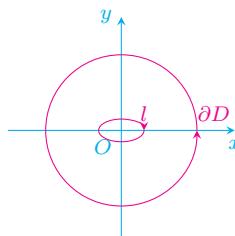
含有奇点形式

例 6.2.12. 设 $D = \{(x, y) \mid x^2 + y^2 \leq 4\}$, ∂D 为 D 的正向边界, 求

$$I = \int_{\partial D} \frac{(xe^{x^2+4y^2} + y)dx + (4ye^{x^2+4y^2} - x)dy}{x^2 + 4y^2}.$$

设 $l : x^2 + 4y^2 = \varepsilon^2$, ε 充分小且大于 0, 取顺时针, 如图 6.2.2 所示,

则有



$$\int_{\partial D} = \int_{\partial D + l - l} = \int_{\partial D + l} + \int_{l^-} := I_1 + I_2$$

设 $P = \frac{xe^{x^2+4y^2} + y}{x^2 + 4y^2}$, $Q = \frac{4ye^{x^2+4y^2} - x}{x^2 + 4y^2}$, 那么

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{8xye^{x^2+4y^2}(x^2 + 4y^2 - 1) + x^2 - 4y^2}{(x^2 + 4y^2)^2} = \frac{\partial P}{\partial y}$$

$$\text{因此 } I_1 = \iint_D \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy = 0, \text{ 下求 } I_2,$$

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{1}{\varepsilon^2} \int_{l^-} \underbrace{\left(xe^{x^2+4y^2} + y \right) dx}_{P_1} + \underbrace{\left(4ye^{x^2+4y^2} - x \right) dy}_{Q_1} = \frac{1}{\varepsilon^2} \iint_{D_\varepsilon} \left(\frac{\partial Q_1}{\partial x} - \frac{\partial P_1}{\partial y} \right) dx dy \\ &= \frac{-2}{\varepsilon^2} \iint_{x^2 + 4y^2 \leq \varepsilon^2} dx dy = \frac{-2}{\varepsilon^2} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \frac{\varepsilon}{2} = -\pi \end{aligned}$$

故 $I = 0 - \pi = \pi$.

例 6.2.13. 计算 $\oint_{C^+} \frac{x dy - y dx}{4x^2 + y^2}$, C 为以 $(1, 0)$ 为圆心, 以 R 为半径的圆周 ($R \neq 1$), 设 C^+ 表示其上的方向为逆时针方向.

当 $R < 1$ 时, 满足 Green 公式的条件, 则

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{x}{4x^2 + y^2} \right) = \frac{y^2 - 4x^2}{(4x^2 + y^2)^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{-y}{4x^2 + y^2} \right)$$

所以 $\oint_{C^+} \frac{x dy - y dx}{4x^2 + y^2} = 0$ ($x, y \neq 0$);

当 $R > 1$ 时, 取 $\varepsilon > 0$ 充分小, 使得 $\Gamma_\varepsilon : 4x^2 + y^2 = \varepsilon^2$, 且 Γ_ε^+ 表示其上的方向为顺时针方向, 记 C 与 Γ 所围成区域为 D , 则 $\oint_{C^+ + \Gamma_\varepsilon^+} \frac{x dy - y dx}{4x^2 + y^2} = 0$, 那么

$$\oint_{C^+} \frac{x dy - y dx}{4x^2 + y^2} = \oint_{\Gamma_\varepsilon^-} \frac{x dy - y dx}{4x^2 + y^2} = \frac{1}{\varepsilon^2} \oint_{\Gamma_\varepsilon^-} x dy - y dx = \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot \pi \varepsilon^2 = \pi.$$

例 6.2.14. 设 $f(x, y)$ 单位圆上有连续的偏导数, 且在边界上取值为零, 求证:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \iint_D \frac{x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y}}{x^2 + y^2} dx dy = -2\pi f(0, 0).$$

其中 D 为圆环域: $\varepsilon^2 \leq x^2 + y^2 \leq 1$.

证 记 $L_1: x^2 + y^2 = 1$ (逆时针方向), $L_2: x^2 + y^2 = \varepsilon^2$ (顺时针方向),

$$\begin{aligned} \iint_D \frac{x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y}}{x^2 + y^2} dx dy &= \oint_{L_2} \frac{-yf(x, y)dx + xf(x, y)dy}{x^2 + y^2} = \frac{1}{\varepsilon^2} \oint_{L_2} -yf(x, y)dx + xf(x, y)dy \\ &= \frac{1}{\varepsilon^2} \int_{2\pi}^0 [(-\varepsilon \sin \theta)(-\varepsilon \sin \theta) + \varepsilon \cos \theta \cdot \varepsilon \cos \theta] f(\varepsilon \cos \theta, \varepsilon \sin \theta) d\theta \\ &= - \int_0^{2\pi} f(\varepsilon \cos \theta, \varepsilon \sin \theta) d\theta = -2\pi f(\varepsilon \cos \theta^*, \varepsilon \sin \theta^*) \quad (\theta^* \in [0, 2\pi]) \end{aligned}$$

$$\text{故 } \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \iint_D \frac{x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y}}{x^2 + y^2} dx dy = -2\pi f(0, 0).$$

外法向量形式

例 6.2.15. 设 $u(x, y)$ 于圆盘 $D: x^2 + y^2 \leq \pi$ 内有二阶连续偏导数, 且

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = e^{\pi-x^2-y^2} \sin(x^2 + y^2)$$

记 D 的正向边界曲线为 ∂D , ∂D 的外法线向量为 \mathbf{n} , 求 $\oint_{\partial D} \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} ds$.

令 $\mathbf{n} = (\cos \alpha, \cos \beta)$, 则 $\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} = \frac{\partial u}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial u}{\partial y} \cos \beta$, ∂D 的单位切向量 $\tau = (-\cos \beta, \cos \alpha)$, 于是

$$\begin{aligned} \oint_{\partial D} \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} ds &= \int_{\partial D} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial u}{\partial y} \cos \beta \right) ds = \int_{\partial D} \frac{\partial u}{\partial x} dy - \frac{\partial u}{\partial y} dx = \iint_D \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) dx dy \\ &= \iint_D e^{\pi-x^2-y^2} \sin(x^2 + y^2) dx dy = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\sqrt{\pi}} \rho e^{\pi-\rho^2} \sin(\rho^2) d\rho \\ &\stackrel{t=\rho^2}{=} \pi \int_0^\pi e^{\pi-t} \sin t dt = \frac{\pi}{2} (e^\pi + 1). \end{aligned}$$

例 6.2.16. 设函数 $u(x, y)$ 在区域 $D = \{(x, y) | x^2 + y^2 \leq \pi\}$ 上有二阶连续偏导数, 且

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = e^{\pi-x^2-y^2} \cdot \sin(x^2 + y^2)$$

记 D 的正向边界曲线为 L , L 的外法向量为 \vec{n} , 求 $\oint_L \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} ds$.

因为

$$\oint_L \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} ds = \iint_D \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) dx dy$$

所以

$$\oint_L \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} ds = \iint_D e^{\pi-x^2-y^2} \cdot \sin(x^2 + y^2) dx dy = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\sqrt{\pi}} \rho e^{\pi-\rho^2} \sin \rho^2 d\rho = \pi \int_0^\pi e^{\pi-t} \sin t dt = \frac{\pi}{2} (e^\pi + 1)$$

积分与路径无关问题

该部分内容可能需要结合第八章“微分方程”的知识, 若不熟悉常见的微分方程求解, 可暂缓阅读.

定义 6.2.3 (单连通与复连通区域). 若平面区域 D 内任一闭曲线所围的部分都属于 D , 则称 D 为平面单连通区域, 否则称为复连通区域. 通俗地讲, 平面单连通区域就是不含有“洞”的区域.

定理 6.2.8 (路径无关). 设函数 $P(x, y), Q(x, y)$ 在区域 D 内具有一阶连续偏导数, 若对于 D 内的任意指定的两点 A, B 以及 D 内从点 A 到点 B 的两条任意曲线 L_1, L_2 , 等式

$$\int_{L_1} P dx + Q dy = \int_{L_2} P dx + Q dy$$

恒成立, 则称曲线积分 $\int_L P dx + Q dy$ 在 D 内与路径无关, 否则称与路径有关.

设在单连通区域 D 内 P, Q 具有一阶连续偏导数, 则下述 6 个说法等价

- (1) $\int_L P(x, y)dx + Q(x, y)dy$ 在 D 内与路径无关;
- (2) $\oint_L P(x, y)dx + Q(x, y)dy = 0$ 其中 L 是区域 D 内任意分段光滑闭曲线.
- (3) $P dx + Q dy = du(x, y);$
- (4) $\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial y}, \forall (x, y) \in D;$
- (5) $P dx + Q dy = 0$ 为全微分方程;
- (6) $P_i + Q_j$ 为某二元函数 $u(x, y)$ 的梯度.

例 6.2.17. 计算 $\int_{\widehat{AB}} \frac{-y}{x^2+y^2} dx + \frac{x}{x^2+y^2} dy$, 其中 \widehat{AB} 是自点 $A(-1, 0)$ 沿 $y = x^2 - 1$ 到点 $B(2, 3)$ 的弧段.

错解. 错解一: 因为 $\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} = \frac{\partial P}{\partial y}$, 所以与路径无关, 选取 l_4^- 作为积分路径, 则

$$I = \int_0^3 \frac{-1}{1+y^2} dy + \int_{-1}^2 \frac{-3}{x^2+9} dx = -\arctan 3 - \arctan \frac{2}{3} - \arctan \frac{1}{3} = -\arctan \frac{2}{3} - \frac{\pi}{2}$$

错因: l_1 与 l_3^- 所围成的区域必须是一个单连通区域, 因为原点 $(0, 0)$ 无定义, 所以不能取 l_4^- 作为积分路径.

错解二: 因为 $\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} = \frac{\partial P}{\partial y}$, 所以与路径无关, 选取 l_5 作为积分路径, 则

$$I = \int_0^3 \frac{-1}{1+y^2} dy + \int_{-1}^2 \frac{-3}{x^2+9} dx = \int_0^3 \frac{2dy}{4+y^2} = \arctan \frac{3}{2}$$

错因: 路径 l_5 上含有无定义点 $(0, 0)$, 故不能选取该路径作积分.

记 $l_2 : \overrightarrow{BA}$, $l_3 : x^2 + y^2 = \varepsilon^2$ 方向: 顺时针, $l_4 : \overrightarrow{BCA}$, $l_5 : \overrightarrow{AFB}$, $l_6 : \overrightarrow{ADEB}$, 则有向线段 l_1, l_2, l_3 围成的区域记为 D_1 , 且 $\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} = \frac{\partial P}{\partial y}$

法一: l_3 围成的区域记为 D_ε 由 Green 公式,

$$\begin{aligned} I &= \left(\oint_{l_1+l_2+l_3} \right) \frac{-ydx + xdy}{x^2 + y^2} \\ &= \iint_{D_1} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy - \left(\int_{BA} + \int_{l_3} \right) \frac{-ydx + xdy}{x^2 + y^2} \\ &= 0 - \int_{-1}^2 \frac{dx}{2x^2 + 2x + 1} + \frac{2}{\varepsilon^2} \iint_{D_\varepsilon} dx dy = -\frac{\pi}{4} - \arctan 5 + 2\pi \\ &= \pi + \arctan \frac{3}{2}. \end{aligned}$$

法二: 因为 $\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} = \frac{\partial P}{\partial y}$, 所以与路径无关, 选取 l_6 作为积分路径, 则有

$$\begin{aligned} I &= \int_{\overrightarrow{AD} + \overrightarrow{DE} + \overrightarrow{EB}} \frac{-ydx + xdy}{x^2 + y^2} = \int_0^{-1} \frac{dy}{1+y^2} + \int_{-1}^2 \frac{dx}{x^2+1} + \int_{-1}^3 \frac{2dy}{4+y^2} \\ &= \frac{\pi}{2} + \arctan 2 + \arctan \frac{3}{2} + \arctan \frac{1}{2} = \pi + \arctan \frac{3}{2}. \end{aligned}$$

法三: $I = \int_{\widehat{AB}} \frac{-y}{x^2 + y^2} dx + \frac{x}{x^2 + y^2} dy = \int_{(-1,0^-)}^{(2,3)} d(\arctan \frac{y}{x}) = \int_{-\pi}^{\arctan \frac{3}{2}} d\theta = \arctan \frac{3}{2} + \pi.$

例 6.2.18. 已知 $\varphi(0) = \frac{1}{2}$, 求连续可微函数 $\varphi(x)$, 使得曲线积分 $\int_A^B [e^x + \varphi(x)]y dx - \varphi(x) dy$ 与路径无关.

令 $P = [e^x + \varphi(x)]y$, $Q = -\varphi(x)$, 因为积分与路径无关, 则

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial Q}{\partial x} \Rightarrow \varphi'(x) + \varphi(x) = -e^x$$

该方程为一阶线性微分方程, 有通解公式

$$\varphi(x) = e^{-\int dx} \left[\int (-e^x) \cdot e^x dx + C \right] = -\frac{1}{2}e^x + Ce^{-x}$$

又因为 $\varphi(0) = \frac{1}{2}$, 解得 $C = 1$, 因此 $\varphi(x) = -\frac{1}{2}e^x + e^{-x}$.

二重积分分部积分

定理 6.2.9 (二重积分分部积分公式). 设 D 是由一条或几条按段光滑的封闭曲线围成的平面有界闭区域, 若函数 u, v 在闭区域 D 上有连续的一阶偏导数, 则

$$\iint_D u \frac{\partial v}{\partial x} dx dy = \oint_{\partial D} uv dy - \iint_D v \frac{\partial u}{\partial x} dx dy, \quad \iint_D u \frac{\partial v}{\partial y} dx dy = -\oint_{\partial D} uv dx - \iint_D v \frac{\partial u}{\partial y} dx dy.$$

例 6.2.19 (2023 西北大学). 设 D 是由简单光滑闭曲线 L 围成的区域, $f(x, y)$ 在 D 上具有连续的偏导数, 记作: $d = \max_{(x,y) \in D} \sqrt{x^2 + y^2}$,

$$(1) \text{ 证明: } \iint_D f(x, y) dx dy = \int_L x \cdot f dy - \iint_D x \frac{\partial f}{\partial x} dx dy;$$

(2) 若 $\forall (x, y) \in L$, 有 $f(x, y) = 0$, 证明:

$$\iint_D f^2(x, y) dx dy \leq d^2 \iint_D \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy.$$

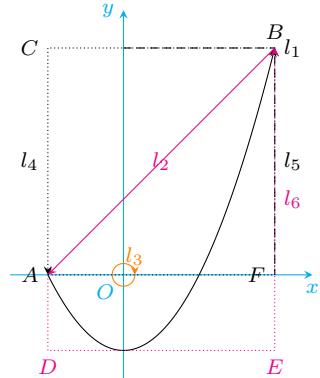


图 6.2.3

证

(1) 有 Green 公式得

$$\iint_D u \frac{\partial v}{\partial x} dx dy = \oint_{\partial D} uv dy - \iint_D v \frac{\partial u}{\partial x} dx dy$$

令 $u = x, v = f$, 则有 $\iint_D x \frac{\partial f}{\partial x} dx dy = \int_L x \cdot f dy - \iint_D f(x, y) dx dy$, 整理得证;

(2) 由 (1) 可得, $\iint_D f^2 dx dy = \frac{1}{2} \int_L f^2(x dy - y dx) - \frac{1}{2} \iint_D \left(x \frac{\partial f^2}{\partial x} + y \frac{\partial f^2}{\partial y} \right) dx dy$ 又 $\forall (x, y) \in L$, 有 $f(x, y) = 0$, 于是 $\int_L f^2(x dy - y dx) = 0$, 故 $\iint_D f^2 dx dy = -\frac{1}{2} \iint_D \left(x \frac{\partial f^2}{\partial x} + y \frac{\partial f^2}{\partial y} \right) dx dy$, 于是由 Cauchy-Schwarz 不等式得,

$$\iint_D f^2 dx dy \leq \iint_D \left| xf \frac{\partial f}{\partial x} + yf \frac{\partial f}{\partial y} \right| dx dy \leq \iint_D |f| \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2} dx dy$$

$$\leq d \iint_D |f| \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2} dx dy \leq d \left[\iint_D f^2 dx dy \cdot \iint_D \left(\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right) dx dy \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{即 } \left(\iint_D f^2 dx dy \right)^{\frac{1}{2}} \leq d \cdot \left[\iint_D \left(\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right) dx dy \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ 不等式两边平方, 即得证.}$$

例 6.2.20. 设函数 $f(x, y)$ 在区域 $D : x^2 + y^2 \leq 1$ 上有二阶连续偏导数, 且 $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = e^{-(x^2+y^2)}$, 证明:

$$\iint_D \left(x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} \right) dx dy = \frac{\pi}{2e}.$$

证法一 积分区域 D 是圆形域, 考虑采用极坐标, 然后利用已知等式化简被积函数. 令 $x = \rho \cos \theta, y = \rho \sin \theta$, 则

$$D = \{(\rho, \theta) | 0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi\}$$

于是

$$\iint_D \left(x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} \right) dx dy = \int_0^1 \rho d\rho \int_0^{2\pi} \left(\rho \cos \theta \frac{\partial f}{\partial x} + \rho \sin \theta \frac{\partial f}{\partial y} \right) d\theta.$$

记 L_ρ 为半径是 ρ ($0 \leq \rho \leq 1$) 的圆周 (逆时针方向), D_ρ 为 L_ρ 包围的区域, 则

$$\int_0^{2\pi} \left(\rho \cos \theta \frac{\partial f}{\partial x} + \rho \sin \theta \frac{\partial f}{\partial y} \right) d\theta = \oint_{L_\rho} -\frac{\partial f}{\partial y} dx + \frac{\partial f}{\partial x} dy.$$

由 Green 公式及已知等式, 得

$$\text{上式} = \iint_{D_\rho} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) dx dy = \iint_{D_\rho} e^{-(x^2+y^2)} dx dy = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\rho e^{-r^2} r dr = \pi \left(1 - e^{-\rho^2} \right)$$

故

$$\iint_D \left(x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} \right) dx dy = \int_0^1 \rho \pi \left(1 - e^{-\rho^2} \right) d\rho = \frac{\pi}{2e}.$$

证法二 由 Green 公式, 可导出二重积分的分部积分公式:

$$\iint_D u \frac{\partial v}{\partial x} dx dy = \oint_{\partial D} uv dy - \iint_D v \frac{\partial u}{\partial x} dx dy, \quad \iint_D u \frac{\partial v}{\partial y} dx dy = -\oint_{\partial D} uv dx - \iint_D v \frac{\partial u}{\partial y} dx dy.$$

其中 D 是由一条分段光滑闭曲线所围成的闭区域, ∂D 为 D 的正向边界.

令 $u = \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x} = x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{x^2 + y^2}{2} \right)$, 则由上述公式, 有

$$\iint_D x \frac{\partial f}{\partial x} dx dy = \iint_D \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{x^2 + y^2}{2} \right) dx dy = \frac{1}{2} \oint_{\partial D} (x^2 + y^2) \frac{\partial f}{\partial x} dy - \frac{1}{2} \iint_D (x^2 + y^2) \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} dx dy$$

再令 $u = \frac{\partial f}{\partial y}$, $\frac{\partial v}{\partial x} = y = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{x^2 + y^2}{2} \right)$, 类似地, 有

$$\iint_D y \frac{\partial f}{\partial y} dx dy = \iint_D \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{x^2 + y^2}{2} \right) dx dy = -\frac{1}{2} \oint_{\partial D} (x^2 + y^2) \frac{\partial f}{\partial y} dx - \frac{1}{2} \iint_D (x^2 + y^2) \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} dx dy$$

于是

$$\iint_D \left(x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} \right) dx dy = \frac{1}{2} \oint_{\partial D} (x^2 + y^2) \frac{\partial f}{\partial x} dy - (x^2 + y^2) \frac{\partial f}{\partial y} dx - \frac{1}{2} \iint_D (x^2 + y^2) \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) dx dy.$$

因为在边界 ∂D 上, $x^2 + y^2 = 1$, 所以利用 Green 公式, 得

$$\begin{aligned} \text{上式} &= \frac{1}{2} \oint_{\partial D} \frac{\partial f}{\partial x} dy - \frac{\partial f}{\partial y} dx - \frac{1}{2} \iint_D (x^2 + y^2) e^{-(x^2+y^2)} dx dy \\ &= \frac{1}{2} \iint_D \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) dx dy - \frac{1}{2} \iint_D (x^2 + y^2) e^{-(x^2+y^2)} dx dy \\ &= \frac{1}{2} \iint_D (1 - x^2 - y^2) e^{-(x^2+y^2)} dx dy = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 (1 - \rho^2) \rho e^{-\rho^2} d\rho = \frac{\pi}{2e}. \end{aligned}$$

例 6.2.21 (首届数学竞赛数学类决赛). 设 $f(x, y)$ 是 $D = \{(x, y) | x^2 + y^2 \leq 1\}$ 上二次连续可微函数, 满足 $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = x^2 y^2$, 计算积分

$$I = \iint_D \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{\partial f}{\partial y} \right) dx dy.$$

由 Green 公式, 可导出二重积分的分部积分公式:

$$\iint_D u \frac{\partial v}{\partial x} dx dy = \oint_{\partial D} u v dy - \iint_D v \frac{\partial u}{\partial x} dx dy, \quad \iint_D u \frac{\partial v}{\partial y} dx dy = -\oint_{\partial D} u v dx - \iint_D v \frac{\partial u}{\partial y} dx dy.$$

其中 D 是由一条分段光滑闭曲线所围成的闭区域, ∂D 为 D 的正向边界.

令 $u = \frac{\partial f}{\partial x}$, $\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{\partial \sqrt{x^2 + y^2}}{\partial x}$, 则由上述公式, 有

$$\iint_D u \frac{\partial v}{\partial x} dx dy = \iint_D \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{\partial f}{\partial x} dx dy = \oint_{\partial D} \sqrt{x^2 + y^2} \frac{\partial f}{\partial x} dy - \iint_D \sqrt{x^2 + y^2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} dx dy$$

再令 $u = \frac{\partial f}{\partial y}$, $\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{\partial \sqrt{x^2 + y^2}}{\partial y}$, 类似地, 有

$$\iint_D u \frac{\partial v}{\partial y} dx dy = \iint_D \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{\partial f}{\partial y} dx dy = -\oint_{\partial D} \sqrt{x^2 + y^2} \frac{\partial f}{\partial y} dx - \iint_D \sqrt{x^2 + y^2} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} dx dy$$

于是

$$\begin{aligned} \iint_D \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{\partial f}{\partial y} \right) dx dy &= \oint_{\partial D} \sqrt{x^2 + y^2} \frac{\partial f}{\partial x} dy - \sqrt{x^2 + y^2} \frac{\partial f}{\partial y} dx - \iint_D \sqrt{x^2 + y^2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) dx dy \\ &= \iint_D x^2 y^2 \left(1 - \sqrt{x^2 + y^2} \right) dx dy = \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta \sin^2 \theta d\theta \int_0^1 \rho^5 (1 - \rho) d\rho = \frac{\pi}{168} \end{aligned}$$

因为在边界 ∂D 上, $x^2 + y^2 = 1$, 所以利用 Green 公式, 得

$$\begin{aligned} \text{上式} &= \oint_{\partial D} \frac{\partial f}{\partial x} dy - \frac{\partial f}{\partial y} dx - \iint_D \sqrt{x^2 + y^2} \cdot x^2 y^2 dx dy = \iint_D \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) dx dy - \iint_D x^2 y^2 \sqrt{x^2 + y^2} dx dy \\ &= \iint_D x^2 y^2 \left(1 - \sqrt{x^2 + y^2} \right) dx dy = \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta \sin^2 \theta d\theta \int_0^1 \rho^5 (1 - \rho) d\rho = \frac{\pi}{168} \end{aligned}$$

例 6.2.22 (第十三届数学竞赛非数学预赛补赛). 设函数 $f(x, y)$ 在闭区间 $D = \{(x, y) | x^2 + y^2 \leq 1\}$ 上具有二阶连续偏导数, 且 $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = x^2 + y^2$, 求

$$\lim_{r \rightarrow 0^+} \frac{\iint_{x^2+y^2 \leq r^2} \left(x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} \right) dx dy}{(\tan r - \sin r)^2}.$$

记 $D_r = x^2 + y^2 \leq r^2$, 由 Green 公式, 可导出二重积分的分部积分公式:

$$\iint_{D_r} u \frac{\partial v}{\partial x} dx dy = \oint_{\partial D_r} uv dy - \iint_{D_r} v \frac{\partial u}{\partial x} dx dy, \quad \iint_{D_r} u \frac{\partial v}{\partial y} dx dy = - \oint_{\partial D_r} uv dx - \iint_{D_r} v \frac{\partial u}{\partial y} dx dy.$$

其中 D_r 是由一条分段光滑闭曲线所围成的闭区域, ∂D_r 为 D_r 的正向边界.

令 $u = \frac{\partial f}{\partial x}$, $\frac{\partial v}{\partial x} = x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{x^2 + y^2}{2} \right)$, 则由上述公式, 有

$$\iint_{D_r} x \frac{\partial f}{\partial x} dx dy = \iint_{D_r} \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{x^2 + y^2}{2} \right) dx dy = \frac{1}{2} \oint_{\partial D_r} (x^2 + y^2) \frac{\partial f}{\partial x} dy - \frac{1}{2} \iint_{D_r} (x^2 + y^2) \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} dx dy$$

再令 $u = \frac{\partial f}{\partial y}$, $\frac{\partial v}{\partial y} = y = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{x^2 + y^2}{2} \right)$, 类似地, 有

$$\iint_{D_r} y \frac{\partial f}{\partial y} dx dy = \iint_{D_r} \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{x^2 + y^2}{2} \right) dx dy = -\frac{1}{2} \oint_{\partial D_r} (x^2 + y^2) \frac{\partial f}{\partial y} dx - \frac{1}{2} \iint_{D_r} (x^2 + y^2) \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} dx dy$$

于是

$$\iint_{D_r} \left(x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} \right) dx dy = \frac{1}{2} \oint_{\partial D_r} (x^2 + y^2) \frac{\partial f}{\partial x} dy - (x^2 + y^2) \frac{\partial f}{\partial y} dx - \frac{1}{2} \iint_{D_r} (x^2 + y^2) \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) dx dy$$

因为在边界 ∂D_r 上, $x^2 + y^2 = r^2$, 所以利用 Green 公式, 得

$$\begin{aligned} \text{上式} &= \frac{r^2}{2} \oint_{\partial D_r} \frac{\partial f}{\partial x} dy - \frac{\partial f}{\partial y} dx - \frac{1}{2} \iint_{D_r} (x^2 + y^2)^2 dx dy = \frac{r^2}{2} \iint_{D_r} (x^2 + y^2) dx dy - \frac{1}{2} \iint_{D_r} (x^2 + y^2)^2 dx dy \\ &= \frac{1}{2} \iint_{D_r} \left[r^2 (x^2 + y^2) - (x^2 + y^2)^2 \right] dx dy = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^r (r^2 \rho^3 - \rho^5) d\rho = \frac{\pi r^6}{12} \end{aligned}$$

另一方面, $(\tan r - \sin r)^2 = \left(r + \frac{r^3}{3} - r + \frac{r^3}{6} + o(r^3) \right)^2 \sim \frac{r^6}{4}$, $r \rightarrow 0^+$.

综上, 原式 $= \lim_{r \rightarrow 0^+} \frac{\pi r^6}{12} \cdot \frac{4}{r^6} = \frac{\pi}{3}$.

例 6.2.23. 设 $u(x, y)$ 在 $D : x^2 + y^2 \leq 1$ 上有二阶连续偏导数, 且 $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{x^2 + y^2}{e^x + e^y} \cdot e^x$, 试求

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\iint_{x^2+y^2 \leq t^2} \left(x \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + y \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) dx dy}{(\tan t - \arctan t)^2}.$$

令 $D_t : x^2 + y^2 \leq t^2$, 由 Green 公式可得二重积分分部积分公式,

$$\begin{cases} \iint_{D_t} x \frac{\partial u}{\partial x} dx dy = \oint_{\partial D_t} \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{x^2 + y^2}{2} dy - \iint_{D_t} \frac{x^2 + y^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx dy \\ \iint_{D_t} y \frac{\partial u}{\partial y} dx dy = - \oint_{\partial D_t} \frac{\partial u}{\partial y} \cdot \frac{x^2 + y^2}{2} dx - \iint_{D_t} \frac{x^2 + y^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} dx dy \end{cases}$$

于是

$$\begin{aligned}
 I &= \iint_{D_t} \left(x \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + y \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) dx dy = \frac{t^2}{2} \oint_{\partial D_t} \frac{\partial u}{\partial x} dy - \frac{\partial u}{\partial y} dx - \frac{1}{2} \iint_{D_t} (x^2 + y^2) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) dx dy \\
 &= \frac{1}{2} \iint_{D_t} [t^2 - (x^2 + y^2)] \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) dx dy = \frac{1}{2} \iint_{D_t} [t^2 - (x^2 + y^2)] (x^2 + y^2) \cdot \frac{e^x}{e^x + e^y} dx dy \\
 &= \frac{e^\xi}{2(e^\xi + e^\eta)} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^t [t^2 - r^2] r^3 dr = \frac{e^\xi}{2(e^\xi + e^\eta)} \cdot 2\pi \cdot \frac{t^6}{12}
 \end{aligned}$$

其中 $(\xi, \eta) \in D_t$, 那么

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\iint_{x^2+y^2 \leq t^2} \left(x \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + y \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) dx dy}{(\tan t - \arctan t)^2} = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\frac{e^\xi \pi t^6}{12(e^\xi + e^\eta)}}{\left(-\frac{2}{3}t^3\right)^2} = \frac{3\pi}{32}.$$

例 6.2.24 (第九届数学竞赛决赛). 设函数 $f(x, y)$ 在区域 $D = \{(x, y) | x^2 + y^2 \leq a^2\}$ 上是一阶连续偏导数, 且满足

$$f(x, y)|_{x^2+y^2=a^2} = a^2, \text{ 以及 } \max_{(x, y) \in D} \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right] = a^2$$

其中 $a > 0$. 证明: $\left| \iint_D f(x, y) dx dy \right| \leq \frac{4}{3}\pi a^4$.

证 由 Green 公式, 可导出二重积分的分部积分公式:

$$\iint_D u \frac{\partial v}{\partial x} dx dy = \oint_{\partial D} uv dy - \iint_D v \frac{\partial u}{\partial x} dx dy, \quad \iint_D u \frac{\partial v}{\partial y} dx dy = -\oint_{\partial D} uv dx - \iint_D v \frac{\partial u}{\partial y} dx dy.$$

其中 D 是由一条分段光滑闭曲线所围成的闭区域, ∂D 为 D 的正向边界.

令 $\frac{\partial v}{\partial x} = 1 = \frac{\partial x}{\partial x}$, $u = f(x, y)$, 则由上述公式, 有

$$\iint_D u \frac{\partial v}{\partial x} dx dy = \iint_D f(x, y) dx dy = \oint_{\partial D} xf(x, y) dy - \iint_D x \frac{\partial f}{\partial x} dx dy$$

再令 $\frac{\partial v}{\partial y} = 1 = \frac{\partial y}{\partial y}$, $u = f(x, y)$, 则有

$$\iint_D u \frac{\partial v}{\partial y} dx dy = \iint_D f(x, y) dx dy = -\oint_{\partial D} yf(x, y) dx - \iint_D y \frac{\partial f}{\partial y} dx dy$$

所以由 Cauchy-Schwarz 不等式,

$$\begin{aligned}
 \left| \iint_D f(x, y) dx dy \right| &= \frac{1}{2} \left| \oint_{\partial D} |xf(x, y) dy - yf(x, y) dx| + \frac{1}{2} \iint_D \left| x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} \right| dx dy \right| \\
 &\leq a^2 \iint_D dx dy + \frac{1}{2} \iint_D \sqrt{x^2 + y^2} \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2} dx dy \\
 &\leq \pi a^4 + \frac{a}{2} \iint_D \sqrt{x^2 + y^2} dx dy = \pi a^4 + \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^a \rho^2 d\rho = \frac{4}{3}\pi a^4
 \end{aligned}$$

6.3 曲面积分

曲面积分是对矢量场在曲面上进行积分的数学概念, 类似于曲线积分, 但是在三维空间中考虑曲面而不是曲线. 曲面积分可以分为两类: 第一类曲面积分和第二类曲面积分.

6.3.1 两类曲面积分

第一型曲面积分的计算

定义 6.3.1 (对面积的曲面积分 (第一型曲面积分)). 设 Σ 为空间的有界曲面, 函数 $f(x, y, z)$ 在 Σ 上定义, 将 Σ 任意地分割为 n 个小曲面 $\Sigma_i (i = 1, 2, \dots, n)$, Σ_i 的面积为 ΔS_i , Σ_i 的直径为 d_i , $\lambda = \max_{1 \leq i \leq n} \{d_i\}$, 在 Σ_i 上任取点 (x_i, y_i, z_i) , 则函数 f 沿 Σ 的第一型曲面积分定义为

$$\iint_{\Sigma} f(x, y, z) dS = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(x_i, y_i, z_i) \Delta S_i$$

这里右端的极限存在, 且与分割 Σ 的方式无关, 与点 (x_i, y_i, z_i) 的取法无关. 当 $f(x, y, z)$ 在 Σ 上连续时, f 在 Σ 上的第一型曲面积分存在, 即可积.

定理 6.3.1 (偶倍奇零性). (1) 若曲面 Σ 的点关于 $x = 0$ 对称, f 在 Σ 上可积, 则

$$\iint_{\Sigma} f(x, y, z) dS = \begin{cases} 0, & \text{若 } f(-x, y, z) = -f(x, y, z), \\ 2 \iint_{\Sigma_1} f(x, y, z) dS, & \text{若 } f(-x, y, z) = f(x, y, z) \end{cases}$$

这里 Σ_1 是 Σ 的 $x \geq 0$ 的部分曲面.

(2) 若曲面 Σ 的点关于 $y = 0$ 对称, f 在 Σ 上可积, 则

$$\iint_{\Sigma} f(x, y, z) dS = \begin{cases} 0, & \text{若 } f(x, -y, z) = -f(x, y, z), \\ 2 \iint_{\Sigma_2} f(x, y, z) dS, & \text{若 } f(x, -y, z) = f(x, y, z) \end{cases}$$

这里 Σ_2 是 Σ 的 $y \geq 0$ 的部分曲面.

(3) 若曲面 Σ 的点关于 $z = 0$ 对称, f 在 Σ 上可积, 则

$$\iint_{\Sigma} f(x, y, z) dS = \begin{cases} 0, & \text{若 } f(x, y, -z) = -f(x, y, z), \\ 2 \iint_{\Sigma_3} f(x, y, z) dS, & \text{若 } f(x, y, -z) = f(x, y, z) \end{cases}$$

这里 Σ_3 是 Σ 的 $z \geq 0$ 的部分曲面.

定理 6.3.2 (第一型曲面积分化为二重积分). 假设曲面 $\Sigma \subset \mathbb{R}^3$ 为有界的光滑曲面, 其参数方程为

$$\mathbf{r} = (x, y, z) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v)), (u, v) \in D$$

$D \subset \mathbb{R}^2$ 为有界闭域, Σ 与 D 的点一一对应, 其中函数 $x, y, z \in \mathcal{C}^{(1)}(D)$. 令

$$E = \mathbf{r}'_u \cdot \mathbf{r}'_u, F = \mathbf{r}'_v \cdot \mathbf{r}'_v, G = \mathbf{r}'_u \cdot \mathbf{r}'_v$$

若函数 $f \in \mathcal{C}(\Sigma)$, 则函数 $f(x, y, z)$ 沿曲面 Σ 的第一型曲面积分存在, 且有

$$\iint_{\Sigma} f(x, y, z) dS = \iint_D f(x(u, v), y(u, v), z(u, v)) \sqrt{EF - G^2} du dv.$$

特别, 取参数 u, v 为 x, y , 或 y, z , 或 z, x :

- (1) 若曲面 Σ 的方程为 $z = z(x, y), (x, y) \in D$, D 为 xOy 平面上的有界闭域, 函数 $z(x, y)$ 在 D 上连续可微, 函数 $f(x, y, z)$ 在 Σ 上连续, 则

$$\iint_{\Sigma} f(x, y, z) dS = \iint_D f(x, y, z(x, y)) \sqrt{1 + (z'_x)^2 + (z'_y)^2} dx dy$$

- (2) 若曲面 Σ 的方程为 $x = x(y, z), (y, z) \in D_1$, D_1 为 yOz 平面上的有界闭域, 函数 $x(y, z)$ 在 D_1 上连续可微, 函数 $f(x, y, z)$ 在 Σ 上连续, 则

$$\iint_{\Sigma} f(x, y, z) dS = \iint_{D_1} f(x(y, z), y, z) \sqrt{1 + (x'_y)^2 + (x'_z)^2} dy dz$$

- (3) 若曲面 Σ 的方程为 $y = y(z, x), (z, x) \in D_2$, D_2 为 zOx 平面上的有界闭域, 函数 $y(z, x)$ 在 D_2 上连续可微, 函数 $f(x, y, z)$ 在 Σ 上连续, 则

$$\iint_{\Sigma} f(x, y, z) dS = \iint_{D_2} f(x, y(z, x), z) \sqrt{1 + (y'_z)^2 + (y'_x)^2} dz dx$$

例 6.3.1. 计算 $\iint_{\Sigma} (x + y + z) dS$, 式中 Σ 为曲面 $x^2 + y^2 + z^2 = a^2, z \geq 0$.

由于

$$\sqrt{1 + (z'_x)^2 + (z'_y)^2} = \sqrt{1 + \frac{x^2}{z^2} + \frac{y^2}{z^2}} = \frac{a}{\sqrt{a^2 - x^2 - y^2}}$$

所以

$$\begin{aligned} I &= \iint_{\Sigma} (x + y + z) dS = \iint_{D_{xy}} \left(x + y + \sqrt{a^2 - x^2 - y^2} \right) \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2 - x^2 - y^2}} dx dy \\ &= \int_{-a}^a dx \int_{-\sqrt{a^2-x^2}}^{\sqrt{a^2-x^2}} \left(x + y + \sqrt{a^2 - x^2 - y^2} \right) \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2 - x^2 - y^2}} dy \\ &= \int_{-a}^a \left(\pi ax + 2a\sqrt{a^2 - x^2} \right) dx = 4a \int_0^a \sqrt{a^2 - x^2} dx = \pi a^3. \end{aligned}$$

例 6.3.2. 计算曲面积分

$$I = \iint_{\Sigma} \frac{2dydz}{x \cos^2 x} + \frac{dzdx}{\cos^2 y} - \frac{dxdy}{z \cos^2 z}$$

其中 Σ 是球面 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ 的外侧.

由 $\frac{dydz}{x} = \frac{dzdx}{y} = \frac{dxdy}{z} = dS$ 将原式积分化为第一型曲面积分, 得

$$I = \iint_{\Sigma} \left(\frac{2}{\cos^2 x} + \frac{y}{\cos^2 y} - \frac{1}{\cos^2 z} \right) dS$$

由于曲面 Σ 关于三个坐标平面对称, $\frac{2}{\cos^2 x}$ 是关于 x 的偶函数, $\frac{y}{\cos^2 y}$ 关于 y 为奇函数, $\frac{1}{\cos^2 z}$ 关于 z 为偶函数, 应用第一型曲面积分的偶倍奇零性, 得

$$I = 4 \iint_{\Sigma(x \geq 0)} \frac{1}{\cos^2 x} dS + 0 - 2 \iint_{\Sigma(z \geq 0)} \frac{1}{\cos^2 z} dS$$

$\Sigma(x \geq 0)$ 的方程是 $x = \sqrt{1 - y^2 - z^2}$, $D_{yz} : y^2 + z^2 \leq 1$; $\Sigma(z \geq 0)$ 的方程是 $z = \sqrt{1 - x^2 - y^2}$, $D_{xy} : x^2 + y^2 \leq 1$, 由于曲面 $\Sigma(x \geq 0)$ 与 $\Sigma(z \geq 0)$ 的方程关于 x, z 具有轮换性, 所以

$$\iint_{\Sigma(x \geq 0)} \frac{1}{\cos^2 x} dS = \iint_{\Sigma(z \geq 0)} \frac{1}{\cos^2 z} dS \Rightarrow I = 2 \iint_{\Sigma(z \geq 0)} \frac{1}{\cos^2 z} dS$$

将曲面积分化为区域 D_{xy} 上的二重积分, 并在区域 D_{xy} 上用极坐标计算, 有

$$\begin{aligned} dS &= \sqrt{1 + (z'_x)^2 + (z'_y)^2} dx dy = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2 - y^2}} dx dy \\ I &= 2 \iint_{D_{xy}} \frac{\sec^2 \sqrt{1 - x^2 - y^2}}{\sqrt{1 - x^2 - y^2}} dx dy = 2 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 \frac{\sec^2 \sqrt{1 - \rho^2}}{\sqrt{1 - \rho^2}} \rho d\rho \\ &= 4\pi \int_0^1 \sec^2 \sqrt{1 - \rho^2} d\sqrt{1 - \rho^2} = 4\pi \cdot \tan x \Big|_0^1 = 4\pi \tan 1. \end{aligned}$$

例 6.3.3. 计算曲面积分

$$I = \iint_{\Sigma} yz(y - z) dy dz + zx(z - x) dz dx + xy(x - y) dx dy$$

其中 Σ 是上半球面 $z = \sqrt{4Rx - x^2 - y^2}$ ($R \geq 1$) 在柱面 $\left(x - \frac{3}{2}\right)^2 + y^2 = 1$ 之内部的上侧.

记 $F(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - 4Rx = 0$ ($z \geq 0, R \geq 1$), 则曲面 Σ 的法向量为

$$\vec{n} = \left(\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \frac{\partial F}{\partial z} \right) = (x - 2R, y, z)$$

于是

$$\frac{dy dz}{x - 2R} = \frac{dz dx}{y} = \frac{dx dy}{z}$$

代入曲面积分得,

$$I = \iint_{\Sigma} \left[yz(y - z) \cdot \frac{x - 2R}{z} + zx(z - x) \cdot \frac{y}{z} + xy(x - y) \right] dx dy = 2R \iint_{\Sigma} y(z - y) dx dy$$

记曲面 Σ 在 xOy 平面上的投影区域为 $D : \left(x - \frac{3}{2}\right)^2 + y^2 \leq 1$, 由偶倍奇零性, 则

$$\begin{aligned} I &= 2R \iint_D y \left(\sqrt{4Rx - x^2 - y^2} - y \right) dx dy = 2R \iint_D y \sqrt{4Rx - x^2 - y^2} dx dy - 2R \iint_D y^2 dx dy \\ &= -2R \iint_D y^2 dx dy = -2R \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 \rho^3 \sin^2 \theta d\rho = -2R \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta d\theta \int_0^1 \rho^3 d\rho = -\frac{\pi R}{2}. \end{aligned}$$

例 6.3.4. 计算 $I = \iint_{\Sigma} zdS$, 其中 Σ 是柱面 $x^2 + y^2 = 2az$ ($a > 0$) 被圆锥面 $z = \sqrt{x^2 + y^2}$ 所割下的部分曲面.

利用柱面坐标 $x = a \sin \theta, y = y, z = a(1 + \cos \theta)$, 那么 Σ 在参数平面上的投影为

$$D : -\sqrt{2a^2 \cos \theta (\cos \theta + 1)} \leq y \leq \sqrt{2a^2 \cos \theta (\cos \theta + 1)}, -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

并且 $dS = \sqrt{EF - G^2} d\theta dy = ad\theta dy$, 记 $y(\theta) = \sqrt{2a^2 \cos \theta (\cos \theta + 1)}$, 并由对称性,

$$\begin{aligned} I &= a^2 \iint_D (1 + \cos \theta) d\theta dy = a^2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_{-y(\theta)}^{y(\theta)} (1 + \cos \theta) dy = 2\sqrt{2}a^3 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (1 + \cos \theta)^{\frac{3}{2}} \cos^{\frac{1}{2}} \theta d\theta \\ &\stackrel{\sqrt{\cos \theta} = \sin t}{=} 8\sqrt{2}a^3 \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin^2 t + \sin^4 t) dt = 8\sqrt{2}a^3 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\pi}{16} \right) = \frac{7\pi a^3}{\sqrt{2}}. \end{aligned}$$

例 6.3.5. 设 P 为椭球面 $S: x^2 + y^2 + z^2 - yz = 1$ 上一动点, 若 S 在点 P 处的切平面与 xOy 面垂直, 求点 P 的轨迹 C , 并计算曲面积分

$$I = \iint_{\Sigma} \frac{(x + \sqrt{3})|y - 2z|}{\sqrt{4 + y^2 + z^2 - 4yz}} dS$$

其中 Σ 是椭球面 S 位于曲线 C 上方的部分.

设 $P(x_0, y_0, z_0)$, z 轴上的单位向量为 $\mathbf{k} = (0, 0, 1)$, 椭球面方程为

$$F(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - yz - 1 = 0$$

则椭球面 S 上动点 P 的法向量为

$$\mathbf{n} = \left(\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \frac{\partial F}{\partial z} \right)_P = (2x_0, 2y_0 - z_0, 2z_0 - y_0)$$

由题意有 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{k} = 0 \Rightarrow 2z_0 = y_0$, 又因为 P 在 S 上, 于是

$$\begin{cases} x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - y_0 z_0 - 1 = 0 \\ 2z_0 = y_0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 4x^2 + 3y^2 = 4 \\ 2z - y = 0 \end{cases}$$

下求曲面积分, 先计算 $\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}$, 因为 $z = z(x, y)$, 于是

$$\begin{cases} 2x + 2z \frac{\partial z}{\partial x} - y \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \\ 2y + 2z \frac{\partial z}{\partial y} - z - y \frac{\partial z}{\partial y} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{2x}{y - 2z} \\ \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{z - 2y}{2z - y} \end{cases}$$

因此

$$\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} = \sqrt{1 + \frac{4x^2}{(y - 2z)^2} + \frac{(z - 2y)^2}{(2z - y)^2}} = \sqrt{\frac{4x^2 + 4y^2 + 4z^2 - 4yz + y^2 + z^2 - 4yz}{(2z - y)^2}}$$

$$\xrightarrow{x^2 + y^2 + z^2 - yz = 1} \frac{\sqrt{4 + y^2 + z^2 - 4yz}}{|2z - y|}$$

于是

$$\begin{aligned} I &= \iint_{\substack{4x^2 + 3y^2 \leq 4 \\ 4x^2 + 3y^2 \leq 4}} \frac{(x + \sqrt{3})|y - 2z|}{\sqrt{4 + y^2 + z^2 - 4yz}} \cdot \frac{\sqrt{4 + y^2 + z^2 - 4yz}}{|2z - y|} dx dy = \iint_{4x^2 + 3y^2 \leq 4} (x + \sqrt{3}) dx dy \\ &= \sqrt{3} \iint_{4x^2 + 3y^2 \leq 4} dx dy = \sqrt{3} \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{3}} = 2\pi. \end{aligned}$$

例 6.3.6 (第十一届数学竞赛初赛). 计算积分 $\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\pi e^{\sin \varphi (\cos \theta - \sin \theta)} \sin \varphi d\varphi$.

由 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ 得 $\begin{cases} x = \sin \varphi \cos \theta \\ y = \sin \varphi \sin \theta \\ z = \cos \varphi \end{cases}$ 并且

$$E = x_\varphi'^2 + y_\varphi'^2 + z_\varphi'^2 = (\cos \varphi \cos \theta)^2 + (\cos \varphi \sin \theta)^2 + (-\sin \varphi)^2 = 1$$

$$F = x'_\varphi x'_\theta + z'_\varphi x'_\theta + z'_\varphi x'_\theta = -\cos \varphi \cos \theta \cdot \sin \varphi \sin \theta + \cos \varphi \sin \theta \cdot \sin \varphi \cos \theta = 0$$

$$G = x_\theta'^2 + y_\theta'^2 + z_\theta'^2 = (-\sin \varphi \sin \theta)^2 + (\sin \varphi \cos \theta)^2 = \sin \varphi^2$$

那么

$$\sqrt{EG - F^2} = |\sin \varphi| = \sin \varphi \quad (\varphi \in [0, \pi])$$

于是原积分化为

$$I = \iint_{\Sigma} e^{x-y} dS \xrightarrow{\substack{x = \frac{x+y}{\sqrt{2}} \\ y = \frac{x-y}{\sqrt{2}} \\ z = w}} \iint_{\Sigma'} e^{\sqrt{2}u} dS = \iint_{\Sigma'} e^{\sqrt{2}w} dS = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\pi e^{\sqrt{2} \cos \varphi} \sin \varphi d\varphi = \sqrt{2}\pi (e^{\sqrt{2}} - e^{-\sqrt{2}}).$$

第二型曲面积分的计算

定义 6.3.2 (有向曲面). 通常遇到的曲面都是双侧的, 规定正侧的曲面称为有向曲面.

定义 6.3.3 (对坐标的曲面积分 (第二型曲面积分)). 设 Σ 为光滑的有向曲面, $P(x, y, z)$, $Q(x, y, z)$, $R(x, y, z)$ 都是定义在 Σ 上的有界函数, 将曲面 Σ 任意分成 n 个小曲面 ΔS_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 在每个小曲面上任取一点 $N_i(\xi_i, \eta_i, \zeta_i)$, 曲面 Σ 的正侧在点 N_i 处的法向量为

$$\mathbf{n}_i = \cos \alpha_i \mathbf{i} + \cos \beta_i \mathbf{j} + \cos \gamma_i \mathbf{k}$$

有向小曲面 ΔS_i 在 xOy 平面上投影为 $\Delta S_{i,xy} = \Delta S_i \cos \gamma_i$, 如果当各小曲面直径的最大值 $\lambda \rightarrow 0$, 和式 $\sum_{i=1}^n R(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) \Delta S_{i,xy}$ 的极限存在, 则称此极限为函数 $R(x, y, z)$ 沿有向曲面 Σ 的正侧上对坐标 x, y 的曲面积分, 记作 $\iint_{\Sigma} R(x, y, z) dx dy$, 即

$$\iint_{\Sigma} R(x, y, z) dx dy = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n R(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) \Delta S_{i,xy}$$

类似地, 函数 $P(x, y, z)$ 沿有向曲面 Σ 的正侧上对坐标 y, z 的曲面积分

$$\iint_{\Sigma} P(x, y, z) dy dz = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n P(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) \Delta S_{i,yz}$$

其中 $\Delta S_{i,yz} = \Delta S_i \cos \alpha_i$, 函数 $Q(x, y, z)$ 沿有向曲面 Σ 的正侧上对坐标 z, x 的曲面积分

$$\iint_{\Sigma} Q(x, y, z) dz dx = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n Q(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) \Delta S_{i,zx}$$

其中 $\Delta S_{i,zx} = \Delta S_i \cos \beta_i$.

定理 6.3.3. 若 Σ 表示有向曲面的正侧, 该曲面的另一侧为负侧, 记为 Σ^- , 则有

$$\iint_{\Sigma} P dy dz + Q dz dx + R dx dy = - \iint_{\Sigma^-} P dy dz + Q dz dx + R dx dy$$

即当积分曲面改变为相反侧时, 对坐标的曲面积分也要变号.

计算第二类曲面积分的基本方法是通过投影转化为二重积分的计算; 转化过程可概括为“一代二投三定向”. 现以形如 $\iint_{\Sigma} R(x, y, z) dx dy$ 的曲面积分为例, 具体阐述如下:

- (1) 选择 $dx dy$ 中所含的两个变量 x, y 作为自变量, 将曲面积分 Σ 的方程表示为函数 $z = z(x, y)$, 再将函数 $z(x, y)$ 代替 $R(x, y, z)$ 中的变量 z , 则复合二元函数 $R(x, y, z(x, y))$ 就是二重积分的被积函数.

(2) 将曲面 Σ 投影到与 $dxdy$ 这两个变量同名的 xOy 坐标面上, 得投影区域 D_{xy} , 这就是二重积分的积分区域, 这样就把对坐标的曲面积分化为二重积分:

$$\iint_{\Sigma} R(x, y, z) dxdy = \pm \iint_{D_{xy}} R(x, y, z(x, y)) dxdy.$$

(3) 根据题中给定的曲面 Σ 的方向决定上述等式右端的符号. 如果 Σ 取上侧, 应取正号; 反之为负号.

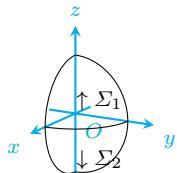
此外, 如果曲面 Σ 上的法向量始终垂直于 z 轴方向 (即曲面的法向量垂直于投影方向), 则曲面积分的值为零.

值得注意的是: 曲面 Σ 的表达式 $z = z(x, y)$ 必须是单值函数, 否则, 应先将 Σ 分成两部分 Σ_1 和 Σ_2 之和: $\Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_2$, 使得 Σ_1 和 Σ_2 的表达式 $z = z(x, y)$ 都是单值函数.

类似的可计算 $\iint_{\Sigma} P(x, y, z) dydz$ 和 $\iint_{\Sigma} Q(x, y, z) dzdx$.

例 6.3.7. 计算 $I = \iint_{\Sigma} xyz dxdy$, $\Sigma : x^2 + y^2 + z^2 = 1 (x, y \geq 0)$ 的外侧.

xOy 平面将 Σ 分为上、下两部分, 分别记作 Σ_1 和 Σ_2 , 如图 6.3.1 所示, 记在 xOy 平面上的投影区域为 D_{xy} ,



$$\begin{aligned} I &= \left(\iint_{\Sigma_1} + \iint_{\Sigma_2} \right) xyz dxdy = \iint_{D_{xy}} xy\sqrt{1-x^2-y^2} dxdy + (-1) \iint_{D_{xy}} xy(-\sqrt{1-x^2-y^2}) dxdy \\ &= 2 \iint_{D_{xy}} xy\sqrt{1-x^2-y^2} dxdy = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_0^1 r^2 \sin \theta \cos \theta \sqrt{1-r^2} r dr \\ &= 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta \cos \theta d\theta \int_0^1 r^3 \sqrt{1-r^2} dr = 1 \cdot \frac{2}{15} = \frac{2}{15}. \end{aligned}$$

图 6.3.1

例 6.3.8. 计算曲面积分 $I = \iint_{\Sigma} \left(\frac{2}{\cos^2 x} + \frac{y}{\cos^2 y} - \frac{1}{\cos^2 z} \right) dS$, 其中 $\Sigma : x^2 + y^2 + z^2 = 1$.

由于 Σ 关于 xOz 面对称, 而 $\frac{y}{\cos^2 y}$ 关于 y 是奇函数, 故 $\iint_{\Sigma} \frac{y}{\cos^2 y} dS = 0$, 由有轮换对称性, 则

$$I = \iint_{\Sigma} \frac{1}{\cos^2 z} dS = 2 \iint_{\Sigma \uparrow} \sec^2 z dS$$

且 $\frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{x}{\sqrt{1-x^2-y^2}}$, $\frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{y}{\sqrt{1-x^2-y^2}}$, 所以 $dS = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{1-x^2-y^2}} dxdy$, 因此

$$\begin{aligned} I &= 2 \iint_{D_{xy}} \sec^2 \sqrt{1-x^2-y^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-x^2-y^2}} dxdy = 2 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 \frac{\sec^2 \sqrt{1-r^2}}{\sqrt{1-r^2}} r dr \\ &\stackrel{\sqrt{1-r^2}=t}{=} 4\pi \int_0^1 \sec^2 t dt = 4\pi \tan t \Big|_0^1 = 4\pi \tan 1 \end{aligned}$$

例 6.3.9. 计算 $\iint_{\Sigma} \frac{dydz}{x} + \frac{dzdx}{y} + \frac{dxdy}{z}$, 式中 Σ 为椭球面 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$ 的外侧.

根据轮换对称性知, 只要计算一个积分, 不妨计算 $\iint_{\Sigma} \frac{dxdy}{z}$, 并令 $\begin{cases} x = a\rho \cos \theta \\ y = b\rho \sin \theta \end{cases}$ 于是

$$\iint_{\Sigma} \frac{dxdy}{z} = \iint_{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \leq 1} \frac{2dxdy}{c\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}} = \frac{2ab}{c} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 \frac{\rho}{\sqrt{1 - \rho^2}} d\rho = 4\pi \frac{ab}{c}$$

于是原式 $= 4\pi \left(\frac{bc}{a} + \frac{ac}{b} + \frac{ab}{c} \right) = \frac{4\pi}{abc} (b^2 c^2 + a^2 c^2 + a^2 b^2)$.

例 6.3.10. 计算 $\iint_{\Sigma} x^2 dydz + y^2 dzdx + z^2 dx dy$, 其中 Σ 为球面 $(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 = R^2$ 的外侧.

根据轮换对称性知, 只要计算一个积分, 不妨计算 $\iint_{\Sigma} z^2 dx dy$,

$$\begin{aligned} \iint_{\Sigma} z^2 dx dy &= \iint_{D_{xy}} \left[c + \sqrt{R^2 - (x-a)^2 - (y-b)^2} \right]^2 dx dy - \iint_{D_{xy}} \left[c - \sqrt{R^2 - (x-a)^2 - (y-b)^2} \right]^2 dx dy \\ &= 4c \iint_{(x-a)^2 + (y-b)^2 \leq R^2} \sqrt{R^2 - (x-a)^2 - (y-b)^2} dx dy = 4c \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^R \sqrt{R^2 - \rho^2} \rho d\rho \\ &= 8\pi c \left[-\frac{1}{3} (R^2 - \rho^2)^{\frac{3}{2}} \right]_0^R = \frac{8}{3} \pi c R^3 \end{aligned}$$

于是原式 $\iint_{\Sigma} x^2 dydz + y^2 dzdx + z^2 dx dy = \frac{8}{3} \pi R^3 (a+b+c)$.

三重积分分部积分

定理 6.3.4 (三重积分分部积分公式). 该定理是定理 6.2.9 推广到三维的形式, 设 Ω 是由一张或几张分片光滑的双侧封闭曲面围成的空间有界闭区域, 若 u, v 在闭区域 Ω 上有连续的一阶偏导数, 则

$$\begin{cases} \iiint_{\Omega} u \frac{\partial v}{\partial x} dx dy dz = \iint_{\partial\Omega} uv dy dz - \iiint_{\Omega} v \frac{\partial u}{\partial x} dx dy dz, \\ \iiint_{\Omega} u \frac{\partial v}{\partial y} dx dy dz = \iint_{\partial\Omega} uv dz dx - \iiint_{\Omega} v \frac{\partial u}{\partial y} dx dy dz, \\ \iiint_{\Omega} u \frac{\partial v}{\partial z} dx dy dz = \iint_{\partial\Omega} uv dx dy - \iiint_{\Omega} v \frac{\partial u}{\partial z} dx dy dz. \end{cases}$$

例 6.3.11 (第八届数学竞赛决赛). 设函数 $f(x, y, z)$ 在区域 $\Omega = \{(x, y, z) | x^2 + y^2 + z^2 \leq 1\}$ 上具有连续的二阶偏导数, 且满足

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

计算 $I = \iiint_{\Omega} \left(x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} \right) dx dy dz$.

因为

$$\iiint_{\Omega} u \frac{\partial v}{\partial x} dx dy dz = \iint_{\partial\Omega} uv dy dz - \iiint_{\Omega} v \frac{\partial u}{\partial x} dx dy dz$$

$$\begin{aligned}\iiint_{\Omega} u \frac{\partial v}{\partial y} dx dy dz &= \iint_{\partial \Omega} uv dz dx - \iiint_{\Omega} v \frac{\partial u}{\partial y} dx dy dz \\ \iiint_{\Omega} u \frac{\partial v}{\partial z} dx dy dz &= \iint_{\partial \Omega} uv dx dy - \iiint_{\Omega} v \frac{\partial u}{\partial z} dx dy dz\end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned}I &= \iint_{x^2+y^2+z^2=1} \left(\frac{x^2+y^2+z^2}{2} \cdot \frac{\partial f}{\partial x} dy dz + \frac{x^2+y^2+z^2}{2} \cdot \frac{\partial f}{\partial y} dz dx + \frac{x^2+y^2+z^2}{2} \cdot \frac{\partial f}{\partial z} dx dy \right) \\ &\quad - \iint_{x^2+y^2+z^2 \leq 1} \left[\frac{x^2+y^2+z^2}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right) \right] dx dy dz \\ &= \frac{1}{2} \iint_{x^2+y^2+z^2=1} \left(\frac{\partial f}{\partial x} dy dz + \frac{\partial f}{\partial y} dz dx + \frac{\partial f}{\partial z} dx dy \right) - \frac{1}{2} \iint_{x^2+y^2+z^2 \leq 1} (x^2+y^2+z^2)^{\frac{3}{2}} dx dy dz \\ &= \frac{1}{2} \iint_{x^2+y^2+z^2 \leq 1} \sqrt{x^2+y^2+z^2} [1 - (x^2+y^2+z^2)] dx dy dz = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\pi d\varphi \int_0^1 \rho (1-\rho^2) \rho^2 \sin \varphi d\rho = \frac{\pi}{6}.\end{aligned}$$

例 6.3.12. 设函数 $f(x, y, z)$ 在 $\Omega = \{(x, y, z) | x^2 + y^2 + z^2 \leq 1\}$ 上具有连续的二阶偏导数, 且满足

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}$$

$$\text{求极限 } \lim_{r \rightarrow 0^+} \frac{\iint_{x^2+y^2+z^2 \leq r^2} \left(\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{z}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \frac{\partial f}{\partial z} \right) dV}{\sin r (\tan r - \sin r)^2}.$$

记 $\Omega_r : x^2 + y^2 + z^2 \leq r^2$, 由三重积分分部积分公式:

$$\iint_{\Omega_r} \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \frac{\partial f}{\partial x} dV = \iint_{\partial \Omega_r} \sqrt{x^2+y^2+z^2} \frac{\partial f}{\partial x} dy dz - \iint_{\Omega_r} \sqrt{x^2+y^2+z^2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} dV$$

同理可得,

$$\begin{aligned}&\iint_{\Omega_r} \left(\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{z}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \frac{\partial f}{\partial z} \right) dV \\ &= \iint_{\partial \Omega_r} \sqrt{x^2+y^2+z^2} \left(\frac{\partial f}{\partial x} dy dz + \frac{\partial f}{\partial y} dz dx + \frac{\partial f}{\partial z} dx dy \right) - \iint_{\Omega_r} \sqrt{x^2+y^2+z^2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right) dV \\ &= \iint_{\Omega_r} \left(r - \sqrt{x^2+y^2+z^2} \right) \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right) dV = \iint_{\Omega_r} \left(r - \sqrt{x^2+y^2+z^2} \right) (x^2+y^2+z^2)^{\frac{3}{2}} dV \\ &= \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\pi \sin \varphi d\varphi \int_0^r (r-\rho) \rho^5 d\rho = \frac{2\pi r^7}{21}\end{aligned}$$

且 $\sin r (\tan r - \sin r)^2 \sim r \left(r + \frac{r^3}{3} - r + \frac{r^3}{6} \right) = \frac{r^7}{4}$, $r \rightarrow 0^+$, 故原极限 $= \frac{8\pi}{21}$.

第二型曲面积分的分部积分公式

定理 6.3.5 (第二型曲面积分的分部积分公式). 设光滑曲面 Σ 的边界曲线 Γ 按段光滑, 函数 $P_i(x, y, z)$, $Q_i(x, y, z)$, $R_i(x, y, z)$ ($i = 1, 2$) 在 Σ (连同 Γ) 上有连续的一阶偏导数, 则

$$\iint_{\Sigma} \left(R_1 \frac{\partial R_2}{\partial y} - Q_1 \frac{\partial Q_2}{\partial z} \right) dy dz + \left(P_1 \frac{\partial P_2}{\partial z} - R_1 \frac{\partial R_2}{\partial x} \right) dz dx + \left(Q_1 \frac{\partial Q_2}{\partial x} - P_1 \frac{\partial P_2}{\partial y} \right) dx dy$$

$$\begin{aligned}
&= \oint_{\Gamma} P_1 P_2 dx + Q_1 Q_2 dy + R_1 R_2 dz - \iint_{\Sigma} \left(R_2 \frac{\partial R_1}{\partial y} - Q_2 \frac{\partial Q_1}{\partial z} \right) dy dz \\
&\quad + \left(P_2 \frac{\partial P_1}{\partial z} - R_2 \frac{\partial R_1}{\partial x} \right) dz dx + \left(Q_2 \frac{\partial Q_1}{\partial x} - P_2 \frac{\partial P_1}{\partial y} \right) dx dy
\end{aligned}$$

其中 Σ 的方向与 Γ 的方向满足右手定则.

证 由 Stokes 公式

$$\oint_{\Gamma} P_1 P_2 dx = \iint_{\Sigma} \frac{\partial}{\partial z} (P_1 P_2) dz dx - \frac{\partial}{\partial y} (P_1 P_2) dx dy = \iint_{\Sigma} P_1 \left(\frac{\partial P_2}{\partial z} dz dx - \frac{\partial P_2}{\partial y} dx dy \right) + \iint_{\Sigma} P_2 \left(\frac{\partial P_1}{\partial z} dz dx - \frac{\partial P_1}{\partial y} dx dy \right)$$

移项得

$$\iint_{\Sigma} P_1 \left(\frac{\partial P_2}{\partial z} dz dx - \frac{\partial P_2}{\partial y} dx dy \right) = \oint_{\Gamma} P_1 P_2 dx - \iint_{\Sigma} P_2 \left(\frac{\partial P_1}{\partial z} dz dx - \frac{\partial P_1}{\partial y} dx dy \right)$$

同理可得

$$\begin{aligned}
\iint_{\Sigma} Q_1 \left(\frac{\partial Q_2}{\partial x} dx dy - \frac{\partial Q_2}{\partial z} dy dz \right) &= \oint_{\Gamma} Q_1 Q_2 dy - \iint_{\Sigma} Q_2 \left(\frac{\partial Q_1}{\partial x} dx dy - \frac{\partial Q_1}{\partial z} dy dz \right) \\
\iint_{\Sigma} R_1 \left(\frac{\partial R_2}{\partial y} dy dz - \frac{\partial R_2}{\partial x} dz dx \right) &= \oint_{\Gamma} R_1 R_2 dz - \iint_{\Sigma} R_2 \left(\frac{\partial R_1}{\partial y} dy dz - \frac{\partial R_1}{\partial x} dz dx \right)
\end{aligned}$$

三式相加即得证.

6.3.2 Gauss 公式、Stokes 公式

Gauss 公式与 Stokes 公式, 它们都是重要的数学定理, 用于描述向量场在不同维度下的积分关系.

1. Gauss 公式: 高斯公式是关于向量场的散度的一个重要定理, 也称为散度定理.
2. Stokes 公式: 斯托克斯公式是关于向量场的旋度的一个定理, 描述了曲面和曲线之间的关系.

Gauss 公式

定理 6.3.6 (Gauss 公式). 设空间封闭区域 Ω 由分片光滑闭曲面 Σ 所围成, $P(x, y, z), Q(x, y, z)$ 与 $R(x, y, z)$ 在 Ω 内具有连续的一阶偏导数, 则

$$\iint_{\Sigma} P dy dz + Q dz dx + R dx dy = \iiint_{\Omega} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} \right) dV$$

这里 Σ 是 Ω 的整个边界曲线的外侧.

例 6.3.13. 设光滑曲面 S 是有界区域 V 的边界, $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$ 为曲面 S 的外法线的方向余弦.

(1) $\iint_S x^3 dy dz + y^3 dz dx + z^3 dx dy.$ (3) $\iint_S \frac{x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} dS.$	(2) $\iint_S xy dx dy + xz dz dx + yz dy dz.$ (4) $\iint_S \left(\frac{\partial u}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial u}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial u}{\partial z} \cos \gamma \right) dS.$
---	--

(1) 因为 $\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} = 3(x^2 + y^2 + z^2)$, 所以

$$\iint_S x^3 dy dz + y^3 dz dx + z^3 dx dy = 3 \iiint_V (x^2 + y^2 + z^2) dx dy dz.$$

(2) 因为 $\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} = 0$, 所以 $\iint_S xy dx dy + xz dz dx + yz dy dz = 0$.

(3) 因为 $\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} = \frac{y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{x^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{x^2 + y^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}$, 所以

$$\iint_S \frac{x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} dS = 2 \iiint_V \frac{dxdydz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}.$$

(4) 因为 $\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \Delta u$, 所以

$$\iint_S \left(\frac{\partial u}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial u}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial u}{\partial z} \cos \gamma \right) dS = \iiint_V \Delta u dxdydz.$$

例 6.3.14. 求 $\iint_S x^2 dy dz + y^2 dz dx + z^2 dx dy$, 其中 S 为立方体 $0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq a, 0 \leq z \leq a$ 的外表面.

$$\text{原式} = 2 \iiint_V (x + y + z) dxdydz = 2 \int_0^a dx \int_0^a dy \int_0^a (x + y + z) dz = 3a^4.$$

例 6.3.15. 求 $\iint_S x^3 dy dz + y^3 dz dx + z^3 dx dy$, 其中 S 为球 $x^2 + y^2 + z^2 = a^2$ 的外表面.

$$\text{原式} = 3 \iiint_V (x^2 + y^2 + z^2) dxdydz = 3 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\pi d\varphi \int_0^a r^4 \sin \varphi dr = \frac{12\pi}{5} a^5.$$

例 6.3.16. 计算 $\iint_S (x^2 \cos \alpha + y^2 \cos \beta + z^2 \cos \gamma) dS$, 其中 S 为部分圆锥面 $x^2 + y^2 = z^2 (0 \leq z \leq h)$, $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$ 为曲面 S 的外法线的方向余弦.

合并 $S_1 : z = h, x^2 + y^2 \leq h^2$ 组成封闭曲面: $S + S_1$, 它是空间区域 V 的边界, 那么

$$\begin{aligned} I &= \iint_{S+S_1} (x^2 \cos \alpha + y^2 \cos \beta + z^2 \cos \gamma) dS = 2 \iiint_V (x + y + z) dxdydz \\ &= 2 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^h \rho d\rho \int_\rho^h (\rho \cos \theta + \rho \sin \theta + z) dz = \frac{\pi h^4}{2} \end{aligned}$$

$$\text{又因为 } \iint_{S_1} (x^2 \cos \alpha + y^2 \cos \beta + z^2 \cos \gamma) dS = h^2 \iint_{x^2+y^2 \leq h^2} dxdy = \pi h^4, \text{ 所以原式} = I - \pi h^4 = -\frac{\pi h^4}{2}.$$

例 6.3.17. 证明公式:

$$\frac{d}{dt} \left[\iint_{x^2+y^2+z^2 \leq t^2} \iiint f(x, y, z, t) dxdydz \right] = \iint_{x^2+y^2+z^2=t^2} f(x, y, z, t) dS + \iiint_{x^2+y^2+z^2 \leq t^2} \frac{\partial f}{\partial t} dxdydz \quad (t > 0)$$

证 作变量代换 $x = tu, y = tv, z = tw$, 则

$$I = \frac{d}{dt} \left[\iint_{x^2+y^2+z^2 \leq t^2} \iiint f(x, y, z, t) dxdydz \right] = \frac{d}{dt} \left[\iint_{u^2+v^2+w^2 \leq 1^2} \iiint t^3 f(tu, tv, tw, t) du dv dw \right]$$

$$\begin{aligned}
&= \iiint_{u^2+v^2+w^2 \leq 1} \left[t^3 \left(\frac{\partial f}{\partial x} u + \frac{\partial f}{\partial y} v + \frac{\partial f}{\partial z} w + \frac{\partial f}{\partial t} \right) + 3t^2 f \right] du dv dw \\
&= \iiint_{u^2+v^2+w^2 \leq 1} t^3 \left\{ \frac{1}{t} \left[\frac{\partial}{\partial x} (fx) + \frac{\partial}{\partial y} (fy) + \frac{\partial}{\partial z} (fz) \right] \right\} du dv dw + \iiint_{u^2+v^2+w^2 \leq 1} t^3 \frac{\partial f}{\partial t} du dv dw \\
&= \frac{1}{t} \iiint_{x^2+y^2+z^2 \leq t^2} \left[\frac{\partial}{\partial x} (fx) + \frac{\partial}{\partial y} (fy) + \frac{\partial}{\partial z} (fz) \right] dx dy dz + \iiint_{x^2+y^2+z^2 \leq t^2} \frac{\partial f}{\partial t} dx dy dz \\
&= \frac{1}{t} \iint_{x^2+y^2+z^2 \leq t^2} (fx \cos \alpha + fy \cos \beta + fz \cos \gamma) dS + \iiint_{x^2+y^2+z^2 \leq t^2} \frac{\partial f}{\partial t} dx dy dz (t > 0)
\end{aligned}$$

其中 $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$ 为球面 $x^2 + y^2 + z^2 = t^2$ 上向外法线的方向余弦, 显然

$$\cos \alpha = \frac{x}{t}, \cos \beta = \frac{y}{t}, \cos \gamma = \frac{z}{t}$$

于是

$$\iint_{x^2+y^2+z^2=t^2} (fx \cos \alpha + fy \cos \beta + fz \cos \gamma) dS = \iint_{x^2+y^2+z^2=t^2} f \cdot \frac{x^2+y^2+z^2}{t} dS = t \iint_{x^2+y^2+z^2=t^2} f dS$$

即得证.

例 6.3.18. 设 Σ 为曲面 $z = \sqrt{x^2 + y^2}$ ($1 \leq x^2 + y^2 \leq 4$) 的下侧, $f(x)$ 是连续函数, 计算

$$I = \iint_{\Sigma} [xf(xy) + 2x - y] dy dz + [yf(xy) + 2y + x] dz dx + [zf(xy) + z] dx dy.$$

错解. 补 $\Sigma_1 : x^2 + y^2 \leq 1, z = 1$ 方向取下侧, $\Sigma_2 : x^2 + y^2 \leq 4, z = 2$ 方向取上侧, 后用 Gauss 公式, 下略.

错因: 题目说 f 连续, 并没有说它可导, 所以 $f'(xy)$ 不一定存在, 因此不能使用 Gauss 公式.

曲面 Σ 在 xOy 面上的投影区域为 $D = \{(x, y) \mid 1 \leq x^2 + y^2 \leq 4\}$, 且 $\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}$, 并且

$$\iint_{\Sigma} P dy dz + Q dz dx + R dx dy = \iint_{\Sigma} (P, Q, R)(-f'_x, -f'_y, 1) dx dy$$

于是

$$\begin{aligned}
I &= - \iint_D \left\{ [xf(xy) + 2x - y] \left(-\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) + [yf(xy) + 2y + x] \left(-\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) + [f(xy) + 1]\sqrt{x^2 + y^2} \right\} dx dy \\
&= \iint_D \sqrt{x^2 + y^2} dx dy = \int_0^{2\pi} d\theta \int_1^2 |r| \cdot r dr \stackrel{r \geq 0}{=} 2\pi \int_1^2 r^2 dr = \frac{14}{3}\pi.
\end{aligned}$$

例 6.3.19. 设 Σ 为任意闭曲面,

$$I = \iint_{\Sigma} \left(x - \frac{1}{3}x^3 \right) dy dz - \frac{4}{3}y^3 dz dx + \left(3y - \frac{1}{3}z^3 \right) dx dy$$

(1) 证明 Σ 为椭球面 $x^2 + 4y^2 + z^2 = 1$ 时, I 达到最大值;

(2) 求 I 的最大值 I_{max} .

(1) 令 $P = x - \frac{1}{3}x^3, Q = -\frac{4}{3}y^3, R = 3y - \frac{1}{3}z^3$, 那么

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} = 1 - x^2 - 4y^2 - z^2$$

由 Gauss 定理知, $I = \iiint_{\Omega} (1 - x^2 - 4y^2 - z^2) dx dy dz$, 为使 I 最大, 要求 Ω 是使得 $1 - x^2 - 4y^2 - z^2 \geq 0$ 的最大空

间区域, 即

$$\Omega = \{(x, y, z) \mid 1 - x^2 - 4y^2 - z^2 \geq 0\}$$

Σ 是 Ω 的表面, 即为椭球面 $x^2 + 4y^2 + z^2 = 1$.

(2) 即求 $I = \iiint_{x^2+4y^2+z^2 \leq 1} (1-x^2-4y^2-z^2) dx dy dz$, 令 $\begin{cases} x = r \sin \varphi \cos \theta \\ y = \frac{r}{2} \sin \varphi \sin \theta \\ z = r \cos \varphi \end{cases}$ 则有

$$|J| = \left| \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(r, \varphi, \theta)} \right| = \begin{vmatrix} \sin \varphi \cos \theta & r \cos \varphi \cos \theta & -r \sin \varphi \sin \theta \\ \frac{1}{2} \sin \varphi \sin \theta & \frac{r}{2} \cos \varphi \sin \theta & \frac{r}{2} \sin \varphi \cos \theta \\ \cos \varphi & -r \sin \varphi & 0 \end{vmatrix} = \frac{1}{2} r^2 \sin \varphi$$

因此

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\pi \sin \varphi d\varphi \int_0^1 (1-r^2) r^2 dr = \frac{1}{2} \cdot 2\pi \cdot 2 \int_0^1 (r^2 - r^4) dr = \frac{4\pi}{15}.$$

例 6.3.20. 求曲面积分

$$I = \iint_{\Sigma} 4xz dy dz - 2yz dz dx + (1-z^2) dx dy$$

其中 Σ 是由 $z = e^y$ ($0 \leq y \leq 1$) 绕 z 轴旋转一周所得的曲面, 方向取下侧.

取 $\Sigma_1 : x^2 + y^2 \leq 1$, $z = e$, 方向取上侧, 则由 Gauss 公式得,

$$\begin{aligned} I &= \left(\iint_{\Sigma + \Sigma_1} - \iint_{\Sigma_1} \right) [4xz dy dz - 2yz dz dx + (1-z^2) dx dy] = - \iint_{\Sigma_1} 4xz dy dz - 2yz dz dx + (1-z^2) dx dy \\ &= - \iint_{x^2+y^2 \leq 1} (1-z^2) dx dy = (e^2 - 1)\pi. \end{aligned}$$

例 6.3.21. 计算 $\iint_{\Sigma} \frac{ax dy dz + (z+a)^2 dx dy}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}}$, 其中 Σ 为下半球面 $z = -\sqrt{a^2 - x^2 - y^2}$ 上侧, a 为大于零的常数.

取 $\Sigma_1 : z = 0, x^2 + y^2 \leq a^2$, 方向取上侧, 并记 $\Sigma + \Sigma_1$, 围成的有界闭区域为 Ω , 于是

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} = 1 + 0 + \frac{2z+2a}{a} = 3 + \frac{2}{a}z$$

于是由 Gauss 公式得

$$\begin{aligned} \iint_{\Sigma^- + \Sigma_1} x dy dz + \frac{(z+a)^2}{a} dx dy &= \iiint_{\Omega} \left(3 + \frac{2}{a}z \right) dV = 3 \iiint_{\Omega} dV + \frac{2}{a} \iiint_{\Omega} zdV \\ &= 3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi a^3 + \frac{2}{a} \int_0^{2\pi} d\theta \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} d\varphi \int_0^a \rho \cos \varphi \cdot \rho^2 \sin \varphi d\rho = 2\pi a^3 + \frac{4\pi}{a} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \sin \varphi \cos \varphi d\varphi \int_0^a \rho^3 d\rho \\ &= 2\pi a^3 - \frac{\pi a^3}{2} = \frac{3\pi a^3}{2} \end{aligned}$$

于是

$$\iint_{\Sigma} = \iint_{\Sigma_1} - \iint_{\Sigma^- + \Sigma_1} = a \iint_D dx dy - \frac{3\pi a^3}{2} = -\frac{\pi a^3}{2}.$$

例 6.3.22. 计算曲面积分

$$I = \iint_{\Sigma^+} (x+y-z) dy dz + [2y + \sin(z+x)] dz dx + (3z + e^{x+y}) dx dy$$

其中 Σ^+ 为曲面 $|x-y+z| + |y-z+x| + |z-x+y| = 1$ 的外表面.

由 Gauss 公式得 $I = \iiint_{\Omega} (1+2+3) dV$, 其中 Ω 为 $|x-y+z| + |y-z+x| + |z-x+y| \leq 1$, 作旋转变换 $\begin{cases} u = x-y+z \\ v = y-z+x \\ w = z-x+y \end{cases}$
此时 Σ 变成 $|u| + |v| + |w| = 1$, 并且有

$$J = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(u, v, w)} = \frac{1}{\frac{\partial(u, v, w)}{\partial(x, y, z)}} = \frac{1}{\begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \end{vmatrix}} = \frac{1}{4}$$

$$\text{故}^1 I = \frac{3}{2} \iiint_{\Omega'} dV = \frac{3}{2} \times 8 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{2} \times 1 = 2.$$

例 6.3.23. 计算曲面积分 $\iint_{\Sigma} (x^2 + y) dy dz + (y^2 + z) dy dz + (z^2 + x) dx dy$, 其中 Σ 为下半椭球面

$$\frac{(x-1)^2}{a^2} + \frac{(y-2)^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, z \leq 0$$

的上侧.

补一平面 $S: \frac{(x-1)^2}{a^2} + \frac{(y-2)^2}{b^2} \leq 1, z=0$ 方向取下侧, 由 Gauss 公式, 得

$$\iint_{\Sigma} + \iint_S = \iint_{\Sigma+S} = - \iint_{(\Sigma+S)^-} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} \right) dV = -2 \iiint_{\Omega} (x+y+z) dV$$

其中 $P = x^2 + y, Q = y^2 + z, R = z^2 + x, \Omega = \left\{ (x, y, z) \mid \frac{(x-1)^2}{a^2} + \frac{(y-2)^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \leq 1 \right\}$, 并且注意到

$$\iiint_{\Omega} x dV = \bar{x} \cdot V = 1 \cdot \frac{4}{3} \pi abc = \frac{4}{3} \pi abc, \iiint_{\Omega} y dV = \bar{y} \cdot V = 2 \cdot \frac{4}{3} \pi abc = \frac{8}{3} \pi abc$$

用截面法求 $\iiint_{\Omega} z dV$,

$$\iiint_{\Omega} z dV = \int_{-c}^0 z dz \iint_{\frac{(x-1)^2}{a^2} + \frac{(y-1)^2}{b^2} \leq 1 - \frac{z^2}{c^2}} dx dy = \pi ab \int_{-c}^0 \left(1 - \frac{z^2}{c^2} \right) z dz = -\frac{\pi abc^2}{4}$$

又

$$\iint_S (x^2 + y) dy dz + (y^2 + z) dy dz + (z^2 + x) dx dy = \iint_S (z^2 + x) dx dy = - \iint_D (z^2 + x) d\sigma = - \iint_D x d\sigma = -\bar{x} \cdot A = -\pi ab$$

所以

$$\iint_{\Sigma} = - \iint_{(\Sigma+S)^-} - \iint_S = -2 \left(\frac{4}{3} \pi abc + \frac{8}{3} \pi abc - \frac{\pi abc^2}{4} \right) + \pi ab = \pi ab \left(\frac{c^2}{2} - 8c + 1 \right).$$

例 6.3.24. 计算曲面积分

$$I = \iint_{\Sigma^+} \frac{x dy dz + y dz dx + z dx dy}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)^3}}$$

其中 $\Sigma^+: 1 - \frac{z}{7} = \frac{(x-2)^2}{25} + \frac{(y-1)^2}{16} (z \geq 0)$ 的上侧.

¹因为有 8 个卦限, 每个卦限中均为正四面体, 故体积为 $8 \times \frac{1}{6}$.

用 Σ_1^+ 表示以原点为中心, ε 为半径的上半球面, Σ_1^- 则表示内侧, Σ_2^- 表示 $\frac{(x-2)^2}{25} + \frac{(y-1)^2}{16} \leq 1$ 的下表面, σ^- 表示 $x^2 + y^2 \leq \varepsilon^2$ 的下表面, 由 Gauss 公式得

$$\begin{aligned} I &= \iint_{\Sigma^+} \frac{x \mathrm{d}y \mathrm{d}z + y \mathrm{d}z \mathrm{d}x + z \mathrm{d}x \mathrm{d}y}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)^3}} = \left(\iint_{\Sigma^+ + \Sigma_1^- + \Sigma_2^-} - \iint_{\Sigma_1^-} - \iint_{\Sigma_2^-} \right) \frac{x \mathrm{d}y \mathrm{d}z + y \mathrm{d}z \mathrm{d}x + z \mathrm{d}x \mathrm{d}y}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)^3}} \\ &= \iiint_{\Omega} 0 \mathrm{d}V + \iint_{\Sigma_1^+} \frac{x \mathrm{d}y \mathrm{d}z + y \mathrm{d}z \mathrm{d}x + z \mathrm{d}x \mathrm{d}y}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)^3}} - \iint_{\Sigma_2^-} \frac{x \mathrm{d}y \mathrm{d}z + y \mathrm{d}z \mathrm{d}x + z \mathrm{d}x \mathrm{d}y}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)^3}} \\ &= \frac{1}{\varepsilon^3} \iint_{\Sigma_1^+} x \mathrm{d}y \mathrm{d}z + y \mathrm{d}z \mathrm{d}x + z \mathrm{d}x \mathrm{d}y = \frac{1}{\varepsilon^3} \left(\iint_{\Sigma_1^+ + \sigma^-} - \iint_{\sigma^-} \right) x \mathrm{d}y \mathrm{d}z + y \mathrm{d}z \mathrm{d}x + z \mathrm{d}x \mathrm{d}y \\ &= \frac{3}{\varepsilon^3} \iiint_{\substack{x^2 + y^2 + z^2 \leq \varepsilon^2 \\ z \geq 0}} \mathrm{d}V = \frac{3}{\varepsilon^3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi \varepsilon^3 = 2\pi. \end{aligned}$$

例 6.3.25. 求 $I = \iint_{\Sigma} \frac{ax \mathrm{d}y \mathrm{d}z + 2(x+a)y \mathrm{d}z \mathrm{d}x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + 1}}$, 且 $\Omega = \{(x, y, z) | -\sqrt{a^2 - x^2 - y^2} \leq z \leq 0, a > 0\}$, Σ 为 Ω 的边界曲面外侧.

$$I = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}} \iint_{\Sigma} ax \mathrm{d}y \mathrm{d}z + 2(x+a)y \mathrm{d}z \mathrm{d}x, \text{ 记 } \Sigma_1 : z = 0 (x^2 + y^2 \leq a^2), \text{ 取上侧}.$$

$$\begin{aligned} \iint_{\Sigma_1 + \Sigma} ax \mathrm{d}y \mathrm{d}z + 2(x+a)y \mathrm{d}z \mathrm{d}x &= \iiint_{\Omega} (3a + 2x) \mathrm{d}x \mathrm{d}y \mathrm{d}z \\ &= 3a \iiint_{\Omega} \mathrm{d}v + 2 \int_0^{2\pi} \mathrm{d}\theta \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \mathrm{d}\varphi \int_0^a r \cos \theta \sin \varphi \cdot r^2 \sin \varphi \mathrm{d}r \\ &= 3a \cdot \frac{4}{3} \pi a^3 \cdot \frac{1}{2} + 0 = 2\pi a^4 \end{aligned}$$

那么

$$\begin{aligned} \iint_{\Sigma} &= \iint_{\Sigma_1 + \Sigma} - \iint_{\Sigma_1} = 2\pi a^4 - \iint_{\Sigma_1} ax \mathrm{d}y \mathrm{d}z + 2(x+a)y \mathrm{d}z \mathrm{d}x = 2\pi a^4 - 2 \iint_{\Sigma_1} (x+a)y \mathrm{d}z \mathrm{d}x \\ &= 2\pi a^4 - 2 \iint_{D_{xz}} (x+a) \sqrt{a^2 - x^2} \mathrm{d}z \mathrm{d}x = 2\pi a^4 \end{aligned}$$

$$\text{所以 } I = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}} \cdot \iint_{\Sigma} ax \mathrm{d}y \mathrm{d}z + 2(x+a)y \mathrm{d}z \mathrm{d}x = \frac{2\pi a^4}{\sqrt{a^2 + 1}}.$$

例 6.3.26. 已知点 $A(1, 0, 0)$ 与点 $B(1, 1, 1)$, Σ 是由直线 \overline{AB} 绕 z 轴旋转一周而成的旋转曲面介于平面 $z = 0$ 与 $z = 1$ 之间部分的外侧, 函数 $f(x)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 内具有连续导数, 计算曲面积分

$$I = \iint_{\Sigma} [xf(xy) - 2x] \mathrm{d}y \mathrm{d}z + [y^2 - yf(xy)] \mathrm{d}z \mathrm{d}x + (z+1)^2 \mathrm{d}x \mathrm{d}y.$$

易得旋转曲面方程为 $x^2 + y^2 = 1 + z^2 (0 \leq z \leq 1)$, 添加以下辅助面:

$$\Sigma_0 : x^2 + y^2 \leq 1, z = 0, \text{ 方向向下}$$

$$\Sigma_1 : x^2 + y^2 \leq 1, z = 1, \text{ 方向向上}$$

并且令 $P = xf(xy) - 2x$, $Q = y^2 - yf(xy)$, $R = (z+1)^2$, 那么

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} = 2y + 2z$$

由 Gauss 公式得,

$$\begin{aligned} I &= \left(\iint_{\Sigma + \Sigma_0 + \Sigma_1} - \iint_{\Sigma_0} - \iint_{\Sigma_1} \right) [(xf(xy) - 2x)dydz + (y^2 - yf(xy))dzdx + (z+1)^2dxdy] \\ &= \iiint_{\Omega} (2y + 2z)dV - (-\pi) - (8\pi) = 2 \iiint_{\Omega} zdV - 7\pi = 2 \int_0^1 zdz \iint_{x^2+y^2 \leq 1+z^2} d\sigma - 7\pi = \frac{3}{2}\pi - 7\pi = -\frac{11\pi}{2}. \end{aligned}$$

例 6.3.27. 求 $I = \iint_{\Sigma} \frac{dS}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4} + \frac{z^2}{c^4}}}$, 其中曲面 Σ 是方程

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (a, b, c > 0)$$

确定的椭球面.

记 $F(x, y, z) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1 = 0$, 取 \vec{n} 为曲面 Σ 指向外侧的法向量, 则

$$\vec{n} = (F'_x, F'_y, F'_z) = \left(\frac{2x}{a^2}, \frac{2y}{a^2}, \frac{2z}{a^2} \right)$$

对应的单位向量, 即方向余弦构成的向量为

$$\begin{aligned} \vec{n}^\circ &= \frac{1}{\sqrt{\frac{4x^2}{a^4} + \frac{4y^2}{a^4} + \frac{4z^2}{a^4}}} \left(\frac{2x}{a^2}, \frac{2y}{a^2}, \frac{2z}{a^2} \right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{a^4} + \frac{z^2}{a^4}}} \left(\frac{x}{a^2}, \frac{y}{a^2}, \frac{z}{a^2} \right) = (\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma) \end{aligned}$$

于是

$$\begin{aligned} I &= \iint_{\Sigma} \frac{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4} + \frac{z^2}{c^4}}} dS = \iint_{\Sigma} \frac{\left(\frac{x}{a^2}, \frac{y}{b^2}, \frac{z}{c^2} \right)}{\sqrt{\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4} + \frac{z^2}{c^4}}} \cdot \frac{(x, y, z)}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} dS \\ &= \iint_{\Sigma} \frac{x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} dS = \iint_{\Sigma} \frac{x dy dz + y dz dx + z dx dy}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \end{aligned}$$

补 $\Sigma_\varepsilon : x^2 + y^2 + z^2 = \varepsilon^2$ ($\varepsilon > 0$), 取内侧, Ω_ε 是 Σ_ε 所围成立体区域, 因此

$$\begin{aligned} I &= \left(\iint_{\Sigma + \Sigma_\varepsilon} - \iint_{\Sigma_\varepsilon} \right) \frac{x dy dz + y dz dx + z dx dy}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = - \iint_{\Sigma_\varepsilon} \frac{x dy dz + y dz dx + z dx dy}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \\ &= -\frac{1}{\varepsilon^2} \iint_{\Sigma_\varepsilon} x dy dz + y dz dx + z dx dy = \frac{3}{\varepsilon^3} \iiint_{\Omega_\varepsilon} dV = \frac{3}{\varepsilon^3} \cdot \frac{4}{3} \pi \varepsilon^3 = 4\pi. \end{aligned}$$

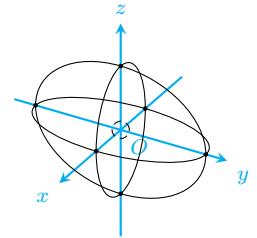


图 6.3.2

例 6.3.28. (第十一届数学竞赛决赛) 设 Ω 是由光滑简单封闭曲面 Σ 围成的有界闭区域, 函数 $f(x, y, z)$ 在 Ω 上具有连续二阶导数, 且 $f(x, y, z)|_{(x,y,z) \in \Sigma} = 0$, 记 ∇f 为 $f(x, y, z)$ 的梯度, 并令

$$\Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2},$$

证明, 对任意常数 $C > 0$, 恒有

$$C \iiint_{\Omega} f^2 dxdydz + \frac{1}{C} \iiint_{\Omega} (\Delta f)^2 dxdydz \geq 2 \iiint_{\Omega} |\nabla f|^2 dxdydz$$

证由 *Gauss* 公式, 得

$$\iint_{\Sigma} f \frac{\partial f}{\partial x} dy dz + f \frac{\partial f}{\partial y} dz dx + f \frac{\partial f}{\partial z} dx dy = \iiint_{\Omega} (f \Delta f + |\nabla f|^2) dx dy dz$$

因为 $f(x, y, z)|_{(x,y,z) \in \Sigma} = 0$, 所以上式左端等于 0.

$$\iiint_{\Omega} |\nabla f|^2 dx dy dz = - \iiint_{\Omega} f \Delta f dx dy dz \leq \left(\iiint_{\Omega} f^2 dx dy dz \right)^{\frac{1}{2}} \left(\iiint_{\Omega} (\Delta f)^2 dx dy dz \right)^{\frac{1}{2}}$$

故对任意的 C 均有,

$$C \iiint_{\Omega} f^2 dx dy dz + \frac{1}{C} \iiint_{\Omega} (\Delta f)^2 dx dy dz \geq 2 \left(\iiint_{\Omega} f^2 dx dy dz \right)^{\frac{1}{2}} \left(\iiint_{\Omega} (\Delta f)^2 dx dy dz \right)^{\frac{1}{2}} \geq 2 \iiint_{\Omega} |\nabla f|^2 dx dy dz$$

例 6.3.29. 设 $f(x, y, z)$ 在 Σ 上的连续函数, 且满足

$$f(x, y, z) = (x + y + z)^2 + \iint_{\Sigma} f(x, y, z) dy dz + x^2 dx dy$$

其中 $\Sigma : x^2 + y^2 = 5z$ ($0 \leq z \leq 1$), 方向为下侧, 求 $f(x, y, z)$ 的表达式.

令 $\iint_{\Sigma} f(x, y, z) dy dz = A$, 并且

$$\iint_{\Sigma} x^2 dx dy = - \iint_{x^2+y^2 \leq 5} x^2 dx dy = - \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\sqrt{5}} \rho^2 \cos^2 \theta \rho d\rho = - \frac{25\pi}{4}$$

于是, $f(x, y, z) = (x + y + z)^2 + A - \frac{25\pi}{4}$, 两边积分得

$$A = \iint_{\Sigma} f(x, y, z) dy dz = \iint_{\Sigma} \left[(x + y + z)^2 + A - \frac{25\pi}{4} \right] dy dz$$

添加一平面 $\Sigma_1 : z = 1, x^2 + y^2 \leq 5$, 方向取上侧, 则由 *Gauss* 公式

$$\iint_{\Sigma + \Sigma_1} \left[(x + y + z)^2 + A - \frac{25\pi}{4} \right] dy dz = \iiint_{\Omega} 2(x + y + z) dV = 2 \iiint_{\Omega} z dV = 2 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\sqrt{5}} r dr \int_{\frac{r^2}{5}}^1 z dz = \frac{10\pi}{3}$$

且 $\iint_{\Sigma_1} \left[(x + y + z)^2 + A - \frac{25\pi}{4} \right] dy dz = 0$, 所以 $A = \frac{10\pi}{3}$, 于是 $f(x, y, z) = (x + y + z)^2 - \frac{35}{12}\pi$.

Stokes 公式

定理 6.3.7 (Stokes 积分法). 设 Σ 是逐段光滑的单闭曲线 Γ 所包围的非封闭光滑双侧曲面, 取某定侧 Σ^+ , 按右手规则确定 Γ 的正向 Γ^+ , Ω 是空间的立体区域, 使得 $\Sigma \subset \Omega$, 函数 P, Q, R 在 Ω 上连续可微, 则有 Stokes 公式:

$$\begin{aligned} & \oint_{\Gamma^+} P(x, y, z) dx + Q(x, y, z) dy + R(x, y, z) dz \\ &= \iint_{\Sigma^+} \left(\frac{\partial R}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial z} \right) dy dz + \left(\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial R}{\partial x} \right) dz dx + \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy \\ &= \iint_{\Sigma^+} \begin{vmatrix} dy dz & dz dx & dx dy \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ P & Q & R \end{vmatrix} = \iint_{\Sigma^+} \begin{vmatrix} \cos \alpha & \cos \beta & \cos \gamma \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ P & Q & R \end{vmatrix} dS \end{aligned}$$

定理 6.3.8. 空间曲线积分与路径无关的充要条件: 设 G 是空间的面单连通区域, 函数 P, Q, R 在 G 上连续可微, 则下列四条陈述相互等价:

$$(1) \forall (x, y, z) \in \Omega, \frac{\partial R}{\partial y} = \frac{\partial Q}{\partial z}, \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial R}{\partial x}, \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial y};$$

$$(2) \forall A, B \in \Omega, \int_A^B P dx + Q dy + R dz \text{ 与路线无关;}$$

$$(3) \forall \Gamma \subset \Omega, \Gamma \text{ 为封闭曲线, } \oint_{\Gamma} P dx + Q dy + R dz = 0;$$

$$(4) \text{ 存在可微函数 } u(x, y, z), \text{ 使得 } du = P dx + Q dy + R dz, \text{ 且}$$

$$u(x, y, z) = \int_{x_0}^x P(x, y_0, z_0) dx + \int_{y_0}^y Q(x, y, z_0) dy + \int_{z_0}^z R(x, y, z) dz + C$$

或

$$u(x, y, z) = \int_{x_0}^x P(x, y, z) dx + \int_{y_0}^y Q(x, y, z) dy + \int_{z_0}^z R(x_0, y_0, z) dz + C$$

这里 $(x_0, y_0, z_0), (x, y, z) \in G$.

例 6.3.30. 计算 $I = \int_{\Gamma} (y - z) dx + (z - x) dy + (x - y) dz$, 其中 Γ 是柱面 $x^2 + y^2 = R^2$ 和平面 $x + z = R$ 相交的椭圆, 且从 x 轴正向看去, Γ 的方向是逆时针的.

设 Σ 为平面 $x + y = R$ 被柱面截下部分的上侧, 则由 Stokes 公式, 有

$$\begin{aligned} I &= \iint_{\Sigma} \begin{vmatrix} dy dz & dz dx & dx dy \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ P & Q & R \end{vmatrix} = \iint_{\Sigma} -2dy dz - 2dz dx - 2dx dy \\ &= -2 \iint_{D_{yz}} dy dz - 2 \iint_{D_{zx}} dz dx - 2 \iint_{D_{xy}} dx dy = -2\pi R^2 - 0 - 2\pi R^2 = -4\pi R^4. \end{aligned}$$

例 6.3.31 (第九届数学竞赛预赛). 设曲线 Γ 为在 $x^2 + y^2 + z^2 = 1, x + z = 1, x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0$ 上从 $A(1, 0, 0)$ 到 $B(0, 0, 1)$ 的一段, 求 $I = \oint_{\Gamma} y dx + z dy + x dz$.

记 Γ_1 为 B 到 A 的直线段, 则

$$x = t, y = 0, z = 1 - t, 0 \leq t \leq 1$$

$$\int_{\Gamma_1} y dx + z dy + x dz = \int_0^1 t d(1-t) = -\frac{1}{2}$$

$$\begin{aligned} \oint_{\Gamma+\Gamma_1} y dx + z dy + x dz &= \iint_{\Sigma} \begin{vmatrix} dy dz & dz dx & dx dy \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ P & Q & R \end{vmatrix} = \iint_{\Sigma} -dxdy - dz dx - dy dz \\ &= - \iint_{D_{xy}} dxdy - \iint_{D_{zx}} dz dx - \iint_{D_{yz}} dy dz = -\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \end{aligned}$$

$$I = \oint_{\Gamma+\Gamma_1} - \int_{\Gamma_1} = \oint_{\Gamma} y dx + z dy + x dz = \frac{1}{2} - \frac{\pi}{2\sqrt{2}}.$$

例 6.3.32 (2001 数一). 计算

$$I = \oint_L (y^2 - z^2) dx + (2z^2 - x^2) dy + (3x^2 - y^2) dz$$

其中 L 是平面 $x + y + z = 2$ 与柱面 $|x| + |y| = 1$ 的交线, 从 z 轴正方向看去, L 为逆时针方向.

设 Σ 为平面 $x + y + z = 2$ 的上侧被 L 所围成的部分, Σ 在 xOy 面的投影区域为

$$D_{xy} = \{(x, y) \mid |x| + |y| \leq 1\}$$

Σ 的单位向量为 $\frac{1}{\sqrt{3}}\{1, 1, 1\}$, 于是由 Stokes 公式得

$$\begin{aligned} I &= \iint_{\Sigma} \left| \begin{array}{ccc} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ y^2 - z^2 & 2z^2 - x^2 & 3x^2 - y^2 \end{array} \right| dS = -\frac{2}{\sqrt{3}} \iint_{\Sigma} (4x + 2y + 3z) dS \\ &= -\frac{2}{\sqrt{3}} \iint_{D_{xy}} (x - y + 6) \sqrt{1 + (z'_x)^2 + (z'_y)^2} dx dy = -2 \iint_{D_{xy}} (x - y + 6) dx dy \end{aligned}$$

由二重积分的对称性知 $\iint_{D_{xy}} (x - y) dx dy = 0$, 所以 $I = -12 \iint_{D_{xy}} dx dy = -24$.

例 6.3.33. 求曲线积分

$$I = \oint_L (y - z) dx + (z - x) dy + (x - y) dz$$

其中 L 是两球面

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1 \quad (x - 1)^2 + (y - 1)^2 + (z - 1)^2 = 4$$

的交线, 积分方向从 z 轴正向看为逆时针方向.

由 $\begin{cases} x^2 &+ y^2 &+ z^2 &= 1 \\ (x - 1)^2 &+ (y - 1)^2 &+ (z - 1)^2 &= 4 \end{cases} \Rightarrow x + y + z = 0$, 平面 $x + y + z = 0$ 上, 曲线 L 所包围的圆域为 Σ , 即

$$\Sigma = \{(x, y, z) \mid x + y + z = 0, x^2 + y^2 + z^2 \leq 1\}$$

于是, 由 Stokes 公式得

$$\begin{aligned} I &= \iint_{\Sigma} \left| \begin{array}{ccc} \cos \alpha & \cos \beta & \cos \gamma \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ y - z & z - x & x - y \end{array} \right| dS = -2 \iint_{\Sigma} (\cos \alpha + \cos \beta + \cos \gamma) dS \\ &= -\frac{6}{\sqrt{3}} \iint_{\Sigma} dS = -\frac{6}{\sqrt{3}} \cdot \pi \cdot 1^2 = -2\sqrt{3}\pi. \end{aligned}$$

例 6.3.34. 设 L 为空间某封闭光滑曲线, P, Q, R 为空间中具有一阶连续偏导数的函数, 证明:

$$\left| \oint_{L^+} P dx + Q dy + R dz \right| \leq \max_{(x,y,z) \in S} \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial R}{\partial x} \right)^2} \cdot S$$

其中 S 表示 L 上展开的 (以 L 为边界的) 某曲面, 同时也用它表示曲面的面积.

证 由 Cauchy-Schwarz 不等式,

$$\begin{aligned} \text{左端} &\stackrel{\text{Stokes}}{=} \iint_S [(R'_y - Q'_z) \cos \alpha + (P'_z - R'_x) \cos \beta + (Q'_x - P'_y) \cos \gamma] dS \\ &\leq \iint_S \sqrt{[(R'_y - Q'_z)^2 + (P'_z - R'_x)^2 + (Q'_x - P'_y)^2]} \cdot (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma) dS \\ &\leq \max_{(x,y,z) \in S} \sqrt{(R'_y - Q'_z)^2 + (P'_z - R'_x)^2 + (Q'_x - P'_y)^2} \cdot \iint_S dS = \text{右端} \end{aligned}$$

例 6.3.35. 设 $f(x)$ 一阶连续可导,

$$R(x, y, z) = \int_0^{x^2+y^2} f(z-t) dt$$

曲面 Σ 为抛物面 $z = x^2 + y^2$ 被平面 $y + z = 1$ 所截的下面部分的内侧, L 为 Σ 的正向边界, 求

$$I = \oint_L 2xz f(z - x^2 - y^2) dx + [x^3 + 2yz f(z - x^2 - y^2)] dy + R(x, y, z) dz.$$

证 记 $P(x, y, z) = 2xz f(z - x^2 - y^2)$, $Q(x, y, z) = x^3 + 2yz f(z - x^2 - y^2)$, 则

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial y} &= -4xyzf'(z - x^2 - y^2), \quad \frac{\partial P}{\partial z} = 2x(f(z - x^2 - y^2) + zf'(z - x^2 - y^2)) \\ \frac{\partial Q}{\partial x} &= 3x^2 - 4xyzf'(z - x^2 - y^2), \quad \frac{\partial Q}{\partial z} = 2y(f(z - x^2 - y^2) + zf'(z - x^2 - y^2)) \end{aligned}$$

令 $u = z - t$, 则 $dt = -du$, 于是 $R(x, y, z) = \int_{z-x^2-y^2}^z f(u) du$,

$$\frac{\partial R}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{z-x^2-y^2}^z f(u) du \right) = 2xf(z - x^2 - y^2), \quad \frac{\partial R}{\partial y} = 2yf(z - x^2 - y^2)$$

于是

$$\begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial z} &= -2yzf'(z - x^2 - y^2) = -2yzf'(0) \\ \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial R}{\partial x} &= 2xzf'(z - x^2 - y^2) = 2xzf'(0) \\ \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} &= 3x^2 \end{aligned}$$

则由 Stokes 公式知,

$$\begin{aligned} I &= \iint_{\Sigma} \left(\frac{\partial R}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial z} \right) dy dz + \left(\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial R}{\partial x} \right) dz dx + \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy \\ &= \iint_{\Sigma} -2yzf'(0) dy dz + 2xzf'(0) dz dx + 3x^2 dx dy \end{aligned}$$

补面 $\Sigma_1 : \begin{cases} y + z = 1 \\ z = x^2 + y^2 \end{cases}$, 方向取下侧, 由 Gauss 公式可知,

$$\begin{aligned} I &= \left(\iint_{\Sigma + \Sigma_1} - \iint_{\Sigma_1} \right) (-2yzf'(0) dy dz + 2xzf'(0) dz dx + 3x^2 dx dy) \\ &= - \iint_{\Sigma_1} (-2yzf'(0) dy dz + 2xzf'(0) dz dx + 3x^2 dx dy) = 3 \iint_{x^2 + (y + \frac{1}{2})^2 \leq \frac{5}{4}} x^2 dx dy \end{aligned}$$

令 $\begin{cases} x = \frac{\sqrt{5}}{2}\rho \cos \theta \\ y = \frac{\sqrt{5}}{2}\rho \sin \theta - \frac{1}{2} \end{cases}$, 于是 $\frac{\partial(x, y)}{\partial(\rho, \theta)} = \frac{5}{4}\rho$, 所以 $I = 3 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 \frac{5}{4}\rho^2 \cos^2 \theta \frac{5}{4}\rho d\rho = \frac{75\pi}{64}$.

6.4 多元积分学的应用与场论概述

场论是物理学中的一个重要分支, 主要研究空间中的场的性质和相互作用. 场可以是标量场 (只有大小没有方向) 或者矢量场 (有大小和方向), 描述了空间中各个点的物理量. 在场论中, 多元积分学的概念和方法经常被用来描述和计算场的性质和相互作用.

6.4.1 多元积分学的应用

下表是各积分的应用公式及物理意义.

应用	积分形式			
	二重积分	三重积分	曲线积分	曲面积分
几何量	平面面积 $S = \iint_D dxdy$	立体体积 $V = \iiint_{\Omega} dxdydz$	弧长 $L = \int_L ds$	曲面面积 $S = \iint_{\Sigma} dS$
质量	$m = \iint_D \rho(x, y) dxdy$	$m = \iiint_{\Omega} \rho(x, y, z) dxdydz$	$m = \int_L \rho(x, y, z) ds$	$m = \iint_{\Sigma} \rho(x, y, z) dS$
质心	$\bar{x} = \frac{\iint_D x \rho(x, y) dxdy}{m}$ $\bar{y} = \frac{\iint_D y \rho(x, y) dxdy}{m}$	$\bar{x} = \frac{\iiint_{\Omega} x \rho(x, y, z) dxdydz}{m}$ $\bar{y} = \frac{\iiint_{\Omega} y \rho(x, y, z) dxdydz}{m}$ $\bar{z} = \frac{\iiint_{\Omega} z \rho(x, y, z) dxdydz}{m}$	$\bar{x} = \frac{\int_L x \rho(x, y, z) ds}{m}$ $\bar{y} = \frac{\int_L y \rho(x, y, z) ds}{m}$ $\bar{z} = \frac{\int_L z \rho(x, y, z) ds}{m}$	$\bar{x} = \frac{\iint_{\Sigma} x \rho(x, y, z) dS}{m}$ $\bar{y} = \frac{\iint_{\Sigma} y \rho(x, y, z) dS}{m}$ $\bar{z} = \frac{\iint_{\Sigma} z \rho(x, y, z) dS}{m}$
转动惯量	$I_x = \iint_D y^2 \cdot \rho dxdy$ $I_y = \iint_D x^2 \cdot \rho dxdy$ $I_0 = I_x + I_y$	$I_x = \iiint_{\Omega} (y^2 + z^2) \cdot \rho dxdydz$ $I_y = \iiint_{\Omega} (x^2 + z^2) \cdot \rho dxdydz$ $I_z = \iiint_{\Omega} (x^2 + y^2) \cdot \rho dxdydz$ $I_0 = I_x + I_y + I_z$	$I_x = \int_L (y^2 + z^2) \cdot \rho ds$ $I_y = \int_L (x^2 + z^2) \cdot \rho ds$ $I_z = \int_L (x^2 + y^2) \cdot \rho ds$ $I_0 = I_x + I_y + I_z$	$I_x = \iint_{\Sigma} (y^2 + z^2) \cdot \rho dS$ $I_y = \iint_{\Sigma} (x^2 + z^2) \cdot \rho dS$ $I_z = \iint_{\Sigma} (x^2 + y^2) \cdot \rho dS$ $I_0 = I_x + I_y + I_z$
通量				$\Phi = \iint_{\Sigma} P dy dz + Q dz dx + R dx dy$ 向量场: $\mathbf{F} = P\mathbf{i} + Q\mathbf{j} + R\mathbf{k}$
变力做功			$W = \int_L P dx + Q dy + R dz$	力: $\mathbf{F} = P\mathbf{i} + Q\mathbf{j} + R\mathbf{k}$

例 6.4.1. 设 C 是曲线 $x^2 + y^2 = 2(x + y)$, 求 $\oint_C (2x^2 + 3y^2) ds$.

由轮换对称性, 以及形心公式得: $\oint_C (2x^2 + 3y^2) ds = 5 \oint_C x^2 ds = 5 \oint_C y^2 ds = \frac{5}{2} \oint_C (x^2 + y^2) ds = 5 \oint_C (x + y) ds = 5(\bar{x} + \bar{y}) \oint_C ds = 5(\bar{x} + \bar{y}) \cdot 2\pi r = 20\sqrt{2}\pi$.

例 6.4.2. 设 V 是曲面 $z = \sqrt{1 - x^2 - y^2}$ 与曲面 $z = \sqrt{x^2 + y^2} - 1$ 所围成的立体,

$$(1) \text{ 计算 } I = \iiint_V (\sqrt{2}x + z)^2 dV;$$

$$(2) \text{ 若流速场 } \mathbf{v} = (P, Q, R), \text{ 其中 } P = \frac{x}{r_0^{\frac{3}{2}}}, Q = \frac{y}{r_0^{\frac{3}{2}}}, R = \frac{z}{r_0^{\frac{3}{2}}}, r_0 = x^2 + y^2 + z^2, \text{ 求 } \mathbf{v} \text{ 由 } V \text{ 内部流向外部的流量.}$$

(1) 将 $(\sqrt{2}x + z)^2$ 展开, 并且注意到 $2\sqrt{2}xz$ 关于 x 为奇函数, 且被积空间关于 xOy 面对称, 又有 x 与 y 轮换对此, 则

$$I = \iiint_V (2x^2 + z^2 + 2\sqrt{2}xz) dV = \iiint_V (x^2 + y^2 + z^2) dV = \iiint_{V_1} (x^2 + y^2 + z^2) dV + \iiint_{V_2} (x^2 + y^2 + z^2) dV$$

其中 V_1 为曲面 $z = \sqrt{1 - x^2 - y^2}$ 与 xOy 面所围成的空间, V_2 为曲面 $z = \sqrt{x^2 + y^2} - 1$ 与 xOy 面所围成的空间, 则

$$I_1 = \iiint_{V_1} (x^2 + y^2 + z^2) dV = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi d\varphi \int_0^1 r^2 \cdot r^2 dr = \frac{2\pi}{5}$$

$$\begin{aligned}
I_2 &= \iiint_{V_2} (x^2 + y^2 + z^2) dV = \int_{-1}^0 dz \iint_{D_{xy}} (x^2 + y^2 + z^2) dx dy = \int_{-1}^0 \left[\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{z+1} (r^2 + z^2) r dr \right] dz \\
&= 2\pi \int_{-1}^0 \left[\frac{1}{4}(z+1)^4 + \frac{1}{2}z^2(z+1)^2 \right] dz = \frac{2\pi}{15}
\end{aligned}$$

故 $I = I_1 + I_2 = \frac{8\pi}{15}$.

(2) 流量 $\Phi = \iint_S P dy dz + Q dz dx + R dx dy$, S 取外侧, 所以 $\Phi = \iint_S \frac{x dy dz + y dx dz + z dx dy}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}$, 记 $S_1 : x^2 + y^2 + z^2 = \varepsilon^2$
其中方向向内, 则

$$\Phi = \iint_S = \iint_{S+S_1-S_1} = \iint_{S+S_1} + \iint_{S_1^-}$$

并且

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{y^2 + z^2 - 2x^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}}, \quad \frac{\partial Q}{\partial y} = \frac{x^2 + z^2 - 2y^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}}, \quad \frac{\partial R}{\partial z} = \frac{x^2 + y^2 - 2z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}}$$

因此 $\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} = 0$, 则有 Gauss 公式 $\iint_{S+S_1} \frac{x dy dz + y dx dz + z dx dy}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = 0$, 且

$$\Phi' = \iint_{S_1^-} \frac{x dy dz + y dx dz + z dx dy}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{\varepsilon^3} \iint_{S_1^-} x dy dz + y dz dx + z dx dy = \frac{3}{\varepsilon^3} \iiint_{\Omega_\varepsilon} dV = 4\pi$$

因此 $\Phi = 4\pi$.

定义 6.4.1 (环流量). 设有向量场

$$\mathbf{A}(x, y, z) = P(x, y, z)\mathbf{i} + Q(x, y, z)\mathbf{j} + R(x, y, z)\mathbf{k}$$

其中函数 P 、 Q 与 R 均连续, Γ 是 \mathbf{A} 的定义域内的一条分段光滑的有向闭曲线, τ 是 Γ 在点 (x, y, z) 处的单位切向量, 则积分

$$\oint_{\Gamma} \mathbf{A} \cdot \tau ds$$

称为向量场 \mathbf{A} 沿有向曲线 Γ 的环流量.

例 6.4.3. 设向量场 $\mathbf{A}(x, y, z) = (z^2, x^2, y^2)$, 以点 $M_0(1, 1, 0)$ 为圆心, ε 为半径, 在 xOy 面上作一圆盘 Σ_ε , 面积为 σ_ε , Γ 为该圆盘的正向边界, τ 为 Γ 上点 (x, y, z) 处的单位切向量, 求 $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \oint_{\Gamma} \mathbf{A} \cdot \tau ds$.

由题意知 $\sigma_\varepsilon = \pi\varepsilon^2$, 并且由 Stokes 公式得

$$\begin{aligned}
\oint_{\Gamma} \mathbf{A} \cdot \tau ds &= \oint_{\Gamma} z^2 dx + x^2 dy + y^2 dz = \iint_{\Sigma_\varepsilon} \begin{vmatrix} dy dz & dz dx & dx dy \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ z^2 & x^2 & y^2 \end{vmatrix} = \iint_{\Sigma_\varepsilon} 2y dy dz + 2x dx dy + 2z dz dx \\
&= \iint_{(x-1)^2 + (y-1)^2 \leq \varepsilon^2} 2x dx dy = 2 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\varepsilon (r \cos \theta + 1) r dr = 2\pi\varepsilon^2
\end{aligned}$$

$$\text{于是 } \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \oint_{\Gamma} \mathbf{A} \cdot \tau ds = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{2\pi\varepsilon^2}{\pi\varepsilon^2} = 2.$$

6.4.2 梯度、散度和旋度

定义 6.4.2 (Hamilton 算符). $\nabla := \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) := \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}$ 为一向量算符.

利用 Hamilton 算符, 可以写出梯度、散度和旋度的定义.

定义 6.4.3. 设 $u = u(x, y, z)$ 为光滑的数量场 (“光滑” 指 $u(x, y, z)$ 有连续偏导数),

$$\mathbf{A} = P(x, y, z)\mathbf{i} + Q(x, y, z)\mathbf{j} + R(x, y, z)\mathbf{k}$$

为光滑的向量场 (“光滑” 指 P, Q, R 有连续偏导数), 则由 u 和 \mathbf{A} 产生的梯度、散度和旋度为:

$$\begin{aligned}\mathbf{grad} \, u &:= \nabla u := \left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) := \frac{\partial u}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial u}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial u}{\partial z} \mathbf{k} \\ \operatorname{div} \mathbf{A} &:= \nabla \cdot \mathbf{A} := \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} \\ \operatorname{rot} \mathbf{A} &:= \nabla \times \mathbf{A} := \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ P & R & Q \end{vmatrix}.\end{aligned}$$

例 6.4.4. 设 $u = z(x^2 + 3)$, 求向量场 $\mathbf{A} = \nabla u$ 通过球面 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ 上半部分的流量 Q , 指向球外.

因为 $\mathbf{A} = \nabla u = \frac{\partial u}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial u}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial u}{\partial z} \mathbf{k} = 2xz\mathbf{i} + (x^2 + 3)\mathbf{k}$, 所以

$$Q = \iint_{\Sigma} \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} \circ dS = \iint_{\Sigma} 2xz dy dz + (x^2 + 3) dx dy$$

取 $\Sigma_1 : x^2 + y^2 \leq 1$ 方向竖直向下, $D : \{(x, y) \mid x^2 + y^2 \leq 1\}$, 则

$$Q = \iint_{\Sigma + \Sigma_1 - \Sigma_1^-} = \iint_{\Sigma + \Sigma_1} + \iint_{\Sigma_1^-}$$

其中, 由 Gauss 公式 $\iint_{\Sigma + \Sigma_1} 2xz dy dz + (x^2 + 3) dx dy = \iiint_{\Omega} 2z dV = 2 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi \cos \varphi d\varphi \int_0^1 r^3 dr = \frac{\pi}{2}$, 且

$$\begin{aligned}\iint_{\Sigma_1^-} 2xz dy dz + (x^2 + 3) dx dy &= \iint_D (x^2 + 3) dx dy = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^1 (r^2 \cos^2 \theta + 3) r dr \\ &= \frac{1}{4} \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta + \frac{3}{2} \int_0^{2\pi} d\theta = \frac{\pi}{4} + 3\pi\end{aligned}$$

因此 $Q = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} + 3\pi = \frac{15\pi}{4}$.

定理 6.4.1 (方向导数与 Hamilton 算符). 设 $u = u(x, y, z)$, 则函数 $u(x, y, z)$ 的方向导数计算公式为

$$\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} = \nabla u \cdot \mathbf{n} = \frac{\partial u}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial u}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial u}{\partial z} \cos \gamma$$

其中 $\mathbf{n} = \{\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma\}$.

例 6.4.5 (2005 数一). 设函数 $u(x, y, z) = 1 + \frac{x^2}{6} + \frac{y^2}{12} + \frac{z^2}{18}$, 单位向量 $\mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{3}}\{1, 1, 1\}$, 求 $\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{(1,2,3)}$.

$$\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{(1,2,3)} = \frac{\partial u}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial u}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial u}{\partial z} \cos \gamma \Big|_{(1,2,3)} = 3 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{3}.$$

6.4.3 梯度、散度、旋度的基本公式及其应用

以下 u, v, f 都是 (x, y, z) 的函数, 有连续偏导数, \mathbf{A}, \mathbf{B} 是向量函数, c 为常数,

$$\mathbf{r} = (x - x_0, y - y_0, z - z_0), r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}.$$

关于梯度的公式

$$(1) \nabla(cu) = c\nabla u$$

$$(2) \nabla(u \pm v) = \nabla u \pm \nabla v$$

$$(3) \nabla(uv) = v\nabla u + u\nabla v$$

$$(4) \nabla\left(\frac{u}{v}\right) = \frac{v\nabla u - u\nabla v}{v^2}$$

$$(5) \nabla(f(u)) = f'(u)\nabla u$$

$$(6) \nabla(f(u, v)) = f'_u \nabla u + f'_v \nabla v$$

$$(7) \nabla(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{r}}{r}$$

$$(8) \nabla(f(r)) = f'(r) \frac{\mathbf{r}}{r}$$

关于散度的公式

$$(9) \nabla \cdot (c\mathbf{A}) = c\nabla \cdot \mathbf{A}$$

$$(10) \nabla \cdot (\mathbf{A} \pm \mathbf{B}) = \nabla \cdot \mathbf{A} \pm \nabla \cdot \mathbf{B}$$

$$(11) \nabla \cdot (u\mathbf{A}) = u\nabla \cdot \mathbf{A} + \nabla u \cdot \mathbf{A}$$

$$(12) \nabla \cdot \mathbf{r} = 3$$

关于旋度的公式

$$(13) \nabla \times (c\mathbf{A}) = c\nabla \times \mathbf{A}$$

$$(14) \nabla \times (\mathbf{A} \pm \mathbf{B}) = \nabla \times \mathbf{A} \pm \nabla \times \mathbf{B}$$

$$(15) \nabla \times (u\mathbf{A}) = u\nabla \times \mathbf{A} + \nabla u \times \mathbf{A}$$

$$(16) \nabla \times \mathbf{r} = \mathbf{0}$$

混合运算

$$(17) \nabla(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}) = \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \mathbf{A} \times (\nabla \times \mathbf{B}) + (\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{A} + (\mathbf{A} \cdot \nabla)\mathbf{B}$$

$$(18) \nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) - \mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B})$$

$$(19) \nabla \times (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{A} \nabla \cdot \mathbf{B} - \mathbf{B} \nabla \cdot \mathbf{A} + (\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{A} - (\mathbf{A} \cdot \nabla)\mathbf{B}$$

$$(20) \nabla \cdot (\nabla u) = \Delta u = \nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$(21) \nabla \times (\nabla u) = \mathbf{0}$$

$$(22) \nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0$$

$$(23) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) = \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \Delta \mathbf{A} \quad (24) \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \Delta \mathbf{A}$$

注意

$$(\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{A} = \left(B_x \frac{\partial}{\partial x} + B_y \frac{\partial}{\partial y} + B_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \mathbf{A}, (\mathbf{A} \cdot \nabla)\mathbf{B} = \left(A_x \frac{\partial}{\partial x} + A_y \frac{\partial}{\partial y} + A_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \mathbf{B}$$

定义 6.4.4 (Laplace 算符). $\Delta := \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, 并且有

$$\nabla^2 := \nabla \cdot \nabla := \Delta$$

f 为函数, 则 $\nabla^2 f$ 为标量; 若 $\mathbf{A} = (A_x, A_y, A_z)$ 是向量, 则 $\nabla^2 \mathbf{A} = (\nabla^2 A_x, \nabla^2 A_y, \nabla^2 A_z)$ 为向量.

例 6.4.6 (2001 数一). 设 $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, 求 $\operatorname{div}(\operatorname{grad} r)|_{(1,-2,2)}$.

$$\text{原式} = \nabla \cdot \nabla r|_{(1,-2,2)} = \nabla^2 r|_{(1,-2,2)} = \frac{\partial^2 r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 r}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 r}{\partial z^2}|_{(1,-2,2)} = \frac{2}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}|_{(1,-2,2)} = \frac{2}{3}.$$

例 6.4.7 (2012 数一). 计算 $\text{grad}\left(xy + \frac{z}{y}\right)\Big|_{(2,1,1)}$.

$$\nabla\left(xy + \frac{z}{y}\right)\Big|_{(2,1,1)} = y\nabla x + x\nabla y + \frac{y\nabla z - z\nabla y}{y^2}\Big|_{(2,1,1)} = (y, x, 0) + \frac{(0, -z, y)}{y^2}\Big|_{(2,1,1)} = (1, 1, 1).$$

例 6.4.8. 求向量场 $\mathbf{A} = 2x^3yz\mathbf{i} - x^2y^2z\mathbf{j} - x^2yz^2\mathbf{k}$ 的散度 $\nabla \cdot \mathbf{A}$ 在点 $M(1, 1, 2)$ 处沿方向 $\mathbf{l} = (2, 2, -1)$ 的方向导数 $\frac{\partial}{\partial l}(\nabla \cdot \mathbf{A})\Big|_M$.

设 $P = 2x^3yz$, $Q = -x^2y^2z$, $R = -x^2yz^2$, 那么

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} = 6x^2yz - 2x^2yz - 2x^2yz = 2x^2yz$$

并且

$$\frac{\partial}{\partial l}(\nabla \cdot \mathbf{A})\Big|_M = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A})\Big|_M \cdot \mathbf{l}^\circ = \nabla(2x^2yz)\Big|_M \cdot \mathbf{l}^\circ = (4xyz, 2x^2z, 2x^2y)\Big|_M \cdot \frac{1}{3}(2, 2, -1) = \frac{22}{3}.$$

例 6.4.9. 设 $\nabla \cdot [\nabla f(r)] = 0$, 求 $f(r)$.

$$\begin{aligned} \text{原式} &= \nabla \cdot \left[f'(r) \frac{\mathbf{r}}{r} \right] = \frac{f'(r)}{r} \nabla \cdot \mathbf{r} + \nabla \frac{f'(r)}{r} \cdot \mathbf{r} = 3 \frac{f'(r)}{r} + \frac{r \nabla f'(r) - f'(r) \nabla r}{r^2} \mathbf{r} = 3 \frac{f'(r)}{r} + \frac{f''(r) \cdot \mathbf{r} - f'(r) \cdot \frac{\mathbf{r}}{r}}{r^2} \mathbf{r} = \\ &= f''(r) + 2 \frac{f'(r)}{r} = 0, \text{解微分方程, 可得 } f(r) = \frac{C_1}{r} + C_0. \end{aligned}$$

第7章

无穷级数

“数学主要的目标是公众的利益和自然现象的解释。”

——傅立叶

无穷级数是指一个包含无限个项的级数。这些项可以是数字、变量或函数，它们按照一定的规律相加或相乘。无穷级数在数学中有着重要的应用，例如在微积分中用于求和、逼近和积分等问题。

无穷级数可以是收敛的，也可以是发散的。如果一个无穷级数的部分和随着项数的增加趋于一个有限的数，那么这个级数是收敛的；反之，如果部分和趋于无穷大或没有确定的极限，那么这个级数是发散的。

一些著名的无穷级数包括调和级数、几何级数、幂级数等。无穷级数的性质和收敛性通常可以通过级数的收敛定理、比较判别法、积分判别法等方法来确定。

无穷级数也是高等数学的基本内容之一，它包含常数项级数与函数项级数，而在函数项级数中，我们讨论的是幂级数和傅里叶级数。每个常数项级数都与数列之间存在着一一对应关系，但二者讨论的侧重点不同，常数项级数侧重于讨论敛散性，这也是研究生入门考试主要考察的内容之一。幂级数的收敛域及和函数是本章的另一个重点内容。

7.1 常数项级数

7.1.1 常数项级数的敛散性及其判别法

在高等数学中，常数项级数是指由实数列 $\{a_n\}$ 所构成的表达式：

$$a_1 + a_2 + \cdots + a_n + \cdots = \sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

其中 a_n 称为级数的一般项。

令 $S_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n$, 则称 S_n 为级数的部分和, 而称 $\{S_n\}$ 为级数的部分和数列. 若 $S_n \rightarrow S(n \rightarrow \infty)$, 则称级数收敛, 并称其收敛于和 S , 而称 $r_n = S - S_n$ 为级数的余项, 否则就称级数发散.

研究一个级数是收敛还是发散, 称为级数的审敛.

定理 7.1.1 (级数收敛的必要条件). 若级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$.

为了迅速而又准确地判断一个级数的敛散性, 掌握以下几个已知其敛散性的级数往往是有益的.

定理 7.1.2 (几何级数). 若有几何级数 $\sum_{n=1}^{\infty} ar^n$, 那么当 $|r| < 1$ 时收敛, 且其和为 $\frac{a}{1-r}$; 当 $|r| \geq 1$ 时发散.

定理 7.1.3 (调和级数). 称 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$ 为调和级数, 并且该级数是发散的.

定理 7.1.4 (p-级数). 若有 p-级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^p}$, 那么当 $p > 1$ 时收敛, 当 $p \leq 1$ 时发散.

例 7.1.1. 级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{1+\frac{1}{n}}}$ 的敛散性的下列结论中, 正确的是

- | | |
|--|--|
| A. 因 $1 + \frac{1}{n} > 1$ 故级数收敛 | B. 因 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^{1+\frac{1}{n}}} = 0$ 故级数收敛 |
| C. 因 $\frac{1}{n^{1+\frac{1}{n}}} < \frac{1}{n}$ 故级数收敛 | D. 级数发散 |

p -级数中的 p 表示为常数, 与 n 无关, 所以选项 A 错误, 事实上, $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n^{1+\frac{1}{n}}}}{\frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^{\frac{1}{n}}} = 1$, 其中 $\lim_{n \rightarrow \infty} n^{\frac{1}{n}} = 1$ (重要极限), 则原级数的敛散性与 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$ 同敛散, 又 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$ 发散, 故级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{1+\frac{1}{n}}}$ 发散, 选 D.

此外, 级数还有 4 个基本性质:

- (1) 去掉级数前面有限项或者在级数前面添加有限项, 不影响级数的敛散性;
- (2) 对于任意非零常数 c , 级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 与 $\sum_{n=1}^{\infty} ca_n$ 具有相同的敛散性;
- (3) 若级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 与 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 都收敛, 它们的和分别为 s 与 t , 则 $\sum_{n=1}^{\infty} (a_n \pm b_n)$ 收敛且和为 $s \pm t$;
- (4) 收敛级数任意加括号后所成的级数仍然收敛, 且其和不变.

例 7.1.2. 判别级数的敛散性 $\sum_{n=1}^{\infty} \ln(1+2^n) \ln \frac{n+1}{n}$.

将所给级数的一般项作适当变形, 有

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

可见, $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \ln 2$, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \neq 0$, 不满足级数收敛的必要条件, 故级数发散.

7.1.2 正项级数的审敛法

定理 7.1.5 (正项级数收敛的充要条件). 正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛的充要条件是其部分和数列 $\{s_n\}$ 有上界.

定理 7.1.6 (比较审敛法). 设 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n, \sum_{n=1}^{\infty} v_n$ 是两个正项级数, 且 $u_n \leq v_n (n = 1, 2, \dots)$, 若 $\sum_{n=1}^{\infty} v_n$ 收敛,

则 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛; 若 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 发散, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} v_n$ 发散 (“大收敛, 小发散”).

特别地, 条件 $u_n \leq v_n (n = 1, 2, \dots)$ 可改为 $u_n \leq cv_n (n \geq k, c > 0)$, 结论仍然成立.

定理 7.1.7 (比较审敛法的极限形式). 设 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n, \sum_{n=1}^{\infty} v_n$ 是两个正项级数, 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_n}{v_n} = l$, 则有

(1) 当 $0 < l < +\infty$ 时, $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 与 $\sum_{n=1}^{\infty} v_n$ 同收敛或同发散;

(2) 当 $l = 0$ 且 $\sum_{n=1}^{\infty} v_n$ 收敛时, $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 也收敛;

(3) 当 $l = +\infty$ 且 $\sum_{n=1}^{\infty} v_n$ 发散时, $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 也发散.

例 7.1.3 (2009 数一). 设有两个数列 $\{a_n\}, \{b_n\}$, 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ 则

A. 当 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 收敛时, $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$ 收敛

B. 当 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 发散时, $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$ 发散

C. 当 $\sum_{n=1}^{\infty} |b_n|$ 收敛时, $\sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 b_n^2$ 收敛

D. 当 $\sum_{n=1}^{\infty} |b_n|$ 发散时, $\sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 b_n^2$ 发散

若令 $a_n = b_n = \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 收敛, 却有 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$ 发散, $\sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 b_n^2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}$ 收敛, 故排除 A,

D; 若取 $a_n = b_n = \frac{1}{n}$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, $\sum_{n=1}^{\infty} |b_n|$ 发散, 却有 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}$ 收敛, 故排除 B; 又 $\sum_{n=1}^{\infty} |b_n|$ 与 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 b_n^2$

均为正项级数, 且

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0, \lim_{n \rightarrow \infty} |b_n| = 0, \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^2 b_n^2}{|b_n|} = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n^2 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} |b_n| = 0$$

由正项级数比较判别法的极限形式知: 当 $\sum_{n=1}^{\infty} |b_n|$ 收敛时, $\sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 b_n^2$ 收敛, 因此选 C.

定理 7.1.8 (比值审敛法). 设 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 为正项级数, 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = \rho$, 则当 $\rho < 1$ 时, 级数收敛; 当 $\rho > 1$ 时, 级数发散; 当 $\rho = 1$ 时, 级数可能收敛, 也可能发散.

特别地, 当 $\frac{u_{n+1}}{u_n} > 1$ 时, 级数 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 一定发散; 当 $\frac{u_{n+1}}{u_n} < 1$ 时, 级数可能收敛, 也可能发散.

定理 7.1.9 (根值审敛法). 设 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 为正项级数, 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{u_n} = \rho$, 则当 $\rho < 1$ 时, 级数收敛; 当 $\rho > 1$ 时, 级数发散; 当 $\rho = 1$ 时, 级数可能收敛, 也可能发散.

定理 7.1.10 (积分判别法). 设 $f(x)$ 为 $[1, +\infty)$ 上的非负递减函数, 则正项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} f(n)$ 与反常积分 $\int_1^{+\infty} f(x)dx$ 同时收敛或同时发散.

7.1.3 交错级数

定理 7.1.11 (Leibniz 定理). 若 $\{u_n\}$ 单调递减, 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = 0$, 则 $\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n u_n$ 收敛.

例 7.1.4. 设 $a_n = \int_0^1 x^n \sqrt{1-x^2} dx$, $b_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n t dt$ ($n = 1, 2, \dots$),

$$(1) \text{ 求极限 } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n};$$

$$(2) \text{ 证明: 级数 } \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{a_n}{b_n} \text{ 收敛, 并求其和.}$$

$$(1) \text{ 由推论 1.3.4 知, } b_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n t dt = \begin{cases} \frac{(n-1)!!}{n!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & n \text{ 为正偶数} \\ \frac{(n-1)!!}{n!!}, & n \text{ 大于 1 的奇数} \end{cases}, \text{ 并且}$$

$$a_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^n t \cdot \sin^2 t dt = \begin{cases} \frac{(n-1)!!}{(n+2)!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & n \text{ 为正偶数} \\ \frac{(n-1)!!}{(n+2)!!}, & n \text{ 大于 1 的奇数} \end{cases}$$

因此

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \begin{cases} \frac{(n-1)!!}{(n+2)!!} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{n!!}{(n-1)!!} \cdot \frac{2}{\pi} = \frac{1}{n+2} \rightarrow 0, & n \text{ 为正偶数} \\ \frac{(n-1)!!}{(n+2)!!} \cdot \frac{n!!}{(n-1)!!} = \frac{1}{n+2} \rightarrow 0, & n \text{ 大于 1 的奇数} \end{cases}$$

$$\text{故 } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = 0.$$

(2) 由 (1) 可知 $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{1}{n+2}$ 为交错级数, 由 Leibniz 定理, 知级数收敛, 并令 $S(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{x^{n+2}}{n+2}$, 则

$$S'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} x^{n+1} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^{n+2} = \frac{x^2}{1+x} \quad (-1 < x < 1)$$

$$\text{即 } S(x) = S(0) + \int_0^x S'(t)dt = \int_0^x \frac{t^2}{1+t} dt = \frac{1}{2} t^2 - t + \ln|1+t| \Big|_0^x = \frac{1}{2} x^2 - x + \ln(1+x), x \in (-1, 1], \text{ 故}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{a_n}{b_n} = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{1}{n+2} = S(1) = \ln 2 - \frac{1}{2}.$$

7.1.4 一般数项级数的判别法

定义 7.1.1 (绝对收敛与条件收敛). 若级数 $\sum_{n=1}^{\infty} |u_n|$ 收敛, 则称级数 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 绝对收敛, 若级数 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛, 而级数 $\sum_{n=1}^{\infty} |u_n|$ 发散, 则称级数 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 条件收敛.

判别任意项级数收敛的常用方法:

(1) 绝对值判别法: 若 $\sum_{n=1}^{\infty} |u_n|$ 收敛, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 绝对收敛;

(2) 交错级数一般使用 Leibniz 判别法;

(3) 将级数分解成两个收敛级数之和.

判别级数发散的常用方法:

(1) 证明级数的一般项的极限不存在或不为零;

(2) 将级数按某种方式加括号后所得级数发散;

(3) 将级数分解为一个收敛级数与一个发散级数之和.

定理 7.1.12. 设 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 是任意项级数, 其中 \sum 的上标都是 ∞ , 下标并非总是 1,

(1) 若 $\sum_{n=1}^{\infty} |u_n|$ 收敛, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛;

(2) 若 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 发散, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} |u_n|$ 发散;

(3) 若 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} |u_n|$ 不一定收敛;

(4) 若 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n^2$ 收敛, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_n}{n}$ 绝对收敛;

(5) 若 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n^2$ 不一定收敛;

(6) 若 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} u_{2n}, \sum_{n=1}^{\infty} u_{2n-1}$ 不一定收敛;

(7) 若 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} (u_{2n-1} + u_{2n})$ 收敛;

(8) 若 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} (u_n \pm u_{n+1})$ 收敛.

7.2 幂级数

幂级数可以在某个区间内收敛, 也可以在某些点处发散. 对于幂级数, 我们通常关心以下几个问题:

1. 收敛半径: 幂级数的收敛半径 R 是一个非负实数, 表示幂级数在哪些区间内收敛. 收敛半径的计算可以使用根试验、比值试验、比较试验等方法.
2. 收敛区间: 根据收敛半径 R , 我们可以确定幂级数的收敛区间. 在收敛区间内, 幂级数可以表示为某个函数的展开形式.
3. 函数表示: 在收敛区间内, 幂级数可以表示为一个函数的展开形式. 这种展开形式有助于我们研究函数的性质和行为.
4. 求和: 在幂级数的收敛区间内, 我们可以通过幂级数的求和来计算函数在某一点的值, 或者对函数进行近似.

7.2.1 下降阶乘幂

定义 7.2.1 (下降阶乘幂). $x^m = x(x-1)\cdots(x-m+1)$ ($m \in \mathbb{N}_+$).

定义 7.2.2 (上升阶乘幂). $x^{\overline{m}} = x(x+1)\cdots(x+m-1)$ ($m \in \mathbb{N}_+$).

定义 7.2.3. $x^0 = x^{\overline{0}} = 1$.

定理 7.2.1 (阶乘与阶乘幂). $n! = n^{\underline{n}} = 1^{\overline{n}}$.

定理 7.2.2. $\Delta(x^m) = mx^{\underline{m-1}}$.

证 $\Delta(x^m) = (x+1)^m - x^m = (x+1)x\cdots(x-m+2) - x\cdots(x-m+2)(x-m+1) = mx(x-1)\cdots(x-m+2) = mx^{\underline{m-1}}$.

定义 7.2.4 (不定和). $g(x) = \Delta f(x) \iff \sum g(x)\delta x = f(x) + C$.

定义 7.2.5 (定和). $\sum_a^b g(x)\delta x = f(x) \Big|_a^b = f(b) - f(a)$.

$$(1) \sum_a^a g(x)\delta x = f(a) - f(a) = 0;$$

$$(2) \sum_a^{a+1} g(x)\delta x = f(a+1) - f(a) = g(a);$$

$$(3) \sum_a^{b+1} g(x)\delta x - \sum_a^b g(x)\delta x = f(b+1) - f(a) - f(b) + f(a) = g(b).$$

定理 7.2.3. $\sum_a^b g(x)\delta x = \sum_{k=a}^{b-1} g(k) = \sum_{a \leq k < b} g(k)$ ($b \geq a$).

定理 7.2.4. $\sum_a^b g(x)\delta x + \sum_b^c g(x)\delta x = \sum_a^c g(x)\delta x$.

定理 7.2.5. $\sum_{0 \leq k < n} k^m = \frac{k^{\underline{m+1}}}{m+1} \Big|_0^n = \frac{n^{\underline{m+1}}}{m+1}$ ($m, n \in \mathbb{N}_+$).

定义 7.2.6. $x^{\underline{-m}} = \frac{1}{(x+1)(x+2)\cdots(x+m)}$ ($m > 0$).

定理 7.2.6. $x^{\underline{m+n}} = x^{\underline{m}}(x - m)^{\underline{n}}$ ($m, n \in \mathbb{Z}$).

定理 7.2.7. $\sum_a^b x^{\underline{m}} \delta x = \begin{cases} \frac{x^{\underline{m+1}}}{m+1} \Big|_a^b, & m \neq -1 \\ H_x \Big|_a^b, & m = -1 \end{cases}$, 其中 $H_x = \sum_{k=1}^x \frac{1}{k}$ 称为调和级数.

定义 7.2.7. $Ef(x) = f(x + 1)$.

定理 7.2.8 (分部和公式). $\sum u \Delta v = uv - \sum Ev \Delta u$.

$f = \sum g$	$\Delta f = g$	$f = \sum g$	$\Delta f = g$
$x^0 = 1$	0	2^x	2^x
$x^1 = x$	1	c^x	$(c - 1)c^x$
$x^2 = x(x - 1)$	$2x$	$\frac{c^x}{c - 1}$	c^x
$\frac{x^m}{m+1}$	$mx^{\underline{m-1}}$	cf	$c\Delta f$
H_x	$x^{-1} = \frac{1}{x+1}$	$f + g$	$\Delta f + \Delta g$
		fg	$f\Delta g + Ev\Delta f$

例 7.2.1 (第五届数学竞赛初赛). 判断级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}}{(n+1)(n+2)}$ 的敛散性, 若收敛, 则求其和.

令 $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$, $S_n = \sum_{k=1}^n \frac{H_k}{(k+1)(k+2)} = \sum_{\substack{1 \leq k \leq n+1 \\ k \in \mathbb{N}_+}} \frac{H_k}{(k+1)(k+2)} = \sum_1^{n+1} \frac{H_x}{(x+1)(x+2)} \delta x$, 那么记

$$u(x) = H_x, \Delta v(x) = \frac{1}{(x+1)(x+2)} = -\frac{1}{x+2} - \left(-\frac{1}{x+1}\right)$$

因此

$$\Delta u(x) = x^{-1}, v(x) = -\frac{1}{x+1} = -x^{-1}, Ev(x) = -(x+1)^{-1}$$

于是

$$\begin{aligned} S_n &= \sum_1^{n+1} \frac{H_x}{(x+1)(x+2)} \delta x = -x^{-1} H_x \Big|_1^{n+1} + \sum_1^{n+1} (x+1)^{-1} x^{-1} \delta x \\ &= -(n+1)^{-1} H_{n+1} + 1^{-1} H_1 + \sum_1^{n+1} x^{-2} \delta x = \frac{1}{2} - \frac{H_{n+1}}{n+2} - x^{-1} \Big|_1^{n+1} \\ &= 1 - \frac{1}{n+2} - \frac{H_{n+1}}{n+2} = 1 - \frac{1}{n+1} - \frac{H_n}{n+2} \end{aligned}$$

又因为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{H_n}{n+2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n + \gamma + \alpha(n)}{n+2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{n+2} = 0 \quad (\alpha(n) \rightarrow 0)$$

所以 $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = 1$, 因此级数收敛, 且其和为 1.

7.2.2 幂级数的性质

定义 7.2.8 (幂级数). 形如 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - x_0)^n$ 的函数项级数称为 $x - x_0$ 的幂级数, 其中 $a_n (n = 0, 1, 2, \dots)$

称为幂级数的项 $(x - x_0)^n$ 的系数. 当 $x_0 = 0$ 时, $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 称为 x 的幂级数.

定理 7.2.9 (Abel 定理). 若幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n x^n$ 在 $x = x_0 (x_0 \neq 0)$ 处收敛, 则它在满足不等式 $|x| < |x_0|$ 的一切 x 处绝对收敛; 若幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 在 $x = x_0$ 处发散, 则它在满足不等式 $|x| > |x_0|$ 的一切 x 处发散.

定义 7.2.9 (收敛半径与收敛区间). 由 Abel 定理可知, 必存在 $R > 0$, 当 $|x| < R$ 时, 幂级数绝对收敛; 当 $|x| > R$ 时, 幂级数发散, 则称 R 为幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 的收敛半径, $(-R, R)$ 为其收敛区间.

特别地, 当 $x = R$ 与 $x = -R$ 时, 幂级数可能收敛, 也可能发散; 若幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 仅在 $x = 0$ 处收敛, 其他点处都发散, 则 $R = 0$, 收敛域为 $\{0\}$; 若幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 处处收敛, 则 $R = \infty$, 收敛域为 $(-\infty, +\infty)$.

定理 7.2.10. 设 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n (a_n \neq 0)$, 其收敛半径为 R , 则 $R = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right|$ 或 $R = \frac{1}{\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}}$.

定理 7.2.11 (奇偶次项幂级数的收敛半径). 对于只含有偶次项 $\sum_{n=1}^{\infty} (x - x_0)^{2n}$ 或只含有奇次项 $\sum_{n=1}^{\infty} (x - x_0)^{2n+1}$ 的幂级数的收敛半径为: 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \rho$, 则 $R = \frac{1}{\sqrt{\rho}}$; 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \rho$, 则 $R = \frac{1}{\sqrt{\rho}}$.

定理 7.2.12 (幂级数的运算性质). 若幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 与 $\sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n$ 的收敛半径分别为 R_1 和 R_2 , 当 $R_1 \neq R_2$ 时, 令 $R = \min \{R_1, R_2\}$, 则有

$$(1) k \sum_{n=1}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=1}^{\infty} k a_n x^n, |x| < R_1, \text{ 其中 } k \text{ 为常数};$$

$$(2) \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \pm \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} (a_n \pm b_n) x^n, |x| < R;$$

$$(3) \left(\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \right) \left(\sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n \right) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n x^n, |x| < R, \text{ 其中 } c_n = \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k}.$$

定理 7.2.13 (幂级数的性质). 设 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 的收敛半径为 $R (R > 0)$, 则有

(1) 和函数 $s(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 在收敛域上连续, 若 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 在端点 $x = R$ (或 $x = -R$) 处收敛, 则 $s(x)$ 在 $x = R$ 处左连续 (或在 $x = -R$ 处右连续);

(2) 和函数 $s(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 在收敛区间上可导, 且有逐项求导公式

$$s'(x) = \left(\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \right)' = \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^{n-1}$$

(3) 和函数 $s(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 在收敛域上可积, 且有逐项求积公式

$$\int_0^x s(t) dt = \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^x a_n t^n dt = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{n+1} x^{n+1}.$$

7.2.3 函数展开为幂级数

常见函数的幂级数展开式

$$(1) e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}, |x| < +\infty$$

$$(2) a^x = \sum_{n=0}^{\infty} \ln^n a \frac{x^n}{n!}, |x| < +\infty$$

$$(3) \ln(1+x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{n+1}}{n+1}, x \in (-1, 1]$$

$$(4) -\ln(1-x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n}, |x| < 1$$

$$(5) \ln \frac{1+x}{1-x} = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{2n+1}, |x| < 1$$

$$(6) \sin x = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!}, |x| < +\infty$$

$$(7) \cos x = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!}, |x| < +\infty$$

$$(8) {}^1\arctan x = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1}, |x| < 1.$$

$$(9) {}^2\arcsin x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n)!}{4^n (n!)^2} \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)}, |x| < 1$$

$$(10) \frac{1}{1-x} = \sum_{n=0}^{\infty} x^n, |x| < 1$$

$$(11) \frac{1}{(1-x)^2} = \sum_{n=1}^{\infty} (n+1)x^n, |x| < 1$$

$$(12) \frac{2}{(1-x)^3} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)x^n, |x| < 1$$

$$(13) \frac{m}{(1-x)^{m+1}} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+m)^m x^n, |x| < 1$$

$$(14) \frac{1}{1+x} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^n, |x| < 1$$

$$(15) \frac{x^q}{1+x^p} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^{np+q}, |x| < 1$$

$$(16) (1+x)^\alpha = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha(\alpha-1)\cdots(\alpha-n+1)}{n!} x^n = \sum_{n=0}^{\infty} \binom{\alpha}{n} x^n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{n!} x^n, |x| < 1$$

例 7.2.2. 写出下列函数关于 x 的幂级数展开式

$(1) e^{-x^2}.$ $(6) \ln \sqrt{\frac{1+x}{1-x}}.$	$(2) \cos^2 x.$ $(7) \frac{x^2}{(1+x^2)^2}.$	$(3) \sin^3 x.$ $(8) \frac{x}{2+x-x^2}.$	$(4) \frac{x^{10}}{1-x}.$ $(9) \arctan \frac{1-2x}{1+2x}.$	$(5) \frac{1}{(1-x)^2}.$ $(10) \frac{1}{(1-x^2)\sqrt{1-x^2}}.$
--	---	---	---	---

$${}^1\arctan x = \int_0^x \frac{dt}{1+t^2} = \int_0^x \sum_{n=0}^{\infty} (-t^2)^n dt = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \int_0^x t^{2n} dt = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1}$$

$${}^2\text{由 } (\arcsin x)' = (1-x^2)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(-\frac{1}{2}\right)\left(-\frac{1}{2}-1\right)\cdots\left(-\frac{1}{2}+n-1\right)}{n!} (-x^2)^n = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n)!}{4^n (n!)^2} x^{2n}$$

$$\text{则 } \arcsin x = \int_0^x \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n)!}{4^n (n!)^2} t^{2n} \right] dt = x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n)!}{4^n (n!)^2} \int_0^x t^{2n} dt = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n)!}{4^n (n!)^2 (2n+1)} x^{2n+1}$$

$$(1) e^{-x^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-x^2)^n}{n!} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n}}{n!} \quad (|x| < +\infty).$$

$$(2) \cos^2 x = \frac{1 + \cos 2x}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} (2x)^{2n} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2^{2n-1}}{(2n)!} x^{2n} \quad (|x| < +\infty).$$

(3) 注意到 $\sin^3 x = \frac{3}{4} \sin x - \frac{1}{4} \sin 3x$, 于是

$$\begin{aligned} \sin^3 x &= \frac{3}{4} \sin x - \frac{1}{4} \sin 3x = \frac{3}{4} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{2n+1} - \frac{1}{4} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} (3x)^{2n+1} \\ &= \frac{3}{4} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{3^{2n}-1}{(2n+1)!} x^{2n+1} \quad (|x| < +\infty). \end{aligned}$$

$$(4) \frac{x^{10}}{1-x} = x^{10} \sum_{n=0}^{\infty} x^n = \sum_{n=10}^{\infty} x^n \quad (|x| < 1).$$

$$(5) \frac{1}{(1-x)^2} = (1-x)^{-2} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-2)(-2-1)\cdots(-2+n-1)}{n!} (-x)^n = \sum_{n=1}^{\infty} (n+1)x^n \quad (|x| < 1).$$

$$(6) \ln \sqrt{\frac{1+x}{1-x}} = \frac{1}{2} \ln \frac{1+x}{1-x} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{2n+1} \quad (|x| < 1).$$

(7) 由 $(1+x)^\alpha$ 展开式得

$$(1+x^2)^{-2} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-2)(-2-1)\cdots(-2+n-1)}{n!} (x^2)^n = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (n+1) x^{2n}$$

$$\text{故 } \frac{x^2}{(1+x^2)^2} = x^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (n+1) x^{2n+2} = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} x^{2n} \quad (|x| < 1).$$

$$(8) \text{ 因为 } \frac{x}{2+x-x^2} = \frac{x}{3} \left(\frac{1}{1+x} + \frac{1}{2-x} \right) = \frac{x}{3} \left(\frac{1}{1+x} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1-\frac{x}{2}} \right), \text{ 所以}$$

$$\frac{x}{2+x-x^2} = \frac{x}{3} \left[\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^n + \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{x}{2} \right)^n \right] = \frac{1}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \left[(-1)^n + \frac{1}{2^{n+1}} \right] x^{n+1} \quad (|x| < 1).$$

$$(9) \text{ 因为 } \arctan \frac{A-B}{1+AB} = \arctan A - \arctan B, \text{ 所以}$$

$$\arctan \frac{1-2x}{1+2x} = \arctan 1 - \arctan 2x = \frac{\pi}{4} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} (2x)^{2n+1} \quad \left(x \neq -\frac{1}{2} \right).$$

$$(10) (1-x^2)^{-\frac{3}{2}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{-3}{2}\right)\left(\frac{-3}{2}-1\right)\cdots\left(\frac{-3}{2}-n+1\right)}{n!} (-x^2)^n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)!!}{(2n)!!} x^{2n} \quad (|x| < 1).$$

例 7.2.3. 写出下列函数关于 x 的幂级数展开式

$(1) (1+x) \ln(1+x).$	$(2) \frac{1}{4} \ln \frac{1+x}{1-x} + \frac{1}{2} \arctan x.$	$(3) \arctan \frac{2-2x}{1+4x}.$
$(4) \arctan \frac{2x}{2-x^2}.$	$(5) x \arctan x - \ln \sqrt{1+x^2}.$	$(6) x \ln(x + \sqrt{1+x^2}) - \sqrt{1+x^2}.$

$$(1) f(x) = (1+x) \ln(1+x) = (1+x) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n+1} x^{n+1} \quad |x| < 1, \text{ 又 } |x| = 1 \text{ 时, 级数收敛, 因此原级数的收敛域为 } |x| \leq 1.$$

$$(2) f(x) = \frac{1}{4} \cdot 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{2n+1} + \frac{1}{2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} x^{2n+1} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{4n+1}}{4n+1} \quad (|x| < 1).$$

(3) 法一：由 $\arctan \frac{A-B}{1+AB} = \arctan A - \arctan B$, 于是

$$\arctan \frac{2-2x}{1+4x} = \arctan 2 - \arctan(2x) = \arctan 2 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} (2x)^{2n+1} \left(|x| < \frac{1}{2}\right)$$

当 $|x| = \frac{1}{2}$ 时, 级数为交错级数, 且满足 Leibniz 判别法的条件, 因此原级数的收敛域为 $|x| \leq \frac{1}{2}$.

法二： $f'(x) = \left(\arctan \frac{2-2x}{1+4x}\right)' = -\frac{2}{1+4x^2}$, 于是

$$\begin{aligned} \arctan \frac{2-2x}{1+4x} &= -2 \int_0^x \frac{dt}{1+4t^2} + \arctan 2 = -2 \int_0^x \left[\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (4t^2)^n \right] dt + \arctan 2 \\ &= -2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n 4^n \int_0^x t^{2n} dt + \arctan 2 = \arctan 2 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2^{2n-1}}{2n-1} x^{2n-1} \end{aligned}$$

收敛域的求法同法一.

(4) 由于 $f'(x) = \left(\arctan \frac{2x}{2-x^2}\right)' = \frac{4+2x^2}{4+x^4}$, 故

$$\begin{aligned} \arctan \frac{2x}{2-x^2} &= \int_0^x \frac{4+2t^2}{4+t^4} dt = \int_0^x \left(1 + \frac{t^2}{2}\right) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(\frac{t^4}{4}\right)^n dt \\ &= \int_0^x \left[\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{\left[\frac{n}{2}\right]} \frac{t^{2n}}{2^n} \right] dt = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{\left[\frac{n}{2}\right]} \frac{x^{2n+1}}{2^n(2n+1)} \quad (|x| < \sqrt{2}) \end{aligned}$$

当 $|x| = \sqrt{2}$ 时, 级数为

$$\sqrt{2} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{\left[\frac{n}{2}\right]} \frac{1}{2n+1} \text{ 及 } -\sqrt{2} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{\left[\frac{n}{2}\right]} \frac{1}{2n+1}$$

它们均由两收敛级数

$$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{1}{4n+1} \text{ 及 } \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{1}{4n+3}$$

逐项相加并乘以常数 $\sqrt{2}$ 及 $-\sqrt{2}$ 而得, 故它们收敛, 因此原级数的收敛域为 $|x| \leq \sqrt{2}$.

(5) $f(x) = x \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} x^{2n+1} - \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n+1} (x^2)^{n+1} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+2}}{(2n+1)(2n+2)}$ ($|x| < 1$) 当 $|x| = 1$ 时, 级数 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)(2n+2)}$ 收敛, 因此原级数的收敛域为 $|x| \leq 1$.

(6) 因为 $\left[\ln(x + \sqrt{1+x^2})\right]' = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}$, 所以

$$\begin{aligned} \ln(x + \sqrt{1+x^2}) &= \int_0^x \frac{dt}{\sqrt{1+t^2}} = \int_0^x \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} t^{2n}\right] dt \\ &= x + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \int_0^x t^{2n} dt = x + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \cdot \frac{x^{2n+1}}{2n+1} \end{aligned}$$

于是,

$$\begin{aligned} \text{原式} &= x \left[x + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \cdot \frac{x^{2n+1}}{2n+1} \right] - \left[1 + \frac{1}{2} x^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n-1)!!}{(2n+2)!!} x^{2n+2} \right] \\ &= -1 + \frac{x^2}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[(-1)^n \frac{(2n-1)!!}{(2n+2)!!} \frac{x^{2n+2}}{2n+1} \right] \quad (|x| \leq 1). \end{aligned}$$

例 7.2.4 (2003 数一). 将函数 $f(x) = \arctan \frac{1-2x}{1+2x}$ 展开成 x 的幂级数, 并求级数 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1}$ 的和.

由 $\arctan \frac{A-B}{1+AB} = \arctan A - \arctan B$, 所以

$$f(x) = \arctan \frac{1-2x}{1+2x} = \arctan 1 - \arctan 2x = \frac{\pi}{4} - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(2x)^{2n+1}}{2n+1}$$

于是

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(2x)^{2n+1}}{2n+1} \Big|_{x=\frac{1}{2}} = \frac{\pi}{4} - f\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\pi}{4} - \arctan \frac{1-1}{1+1} = \frac{\pi}{4}.$$

例 7.2.5 (2007 数三). 将函数 $f(x) = \frac{1}{x^2 - 3x - 4}$ 展开成 $x - 1$ 的幂级数, 并指出其收敛区间.

因为 $\frac{1}{x^2 - 3x - 4} = \frac{1}{5} \left(\frac{1}{x-4} - \frac{1}{x+1} \right)$, 其中

$$\frac{1}{x-4} = \frac{1}{(x-1)-3} = -\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{1-\frac{x-1}{3}} = -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(x-1)^n}{3^{n+1}} \quad x \in (-2, 4)$$

$$\frac{1}{x+1} = \frac{1}{x-1+2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\frac{x-1}{2} + 1} = (-1)^n \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(x-1)^n}{2^{n+1}} \quad x \in (-1, 3)$$

$$\text{故 } \frac{1}{x^2 - 3x - 4} = -\frac{1}{5} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{3^{n+1}} + \frac{(-1)^n}{2^{n+1}} \right] (x-1)^n \quad x \in (-1, 3).$$

例 7.2.6. 求函数

$$f(x) = \arctan \left(\frac{2x}{2-x^2} \right) + \frac{1}{4} \ln |x^2 - 2x + 2| - \frac{1}{4} \ln |x^2 + 2x + 2| - \frac{1}{2} \arctan(x-1) - \frac{1}{2} \arctan(x+1)$$

关于 x 的幂级数展开式和收敛半径.

显然 $x^2 \pm 2x + 2 > 0$, 故

$$f(x) = \arctan \left(\frac{2x}{2-x^2} \right) + \frac{1}{4} \ln (x^2 - 2x + 2) - \frac{1}{4} \ln (x^2 + 2x + 2) - \frac{1}{2} \arctan(x-1) - \frac{1}{2} \arctan(x+1)$$

对 $f(x)$ 求导, 整理可得 $f'(x) = \frac{2x^2}{x^4 + 4}$, 由于

$$\frac{1}{4+x^4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{1+\frac{x^4}{4}} = \frac{1}{4} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{4n}}{4^n}$$

其中 $\frac{x^4}{4} < 1$, 故得其收敛半径为 $R = \sqrt{2}$, 于是

$$f'(x) = \frac{2x^2}{x^4 + 4} = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{4n+2}}{4^n}$$

对上式两端在 $[0, x]$ 上积分, 且 $f(0) = 0$, 得

$$\begin{aligned} f(x) - f(0) &= \int_0^x \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{t^{4n+2}}{4^n} dt \\ f(x) &= \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^x (-1)^n \frac{t^{4n+2}}{4^n} dt = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{4n+3}}{(4n+3)2^{2n+1}}. \end{aligned}$$

7.2.4 幂级数的收敛域及和函数

求幂级数的收敛域

求幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 的收敛域的一般方法是, 先由公式

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right|$$

求出收敛半径, 若 $R = 0$, 则幂级数仅在 $x = 0$ 处收敛; 若 $R = +\infty$, 则幂级数的收敛域为 $(-\infty, +\infty)$; 若 $0 < R < +\infty$, 则再考察幂级数在 $x = -R$ 和 $x = R$ 处的敛散性, 进而确定幂级数的收敛域是 $(-R, R), [-R, R), (-R, R]$ 或 $[-R, R]$ 之中的某一区间.

例 7.2.7. 求幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{n^3+1} x^n$ 的收敛域.

令 $a_n = \frac{n^2}{n^3+1}$, 则收敛半径

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2}{n^3+1} \cdot \frac{(n+1)^3+1}{(n+1)^2} = 1$$

在 $x = -1$ 处, 级数为 $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{n^2}{n^3+1}$, 这是交错级数, 并且 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2}{n^3+1} = 0$, 故由 Leibniz 判别法可知级数收敛, 在 $x = 1$ 处, 级数为 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{n^3+1}$, 因为 $\frac{n^2}{n^3+1} \geq \frac{1}{n+1}$, 而 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n+1}$ 发散, 故由比较判别法知级数发散, 因此, 级数的收敛域为 $[-1, 1)$.

求幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x - x_0)^n$ 的收敛域的方法有两种: 一种是作变量代换: $y = x - x_0$, 得到级数 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n y^n$, 可按前述方法求得其收敛域, 进而可求得原级数的收敛域, 另一种是使用比值法.

例 7.2.8. 求级数 $\sum_{n=1}^{\infty} n! \frac{(x-5)^n}{n^n}$ 的收敛域.

法一: 令 $y = x - 5$, 得级数 $\sum_{n=1}^{\infty} n! \left(\frac{y}{n}\right)^n$, 其收敛半径

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n!}{n^n} \cdot \frac{(n+1)^{n+1}}{(n+1)!} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e$$

当 $y = -e$ 时, 级数为 $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{n!e^n}{n^n}$, 这是交错级数, 可以证明: $\frac{n!e}{n^n}$ 不趋于零 ($n \rightarrow \infty$), 级数发散; 当 $y = e$ 时, 级数成为 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!e^n}{n^n}$, 显然也发散, 故级数 $\sum_{n=1}^{\infty} n! \left(\frac{y}{n}\right)^n$ 的收敛域为 $(-e, e)$, 从而可知原级数的收敛域为 $(5 - e, 5 + e)$.

法二: 因为

$$\rho = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{(n+1)! \frac{(x-5)^{n+1}}{(n+1)^{n+1}}}{n! \frac{(x-5)^n}{n^n}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n+1} \right)^n |x-5| = \frac{|x-5|}{e}$$

根据正项级数的比值判别法, 当 $\rho < 1$, 即 $|x-5| < e$, $5 - e < x < 5 + e$ 时, 所给级数绝对收敛; 当 $\rho \geq 1$, 即 $x \geq 5 + e$ 或 $x \leq 5 - e$ 时, 由于级数的一般项不趋于零, 故级数发散, 综上, 级数的收敛域为 $(5 - e, 5 + e)$.

例 7.2.9 (2009 数三). 求幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^n - (-1)^n}{n^2} x^n$ 的收敛半径.

令 $a_n = \frac{e^n - (-1)^n}{n^2}$, 则

$$\rho = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2}{(n+1)^2} \cdot \frac{e^{n+1} - (-1)^{n+1}}{e^n - (-1)^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e + \left(\frac{-1}{e}\right)^n}{1 - \left(\frac{-1}{e}\right)^n} = e$$

于是收敛半径为 $R = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{e}$.

例 7.2.10 (2020 数三). 设幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} na_n(x-2)^n$ 的收敛区间为 $(-2, 6)$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n(x+1)^{2n}$ 的收敛区间为

- A. $(-2, 6)$ B. $(-3, 1)$ C. $(-5, 3)$ D. $(-17, 15)$

因为幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} na_n(x-2)^n$ 收敛区间为 $(-2, 6)$, 所以幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} na_n(x-2)^n$ 的收敛半径为 4, 令 $t = x-2$, 则

$$\sum_{n=1}^{\infty} na_n(x-2)^n = (x-2) \sum_{n=1}^{\infty} na_n(x-2)^{n-1} = t \sum_{n=1}^{\infty} na_n t^{n-1} = t \sum_{n=1}^{\infty} (a_n t^n)'$$

因而幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n t^n$ 的收敛半径为 4, 又因为

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n(x+1)^{2n} = \sum_{n=1}^{\infty} a_n[(x+1)^2]^n$$

则 $(x+1)^2 < 4$, 解得 $-3 < x < 1$, 故选 B.

求幂级数的和函数

求幂级数在其收敛域内的和函数的基本方法是: 利用幂级数的四则运算、幂级数在其收敛域内可以逐项微分、逐项积分的性质以及幂级数的和函数在其收敛区间端点处的单侧连续性等.

例 7.2.11. 求幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}(3+x)^{2n}$ 的和函数.

因为 $\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^{n+1}}{n+1} = \ln(1+x)$, 所以有 $\ln(1-x) = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n}$, 于是

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(3+x)^{2n}}{n} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[(3+x)^2]^n}{n} = -\ln[1-(x+3)^2] \quad (-4 < x < -2).$$

例 7.2.12. 求幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{3n}}{n \cdot 8^n}$ 的和函数.

设 $S(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{3n}}{n \cdot 8^n} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^{3n}$, 那么

$$S'(x) = \frac{3}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x}{2}\right)^{3n-1} \Rightarrow \frac{x}{2} S'(x) = \frac{3}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{x}{2}\right)^{3n} - \frac{3}{2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{8}{8-x^3} - \frac{3}{2}$$

解得 $S'(x) = \frac{24}{8x-x^4} - \frac{3}{x}$, 两边对 x 积分得

$$\int S(x) dx = 24 \int \frac{dx}{8x-x^4} - 3 \int \frac{dx}{x} = -\ln(8-x^3) + C$$

又 $S(0) = 0$, 解得 $C = \ln 8$, 于是幂级数的和函数 $S(x) = \ln \frac{8}{8-x^3}$.

例 7.2.13. 求幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{n^2-n+1}{n \cdot 2^{2n+1}} (x-1)^n$ 的和函数.

易求得幂级数的收敛区间为 $(-3, 5)$, 并将原幂级数化为 $\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{n^2 - n + 1}{n} \cdot \left(\frac{x-1}{4}\right)^n$, 令 $y = \frac{x-1}{4}$, 有

$$S(y) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{n^2 - n + 1}{n} \cdot y^n = \frac{1}{2} y^2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} (n-1) y^{n-2} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} y^n := \frac{y^2}{2} S_1(y) + \frac{1}{2} S_2(y)$$

于是

$$\int_0^y S_1(t) dt = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} (n-1) \int_0^y t^{n-2} dt = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} y^{n-1} = \frac{1}{1+y} \Rightarrow S_1(y) = -\frac{1}{(1+y)^2} (|y| < 1)$$

$$\text{又 } S_2(y) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{y^n}{n} = \ln(1+y) (-1 < x \leq 1), \text{ 故}$$

$$S(y) = \frac{y^2}{2} S_1(y) + \frac{1}{2} S_2(y) = -\frac{1}{2} \left(\frac{y}{1+y}\right)^2 + \frac{1}{2} \ln(1+y) (|y| < 1)$$

于是, 所求幂级数的和函数为

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{n^2 - n + 1}{n \cdot 2^{2n+1}} (x-1)^n = S\left(\frac{x-1}{4}\right) = \frac{1}{2} \ln \frac{x+3}{4} - \frac{1}{2} \left(\frac{x-1}{x+3}\right)^2 (-3 < x < 5).$$

例 7.2.14. 求 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n n^3}{(n+1)!} x^n$ 的收敛区间及和函数.

易得级数的收敛区间为 $(-\infty, +\infty)$, 又因为 $n^3 = (n+1)(n^2 - n + 1) - 1$, 于是 $\frac{n^3}{(n+1)!} = \frac{1}{(n-2)!} + \frac{1}{n!} - \frac{1}{(n+1)!}$, 那么

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n n^3}{(n+1)!} x^n &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n^3}{(n+1)!} (-x)^n = -\frac{x}{2} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-x)^n}{(n-2)!} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-x)^n}{n!} - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-x)^n}{(n+1)!} \\ &= -\frac{x}{2} + x^2 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-x)^{n-2}}{(n-2)!} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-x)^n}{n!} - \frac{1}{x} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-x)^{n+1}}{(n+1)!} \\ &= -\frac{x}{2} + x^2 e^{-x} + (e^{-x} - 1 + x) + \frac{1}{x} \left(e^{-x} - 1 + x - \frac{x^2}{2}\right) = e \left(x^2 + 1 + \frac{1}{x}\right) - \frac{1}{x} \quad x \neq 0 \end{aligned}$$

显然, 当 $x = 0$ 时, 和函数为 0, 因此 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n n^3}{(n+1)!} x^n = \begin{cases} e^{-x} \left(x^2 - 1 + \frac{1}{x}\right) - \frac{1}{x}, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0. \end{cases}$

例 7.2.15. 求 $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k+2}{k! + (k+1)! + (k+2)!} \cdot$

因为 $\frac{k+2}{k! + (k+1)! + (k+2)!} = \frac{1}{k!(k+2)}$, 于是考虑 $S(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{n+2}}{n!(n+2)}$, 则

$$S'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{n+1}}{n!} = x \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = xe^x$$

所以

$$S(x) = S(0) + \int_0^x S'(t) dt = \int_0^x te^t dt = (t-1)e^t \Big|_0^x = (x-1)e^x + 1$$

$$\text{则 } \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k+2}{k! + (k+1)! + (k+2)!} = S(1) - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}.$$

对于有些系数含有阶乘符号的幂级数, 求其和函数的一种行之有效的方法是: 首先设法建立关于和函数的微分方程, 然后求解微分方程, 即得所求和函数.

例 7.2.16. 求幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} x^{2n+1}$ 的和函数.

设 $S(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} x^{2n+1}$, 易求得收敛区间为 $(-1, 1)$, 那么

$$S'(x) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} x^{2n+2} = 1 + x \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} x^{2n+1} = 1 + x \left[x \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} x^{2n+1} \right]' = 1 + xS(x) + x^2 S'(x)$$

即 $S'(x) - \frac{x}{1-x^2} S(x) = \frac{1}{1-x^2}$, 该方程为一阶非齐次线性微分方程, 由通解公式

$$S(x) = e^{\int \frac{x}{1-x^2} dx} \left[\int \frac{1}{1-x^2} \cdot e^{-\int \frac{x}{1-x^2} dx} dx + C \right] = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \left[\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} + C \right] = \frac{\arcsin x}{\sqrt{1-x^2}} + \frac{C}{\sqrt{1-x^2}}$$

又 $S(0) = 0$, 解得 $C = 0$, 于是幂级数的和函数 $S(x) = \frac{\arcsin x}{\sqrt{1-x^2}}$.

综合运用

例 7.2.17. 求幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{n} x^n$ 的收敛域及和函数.

记 $u_n = \frac{n+1}{n}$, 则由 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{u_{n+1}}{u_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n(n+2)}{(n+1)^2} = 1$ 知, 收敛半径 $R = 1$. 又当 $x = \pm 1$ 时,

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{n} x^n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{n} (\pm 1)^n = \sum_{n=1}^{\infty} (\pm 1)^n + \sum_{n=1}^{\infty} (\pm 1)^n \frac{1}{n}$$

发散, 故原级数的收敛域为 $(-1, 1)$. 设和函数为 $S(x)$, 即

$$S(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{n} x^n, \quad x \in (-1, 1)$$

两边在 $(0, x)$ 上积分, 得

$$\int_0^x S(t) dt = \int_0^x \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{n} t^n \right) dt = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^x \frac{n+1}{n} t^n dt = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{n+1}}{n}$$

即 $\frac{1}{x} \int_0^x S(t) dt = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n}$, 然后两边分别对 x 求导, 得

$$\left(\frac{1}{x} \int_0^x S(t) dt \right)' = \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n} \right)' = \sum_{n=1}^{\infty} x^{n-1} = \frac{1}{1-x}$$

于是

$$\frac{1}{x} \int_0^x S(t) dt = \int_0^x \frac{dx}{1-x} = -\ln(1-x) + C$$

即 $\int_0^x S(t) dt = -x \ln(1-x) + Cx$, 两边再次求导, 得

$$S(x) = \frac{x}{1-x} - \ln(1-x) + C$$

因为 $S(x)$ 在 $(-1, 1)$ 内连续, 且 $S(0) = 0$, 所以 $C = 0$, 所以原级数的和函数为

$$S(x) = \frac{x}{1-x} - \ln(1-x), \quad x \in (-1, 1).$$

例 7.2.18. 求幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)x^n$ 的收敛域及函数, 并求 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{2^n}$ 的和.

记 $u_n = n+1$, 则由 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{u_{n+1}}{u_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+2}{n+1} = 1$ 知, 收敛半径 $R = 1$. 又当 $x = \pm 1$ 时,

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(\pm 1)^n = \sum_{n=0}^{\infty} (\pm 1)^n + \sum_{n=0}^{\infty} n(\pm 1)^n$$

发散, 故原级数的收敛域为 $(-1, 1)$. 设和函数为 $S(x)$, 即 $S(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)x^n$, $x \in (-1, 1)$. 两边在 $(0, x)$ 上积分, 得

$$\int_0^x S(t)dt = \int_0^x \left(\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)t^n \right) dt = \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^x (n+1)t^n dt = \sum_{n=0}^{\infty} x^{n+1}$$

$$\text{即 } \frac{1}{x} \int_0^x S(t)dt = \sum_{n=0}^{\infty} x^n = \frac{1}{1-x} \Rightarrow \int_0^x S(t)dt = \frac{x}{1-x} \stackrel{\text{类比}}{\Rightarrow} S(x) = \frac{1}{(1-x)^2}, \quad x \in (-1, 1). \text{ 所以}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{2^n} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{1}{2^{n-1}} = x \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)x^n \Big|_{x=\frac{1}{2}} = \frac{x}{(1-x)^2} \Big|_{x=\frac{1}{2}} = 2$$

例 7.2.19 (2014 数学 (三)). 求幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(n+3)x^n$ 的收敛域及和函数.

记 $u_n = (n+1)(n+3)$, 则由 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{u_{n+1}}{u_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+2)(n+4)}{(n+1)(n+3)} = 1$ 知, 收敛半径 $R = 1$. 又当 $x = \pm 1$ 时, $\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(n+3)(\pm 1)^n$ 发散, 故原级数的收敛域为 $(-1, 1)$.

设和函数为 $S(x)$, 即 $S(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(n+3)x^n$, $x \in (-1, 1)$. 两边在 $(0, x)$ 上积分, 得

$$\begin{aligned} \int_0^x S(t)dt &= \int_0^x \left(\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(n+3)t^n \right) dt = \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^x (n+1)(n+3)t^n dt = \sum_{n=0}^{\infty} (n+3)x^{n+1} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)x^{n+1} + \sum_{n=0}^{\infty} x^{n+1} = \left(\sum_{n=0}^{\infty} \int_0^x (n+2)t^{n+1} dt \right)' + \frac{x}{1-x} \\ &= \left(\frac{x^2}{1-x} \right)' + \frac{x}{1-x} = \frac{3x - 2x^2}{(1-x)^2} \end{aligned}$$

$$\text{于是 } S(x) = \left[\frac{3x - 2x^2}{(1-x)^2} \right]' = \frac{x+3}{(1-x)^3}, \quad x \in (-1, 1).$$

例 7.2.20 (首届数学竞赛预赛). 已知 $u_n(x)$ 满足 $u'_n(x) = u_n(x) + x^{n-1}e^x$ (n 为正整数), 且 $u_n(1) = \frac{e}{n}$,

求函数项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$ 之和.

由 $u'_n(x) - u_n(x) = x^{n-1}e^x$ 得, $u_n(x) = e^{\int dx} \left[\int x^{n-1}e^x \cdot e^{-\int dx} dx + C \right] = \frac{x^n}{n}e^x + Ce^x$, 又因为 $u_n(1) = \frac{e}{n}$, 所以 $C = 0$, 所以 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n}e^x = e^x \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n} = -e^x \ln(1-x)$, $x \in (-1, 1)$.

例 7.2.21. 设 $a_0 = 1, a_1 = -2, a_2 = \frac{7}{2}$,

$$a_{n+1} = -\left(1 + \frac{1}{n+1}\right)a_n \quad (n \geq 2)$$

求幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 在 $(-1, 1)$ 内的和函数 $S(x)$.

收敛半径 $R = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|a_n|}{|a_{n+1}|} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{1 + \frac{1}{n+1}} = 1$, 所以 $|x| < 1$ 时幂级数收敛,

$$S(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \sum_{n=3}^{\infty} a_n x^n = 1 + 2x + \frac{7}{2}x^2 + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$$

当 $n \geq 2$ 时, 由

$$\begin{aligned} a_{n+1} &= (-1) \frac{n+2}{n+1} a_n = (-1)^2 \frac{n+2}{n+1} \cdot \frac{n+1}{n} a_{n-1} = \cdots = (-1)^{n-1} \frac{n+2}{n+1} \cdot \frac{n+1}{n} \cdots \frac{4}{3} a_2 \\ &= (-1)^{n-1} \frac{n+2}{3} \cdot \frac{7}{2} = (-1)^{n-1} \frac{7}{6} (n+2) \end{aligned}$$

故

$$S(x) = 1 - 2x + \frac{7}{2}x^2 + \frac{7}{6} \sum_{n=3}^{\infty} (-1)^n (n+1)x^n$$

其中

$$\sum_{n=3}^{\infty} (-1)^n (n+1)x^n = \sum_{n=3}^{\infty} (-1)^n (x^{n+1})' = \left[\sum_{n=3}^{\infty} (-1)^n x^{n+1} \right]' = -\left[\frac{x^4}{1+x} \right]' = -\frac{4x^3 + 3x^4}{(1+x)^2}$$

$$\text{故 } S(x) = 1 - 2x + \frac{7}{2}x^2 - \frac{7}{6} \frac{4x^3 + 3x^4}{(1+x)^2}.$$

例 7.2.22 (2019 江苏年竞赛题). 求幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{8^n(2n-1)} x^{3n-1}$ 的收敛域与和函数.

记 $a_n = \frac{n}{8^n(2n-1)} x^{3n-1}$, 那么

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{(n+1)x^{3n+2}}{8^{n+1}(2n+1)} \cdot \frac{8^n(2n-1)}{nx^{3n-1}} \right| = \left| \frac{x}{2} \right|^3$$

$|x| < 2$ 时原级数收敛, $|x| > 2$ 时原级数发散; 当 $x = \pm 2$ 时,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{8^n(2n-1)} (\pm 2)^{3n-1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\pm 1)^n n}{2n-1} = \frac{1}{2} \neq 0$$

所以原级数发散, 因此原级数的收敛域为 $(-2, 2)$.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{8^n(2n-1)} x^{3n-1} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n-1+1}{8^n(2n-1)} x^{3n-1} = \frac{1}{2x} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x}{2} \right)^{3n} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{3n-1}}{8^n(2n-1)}$$

其中, $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2x} \sum_{k=1}^n \left(\frac{x}{2} \right)^{3k} = \frac{x^2}{2(8-x^3)}$, 现求第二项的和.

当 $x \in (0, 2)$ 时, 令 $\frac{x}{2} = t^{\frac{2}{3}}$, 则

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{3n-1}}{8^n(2n-1)} &= \frac{t}{2x} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^{2n-1}}{2n-1} = \frac{t}{2x} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t \frac{t^{2n-1}}{2n-1} dt \right)' \\ &= \frac{t}{2x} \int_0^t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(t^{2n-1})'}{2n-1} dt = \frac{t}{2x} \int_0^t \frac{dt}{1-t^2} = \frac{t}{4x} \ln \frac{1+t}{1-t} = \frac{\sqrt{x}}{8\sqrt{2}} \ln \frac{2\sqrt{2}+x^{\frac{3}{2}}}{2\sqrt{2}-x^{\frac{3}{2}}} \end{aligned}$$

当 $x \in (-2, 0)$ 时, 令 $\frac{x}{2} = -t^{\frac{2}{3}}$ ($t > 0$), 则

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{3n-1}}{8^n(2n-1)} &= \frac{t}{2x} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n-1} t^{2n-1} = \frac{t}{2x} \int_0^t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n-1} (t^{2n-1})' dt \\ &= -\frac{t}{2x} \int_0^t \frac{dt}{1+t^2} = \frac{t}{2x} \arctan t = -\frac{\sqrt{-x}}{4\sqrt{2}} \arctan \frac{x\sqrt{-x}}{2\sqrt{2}} \end{aligned}$$

综上, 所求和函数为

$$S(x) = \begin{cases} \frac{x^2}{2(8-x^3)} + \frac{\sqrt{x}}{8\sqrt{2}} \ln \frac{2\sqrt{2}+x^{\frac{3}{2}}}{2\sqrt{2}-x^{\frac{3}{2}}}, & 0 \leq x < 2 \\ \frac{x^2}{2(8-x^3)} - \frac{\sqrt{-x}}{4\sqrt{2}} \arctan \frac{x\sqrt{-x}}{2\sqrt{2}}, & -2 < x < 0 \end{cases}$$

例 7.2.23. 设 $\alpha = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^2 \tan \frac{x}{2}}{1 - (1+x) \int_0^x \sin^2 \sqrt{t} dt}$, 求常数项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} n^2 \sin^{n-1} \alpha$ 的和.

对极限式做恒等变换, 有

$$\begin{aligned}\alpha &= -\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^2 \tan \frac{x}{2}}{\exp \int_0^x \sin^2 \sqrt{t} dt \ln(1+x) - 1} = -\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\frac{x^3}{2}}{\int_0^x \sin^2 \sqrt{t} dt \ln(1+x)} \\ &= -\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\frac{1}{2}x^2}{\int_0^x \sin^2 \sqrt{t} dt} \stackrel{L'}{=} -\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x}{\sin^2 \sqrt{x}} = -1\end{aligned}$$

为求 $\sum_{n=1}^{\infty} n^2 \sin^{n-1} \alpha$ 的和, 先求幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} n^2 x^{n-1}$ 的和函数 $S(x)$, 显然它的收敛域为 $(-1, 1)$, 当 $x \in (-1, 1)$ 时, 由幂级数在收敛区间的解析性质, 有

$$\begin{aligned}S(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} n^2 x^{n-1} = \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1)x^{n-1} + \sum_{n=1}^{\infty} nx^{n-1} \\ &= x \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1)x^{n-2} + \sum_{n=1}^{\infty} nx^{n-1} = x \left(\sum_{n=2}^{\infty} x^n \right)'' + \left(\sum_{n=1}^{\infty} x^n \right)' \\ &= x \left(x^2 \sum_{n=0}^{\infty} x^n \right)'' + \left(x \sum_{n=0}^{\infty} x^n \right)' = x \left(\frac{x^2}{1-x} \right)'' + \left(\frac{x}{1-x} \right)' \\ &= \frac{2x}{(1-x)^3} + \frac{1}{(1-x)^2} = \frac{1+x}{(1-x)^3}\end{aligned}$$

由于 $|\sin \alpha| = |\sin(-1)| < 1$, 故

$$\sum_{n=1}^{\infty} n^2 \sin^{n-1} \alpha = S(\sin \alpha) = \frac{1 - \sin 1}{(1 + \sin 1)^3}.$$

例 7.2.24. 设函数 $f(x) = \frac{1}{1-x-x^2}$, $a_n = \frac{1}{n!} f^{(n)}(0)$ ($n \geq 0$), 证明: 级数 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_{n+1}}{a_n a_{n+2}}$ 收敛并求它的和.

证法一 令 $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, 那么

$$\begin{aligned}1 &= (1-x-x^2)f(x) = (1-x-x^2) \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+1} - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+2} \\ &= a_0 + (a_1 - a_0)x + \sum_{n=0}^{\infty} (a_{n+2} - a_{n+1} - a_n)x^{n+2}\end{aligned}$$

比较系数得 $a_0 = 1$, $a_1 = a_0$, $a_{n+2} = a_{n+1} + a_n$, 从而有 $a_n \geq n$, 故 $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = +\infty$, 故

$$\frac{a_{n+1}}{a_n a_{n+2}} = \frac{a_{n+2} - a_n}{a_n a_{n+2}} = \frac{1}{a_n} - \frac{1}{a_{n+2}}$$

所以 $\lim_{m \rightarrow +\infty} \sum_{n=0}^m \left(\frac{1}{a_n} - \frac{1}{a_{n+2}} \right) = \lim_{m \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{a_0} + \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_{m+1}} - \frac{1}{a_{m+2}} \right) = 1 + 1 = 2$.

证法二 对 $(x^2 + x - 1)f(x) = -1$ 求 $n+2$ 阶导,

$$\sum_{k=0}^{n+2} C_{n+2}^k (x^2 + x - 1)^{(k)} f^{(n+2-k)}(x) = 0$$

故

$$(x^2 + x - 1)f^{(n+2)}(x) + (n+2)(2x+1)f^{(n+1)}(x) + (n+2)(n+1)f^{(n)}(x) = 0$$

将 $x = 0$, 代入上式, 并化简得

$$f^{(n+1)}(0) = \frac{1}{n+2} [f^{(n+2)}(0) - (n+2)(n+1)f^{(n)}(0)]$$

于是有

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_{n+1}}{a_n a_{n+2}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n!(n+2)!}{(n+1)!} \cdot \frac{f^{(n+1)}(0)}{f^{(n)}(0)f^{(n+2)}(0)}$$

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

7.2.5 幂级数的应用

证明不等式

例 7.2.25. 设 $x > 0, x \neq 1$, 证明 $0 < \frac{x \ln x}{x^2 - 1} < \frac{1}{2}$.

证 当 $0 < x < 1$ 或 $x > 1$ 时, $x^2 - 1$ 与 $x \ln x$ 同号, 所以 $\frac{x \ln x}{x^2 - 1} > 0$, 令 $x = \frac{1+t}{1-t}$, 则 $\frac{x \ln x}{x^2 - 1} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{t} - t \right) \cdot \ln \frac{1+t}{1-t}$, $0 < |t| < 1$, 而由 $\ln \frac{1+t}{1-t}$ 的幂级数展开式, 有

$$\begin{aligned}
\frac{1}{4} \left(\frac{1}{t} - t \right) \ln \frac{1+t}{1-t} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{t} - t \right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^{2n+1}}{2n+1} = \frac{1}{2} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^{2n}}{2n+1} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^{2n+2}}{2n+1} \right) \\
&= \frac{1}{2} - \frac{1}{3} t^2 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{1}{2n+1} - \frac{1}{2n-1} \right) t^{2n} = \frac{1}{2} - \frac{1}{3} t^2 - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{t^{2n}}{4n^2 - 1}
\end{aligned}$$

记 $u_n = \frac{t^{2n}}{4n^2 - 1}$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_n + 1}{u_n} = t^2 \Rightarrow \sum_{n=2}^{\infty} \frac{t^{2n}}{4n^2 - 1}$ 收敛, 且和大于 0, 于是 $0 < \frac{x \ln x}{x^2 - 1} < \frac{1}{2}$.

例 7.2.26. 设 $x > 0, x \neq 1$, 证明 $\frac{\ln x}{x-1} \leq \frac{1}{\sqrt{x}}$.

证 要证 $\frac{\ln x}{x-1} \leq \frac{1}{\sqrt{x}}$, 即证 $I = \frac{\ln x}{x-1} - \frac{1}{\sqrt{x}} \leq 0$, 为此

$$I = \frac{\frac{1}{t} \ln \frac{1+t}{1-t} - \frac{2}{1-t^2}}{0 < |t| < 1} = \frac{2}{t} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^{2n+1}}{2n+1} - 2 \sum_{n=0}^{\infty} t^{2n} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-4nt^{2n}}{2n+1} \leq 0$$

故得证 $\frac{\ln x}{x-1} \leq \frac{1}{\sqrt{x}}$.

例 7.2.27. 设 $0 < x < 1$, 证明: $3 \ln \frac{1+x}{1-x} < \frac{6x - 4x^3}{1-x^2}$.

证 因为 $3 \ln \frac{1+x}{1-x} = 6 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{2n+1}$, $|x| < 1$, 于是要证

$$6 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{2n+1} < \frac{6x - 4x^3}{1-x^2}$$

又 $6x + 2x^3 \leq 6 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{2n+1}$, 只需证

$$6x + 2x^3 < 4x + \frac{2x}{1-x^2} \Rightarrow 2x + 2x^3 - \frac{2x}{1-x^2} > 0 \Rightarrow 1 - x^4 > 1$$

而 $0 < x < 1$, 故上式成立, 即得待证不等式.

求和问题

例 7.2.28. 证明: $\lim_{m,n \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{(-1)^{i+j}}{i+j}$ 存在, 并求之.

因为

$$\int_{-1}^0 x^{i+j-1} dx = \frac{1}{i+j} x^{i+j} \Big|_{-1}^0 = -\frac{(-1)^{i+j}}{i+j}$$

所以

$$\begin{aligned} S_{m,n} &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{(-1)^{i+j}}{i+j} = -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \int_{-1}^0 x^{i+j-1} dx = -\sum_{i=1}^m \int_{-1}^0 \left(\sum_{j=1}^n x^{i+j-1} \right) dx \\ &= -\sum_{i=1}^m \int_{-1}^0 \frac{x^i (1-x^n)}{1-x} dx = -\int_{-1}^0 \frac{1}{1-x} \sum_{i=1}^m (x^i - x^{n+i}) dx \\ &= -\int_{-1}^0 \frac{x - x^{m+1}}{(1-x)^2} dx + \int_{-1}^0 \frac{x^{n+1} - x^{n+m+1}}{(1-x)^2} dx \end{aligned}$$

而 $x \in [-1, 0]$, $(1-x)^2 \geq 1$, 所以 $\int_{-1}^0 \frac{x^i}{(1-x)^2} dx \leq \int_{-1}^0 x^i dx$, 又 $\lim_{i \rightarrow +\infty} \int_{-1}^0 x^i dx = 0$, 所以 $\lim_{i \rightarrow +\infty} \int_{-1}^0 \frac{x^i}{(1-x)^2} dx = 0$, 所以

$$\lim_{m,n \rightarrow +\infty} S_{m,n} = -\int_{-1}^0 \frac{x}{(1-x)^2} dx = \ln 2 - \frac{1}{2}.$$

例 7.2.29. 求级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{3n-1}$ 与 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(3n-1)(2n-1)}$ 的和.

令 $S(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{3n-1} x^{3n-1}$, 那么 $S'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} x^{3n-2} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^{3n+1} = \frac{x}{1+x^3}, |x| < 1$, 于是

$$\begin{aligned} S(1) &= \int_0^1 S'(x) dx = \int_0^1 \frac{x}{1+x^3} dx = \int_0^1 \frac{x}{(x+1)(x^2-x+1)} dx = \frac{1}{3} \int_0^1 \left(\frac{1}{2} \frac{2x-1}{x^2-x+1} + \frac{1}{2} \frac{3}{x^2-x+1} - \frac{1}{x+1} \right) dx \\ &= \frac{1}{6} \ln(x^2-x+1) - \frac{1}{3} \ln(x+1) + \frac{1}{\sqrt{3}} \arctan \frac{2x-1}{\sqrt{3}} \Big|_0^1 = \frac{\pi}{3\sqrt{3}} - \frac{1}{3} \ln 2 \end{aligned}$$

因为 $\frac{1}{(3n-1)(2n-1)} = \frac{2}{2n-1} - \frac{3}{2n-1}$, 所以

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(3n-1)(2n-1)} = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \left(\frac{2}{2n-1} - \frac{3}{3n-1} \right) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} - 3 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{3n-1}$$

令 $Q(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1}$, 那么

$$Q'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} x^{2n-2} = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n x^{2n} = \frac{1}{1+x^2} \quad |x| < 1$$

因此 $2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} = 2Q(1) = 2Q(0) + 2 \int_0^1 \frac{dx}{1+x^2} = 2 \arctan x \Big|_0^1 = \frac{\pi}{2}$, $3 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{3n-1} = 3S(1) = \frac{\pi}{\sqrt{3}} - \ln 2$, 故

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(3n-1)(2n-1)} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{\sqrt{3}} + \ln 2.$$

例 7.2.30. 设 $a_n = \int_0^{+\infty} x^n e^{-x} dx$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), (1) 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n-1}}{a_n}$; (2) 求级数 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1+n^2}{a_n}$ 的和.

(1) 因为 $\Gamma(\alpha) = \int_0^{+\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$ ($\alpha > 0$), 且 $\Gamma(\alpha+1) = \Gamma(\alpha)$, 因此

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n-1}}{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Gamma(n)}{\Gamma(n+1)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Gamma(n)}{n\Gamma(n)} = 0.$$

(2) 又因为 $a_n = \Gamma(n+1) = n!$, 因此级数转化为 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1+n^2}{n!}$, 为此构造幂级数 $S(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1+n^2}{n!} x^n$, 那么

$$\begin{aligned} S(x) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n^2 x^n}{n!} = e^x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{(n-1)!} x^n = e^x + x \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{(n-1)!} \right)' = e^x + x \left(x \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{n-1}}{(n-1)!} \right)' \\ &= e^x + x(xe^x)' = e^x + xe^x + x^2 e^x \Rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1+n^2}{a_n} = S(1) = 3e. \end{aligned}$$

例 7.2.31. 设 $a_n = \int_0^{n\pi} x |\sin x| dx$, $n = 1, 2, \dots$, (1) 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{2^k} = \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{2^n}$; (2) 求级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{2^n}$ 的和.

(1) 化积分为求和形式

$$\begin{aligned} a_n &= \sum_{k=0}^{n-1} \int_{k\pi}^{(k+1)\pi} x |\sin x| dx \stackrel{t=x-k\pi}{=} \sum_{k=0}^{n-1} \int_0^\pi (k\pi+t) |\sin(k\pi+t)| dt \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \int_0^\pi (k\pi+t) \sin t dt = \pi \sum_{k=0}^{n-1} (2k+1) = n^2 \pi \end{aligned}$$

$$\text{因此 } \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{2^k} = \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{2^n}.$$

(2) 令 $S(x) = \sum_{n=1}^{\infty} n^2 x^n$, 即求 $S\left(\frac{1}{2}\right)$ 的值, 为此,

$$\begin{aligned} S(x) &= x \sum_{n=1}^{\infty} n^2 x^{n-1} = x S_1(x) \\ S_1(x) &= \left(\sum_{n=1}^{\infty} \int_0^x n^2 t^{n-1} dt \right)' = \left(\sum_{n=1}^{\infty} n x^n \right)' = \left(x \sum_{n=1}^{\infty} n x^{n-1} \right)' = (x S_2(x))' \\ S_2(x) &= \left(\sum_{n=1}^{\infty} \int_0^x n t^{n-1} dt \right)' = \left(\sum_{n=1}^{\infty} x^n \right)' = \left(\frac{1}{1-x} \right)' = \frac{1}{(1-x)^2} \\ \Rightarrow S_1(x) &= \frac{1+x}{(1-x)^3} \Rightarrow S(x) = \frac{x^2+x}{(1-x)^3} \Rightarrow S\left(\frac{1}{2}\right) = 6. \end{aligned}$$

计算积分

例 7.2.32. 用幂级数展开方式求例 3.2.4.

同样地, 换元得到 $I = \frac{1}{4} \int_0^1 \ln t \ln(1-t) dt$, 并且 $-\ln(1-x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n}$ $|x| < 1$, 所以³

$$\begin{aligned} I &= -\frac{1}{4} \int_0^1 \ln t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^n}{n} dt = -\frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^1 \frac{t^n \ln t}{n} dt = -\frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^1 \frac{\ln t d(t^{n+1})}{n(n+1)} \\ &= -\frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{t^{n+1} \ln t}{n(n+1)} \Big|_0^1 - \frac{1}{n(n+1)} \int_0^1 t^n dt \right] = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+1)^2} \\ &= \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} - \frac{1}{(n+1)^2} \right] = \frac{1}{4} \left(2 - \frac{\pi^2}{6} \right) = \frac{1}{2} - \frac{\pi^2}{24}. \end{aligned}$$

$${}^3 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} - \frac{1}{(n+1)^2} \right] = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1)^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+1} - \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} - 1 \right] = 2 - \frac{\pi^2}{6}.$$

7.3 Fourier 级数

Fourier 级数是函数项级数的一种特殊形式. 它是研究和表示周期函数的有力工具.

7.3.1 Fourier 系数

定义 7.3.1 (Fourier 系数). 形如 $\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$ 的级数称为 Fourier 级数或三角级数. 设 $f(x)$ 是周期为 2π 的周期函数, 且能展开为 Fourier 级数, 即

$$f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx).$$

若积分

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx, n = 0, 1, 2 \dots \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx, n = 1, 2 \dots \end{aligned}$$

都存在, 则称 $\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$ 为 $f(x)$ 的 Fourier 级数, 其中 $a_0, a_n, b_n, n = 1, 2, \dots$ 称为 $f(x)$ 的 Fourier 系数.

定理 7.3.1 (Dirichlet 收敛定理). 设 $f(x)$ 是以 $2l$ 为周期的周期函数, 如果它满足

- (1) 一个周期内除有限个第一类间断点外都连续;
- (2) 一个周期内至多只有有限个极值点.

则 $f(x)$ 的 Fourier 级数收敛, 并且当 x 为 $f(x)$ 的连续点时, 级数收敛于 $f(x)$; 当 x 为 $f(x)$ 的间断点时, 级数收敛于 $\frac{f(x^-) + f(x^+)}{2}$.

7.3.2 周期为 $2l$ 的 Fourier 展开

定义 7.3.2 (正弦级数与余弦级数). 设 $f(x)$ 是周期为 2π 的周期函数, 且能展开成 Fourier 系数, 即

$$f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$$

- (1) 当 $f(x)$ 为奇函数时

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = 0, a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx = 0$$

此时 $f(x)$ 的 Fourier 级数表达式为 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nx$ 仅含正弦项, 称为正弦级数;

(2) 当 $f(x)$ 为偶函数时

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx = 0$$

此时 $f(x)$ 的 Fourier 级数表达式为: $\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nx$, 此式仅含余弦项, 称为余弦级数.

定理 7.3.2 (Fourier 展开). 设 $f(x)$ 的周期为 $2l$, 且满足收敛定理的条件, 则其在 $[-l, l]$ 上的 Fourier 级数展开式为

$$f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi}{l} x + b_n \sin \frac{n\pi}{l} x \right)$$

其中 Fourier 系数 a_0, a_n, b_n ($n = 1, 2, 3, \dots$) 取值为:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) dx, \quad a_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \cos \frac{n\pi x}{l} dx \\ b_n &= \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx \end{aligned}$$

特别地, 进行变量代换 $z = \frac{\pi}{l}x$, 于是区间 $-l \leq x < l$ 变换为 $-\pi \leq z < \pi$, 存在周期为 2π 的函数 $F(z)$ 使得 $f(x) = f\left(\frac{lz}{\pi}\right) = F(z)$, 对 $F(z)$ 进行 Fourier 展开, 最后将 $z = \frac{\pi}{l}x$ 回代即可.

定义 7.3.3 (周期延拓与奇偶延拓). 若 $f(x)$ 仅在 $[-\pi, \pi]$ 上有定义, 此时需要将其展开为 Fourier 级数, 则需要在 $[-\pi, \pi]$ 外补充 $f(x)$ 的定义, 使其成为周期为 2π 的周期函数. 这种方法称为周期延拓. 若 $f(x)$ 仅给出 $[0, \pi]$ 上的定义, 若要将其展开为正弦级数, 则需补充 $[-\pi, 0]$ 的定义, 使其成为奇函数, 这种方法称为函数的奇延拓; 若要将其展开为余弦级数, 则需补充 $[-\pi, 0]$ 的定义, 使其成为偶函数, 这种方法称为函数的偶延拓. 进行奇偶延拓后, 补充周期延拓即可将函数 $f(x)$ 进行 Fourier 展开. 给出函数 $f(x)$ 在 $[0, l]$ 的定义同理.

例 7.3.1. 在所指定的区间内把下列函数展开为 Fourier 级数.

$$\left| \begin{array}{ll} (1) \text{ 在区间 } (0, 2l) \text{ 内展开 } f(x) = \begin{cases} A, & 0 < x < l \\ 0, & l < x < 2l \end{cases} . & (2) \text{ 在区间 } (-\pi, \pi) \text{ 内展开 } f(x) = x \\ (3) \text{ 在区间 } (0, 2\pi) \text{ 内展开 } f(x) = \frac{\pi - x}{2}. & (4) \text{ 在区间 } (-\pi, \pi) \text{ 内展开 } f(x) = |x|. \end{array} \right.$$

(1) 由于

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{l} \int_0^{2l} f(x) dx = \frac{1}{l} \int_0^l A dx = A; \\ a_n &= \frac{1}{l} \int_0^{2l} f(x) \cos \frac{n\pi x}{l} dx = \frac{1}{l} \int_0^l A \cos \frac{n\pi x}{l} dx = 0; \\ b_n &= \frac{1}{l} \int_0^{2l} f(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx = \frac{1}{l} \int_0^l A \sin \frac{n\pi x}{l} dx = \frac{A}{n\pi} [1 - (-1)^n] \end{aligned}$$

故按展开定理, $f(x)$ 可展开为

$$\frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} \sin((2k+1)\frac{\pi x}{l}) = \begin{cases} A, & 0 < x < l \\ \frac{A}{2}, & x = l \\ 0, & l < x < 2l \end{cases}$$

(2) 因为 $f(x) = x$ 是奇函数, 从而 $a_0 = a_n = 0$, 且

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x \sin nx dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} x \sin nx dx = (-1)^{n-1} \frac{2}{n}$$

故按展开定理, $f(x)$ 可展开为 $2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{\sin nx}{n} = x$.

(3) 由于

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\pi - x}{2} dx = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\pi - x) dx = 0; \\ a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\pi - x}{2} \cos nx dx = \frac{\pi - x}{2n\pi} \sin nx \Big|_0^{2\pi} + \frac{1}{2n\pi} \int_0^{2\pi} \sin nx dx = 0; \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\pi - x}{2} \sin nx dx = -\frac{\pi - x}{2n\pi} \cos nx \Big|_0^{2\pi} - \frac{1}{2n\pi} \int_0^{2\pi} \cos nx dx = \frac{1}{n} \end{aligned}$$

故按展开定理, $f(x)$ 可展开为 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin nx}{n} = \frac{\pi - x}{2}$.

(4) 因为 $f(x) = |x|$ 为偶函数, 从而 $b_n = 0$, 且

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} x dx = \pi; \\ a_n &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} x \cos nx dx = \frac{2}{n\pi} x \sin nx \Big|_0^{\pi} - \frac{2}{n\pi} \int_0^{\pi} \sin nx dx = \frac{2}{n^2\pi} [(-1)^n - 1] \end{aligned}$$

故按展开定理, $f(x)$ 可展开为 $\frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos(2n+1)x}{(2n+1)^2} = |x|$.

例 7.3.2. 将函数 $f(x) = 1 - x^2$ ($0 \leq x \leq \pi$) 展开为余弦级数, 并求级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n^2}$ 的和.

由题意 $l = \pi$, $b_n = 0$ ($n = 1, 2, \dots$), 那么 $a_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (1 - x^2) dx = 2 - \frac{2\pi^2}{3}$,

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \cos nx dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \cos nx dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (1 - x^2) \cos nx dx \\ &= \frac{2}{\pi} \left(\frac{1 - x^2}{n} \sin nx - \frac{2x}{n^2} \cos nx + \frac{2}{n^3} \sin nx \right) \Big|_0^{\pi} = -\frac{4}{n^2} (-1)^n \end{aligned}$$

于是 $f(x) = 1 - \frac{\pi^2}{3} + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2}$, 将 $x = 0$ 代入可得 $f(0) = 1 - \frac{\pi^2}{3} + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2}$ 又由 $f(x) = 1 - x^2$ 知 $f(0) = 1$,

则 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n^2} = \frac{\pi^2}{12}$.

7.3.3 Fourier 级数综合性问题

已知 Fourier 展开求 Fourier 系数

例 7.3.3. 设 $f(x)$ 是在周期为 2 的周期函数且 $f(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & 1 < x < 2 \end{cases}$ $f(x)$ 的 Fourier 级数为 $\frac{a_0}{2} +$

$\sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$, 则 $n \geq 1$ 时, 求 a_n .

对于周期为 $2l$ 的周期函数的 Fourier 级数为 $\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{l} \right) + b_n \sin \frac{n\pi x}{l}$ 系数 $a_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \cos \frac{n\pi x}{l} dx$, $n = 1, 2, \dots$, 由题意知, $f(x)$ 的周期为 2 , 故 $l = 1$, 所以 $a_n = \int_{-1}^1 f(x) \cos n\pi x dx$, 即

$$\begin{aligned} a_n &= \int_0^2 f(x) \cos n\pi x dx = \int_0^1 f(x) \cos n\pi x dx + \int_1^2 f(x) \cos n\pi x dx = \int_0^1 x \cos n\pi x dx \\ &= \left. \frac{x}{n\pi} \sin n\pi x + \frac{1}{n^2\pi^2} \cos n\pi x \right|_0^1 = \frac{(-1)^n - 1}{n^2\pi^2}. \end{aligned}$$

定义 7.3.4 (平均收敛). 若函数列 $f_n(x)$ 满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \int_{-\pi}^{\pi} |f_n(x) - S(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} = 0$, 则称 $f_n(x)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 平均收敛于 $S(x)$.

引理 7.3.1. 若 $f(x), g(x)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 平方可积, 则

(1) $f(x)g(x)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 可积, 且

$$\left| \int_{-\pi}^{\pi} f(x)g(x) dx \right| \leq \int_{-\pi}^{\pi} |f(x)g(x)| dx \leq \left(\int_{-\pi}^{\pi} |f(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_{-\pi}^{\pi} |g(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}}$$

(2) $f(x) + g(x)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 可积, 且

$$\left(\int_{-\pi}^{\pi} |f(x) + g(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \leq \left(\int_{-\pi}^{\pi} |f(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\int_{-\pi}^{\pi} |g(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}}$$

定理 7.3.3 (均方逼近). 若 $f(x)$ 以 2π 为周期, 在 $[-\pi, \pi]$ 上平方可积, 则在所有 n 阶多项式 $T_n(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (\alpha_k \cos kx + \beta_k \sin kx)$ 中, 当 $T_n(x)$ 取 $f(x)$ 的 Fourier 级数的 n 阶部分和 $S_n(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kx + b_k \sin kx)$ 时, $f(x)$ 与 $T_n(x)$ 的均方误差最小, 即

$$\min \|f(x) - T_n(x)\| = \|f(x) - S_n(x)\|.$$

第 8 章

微分方程

“读读欧拉，读读欧拉，他是我们大家的老师。”

——拉普拉斯

微分方程是数学中的一个重要分支，它研究的是包含未知函数及其导数的方程。微分方程在物理学、工程学、经济学等领域中有广泛的应用。

微分方程可以分为常微分方程和偏微分方程两大类（本章将不讨论偏微分方程）。常微分方程中，未知函数只依赖于一个自变量，而偏微分方程中，未知函数依赖于多个自变量。常微分方程的解可以是一个函数，也可以是一个函数族。解的形式和性质取决于方程的类型和边界条件。解常微分方程的方法包括分离变量法、变量代换法、特解法、级数法等。

8.1 一阶微分方程

一阶微分方程是指只涉及一个未知函数及其导数的微分方程。通常形式为： $\frac{dy}{dx} = f(x, y)$ ，其中 y 是未知函数， x 是自变量， $f(x, y)$ 是关于 x 和 y 的函数。解一阶微分方程通常需要使用微积分知识和积分技巧。常见的一阶微分方程包括变量分离微分方程、可分离变量微分方程、齐次微分方程等。

8.1.1 变量分离方程

定义 8.1.1 (变量分离方程)。 形如 $\frac{dy}{dx} = f(x)g(y)$ 的方程称为变量分离微分方程。

例 8.1.1. (把原方程化为分离变量方程) 求下列微分方程的通解

$$\begin{array}{l|l|l} (1) \tan x \cdot \frac{dy}{dx} - y = 5. & (2) x^2 y' + y + 1. & (3) y dx + (x^2 - 4x) dy = 0. \\ (4) 3e^x \tan y dx + (1 - e^x) \sec^2 y dy = 0. & (5) \frac{dy}{dx} = (1 - y^2) \tan x. & (6) y' \tan x = y \ln y. \end{array}$$

(1) 原方程化为 $\frac{dy}{y+5} = \frac{dx}{\tan x}$, 两边积分得 $\ln|y+5| = \ln|\sin x| + \ln C$, 即 $y = C \sin x - 5$.

(2) 原方程化为 $\frac{dy}{y+1} = \frac{dx}{x^2}$, 两边积分得 $\ln|y+1| = C - \frac{1}{x}$, 即 $y = Ce^{-\frac{1}{x}} - 1$.

(3) 原方程化为 $\frac{dy}{y} = \frac{dx}{4x-x^2}$, 两边积分得 $\ln|y| = \frac{1}{4} \ln \left| \frac{x}{4-x} \right| + \ln C$, 即 $y = \sqrt[4]{\frac{Cx}{4-x}}$.

(4) 原方程化为 $\frac{3e^x}{e^x-1} dx = \frac{dy}{\sin y \cos y}$, 两边积分得 $3 \ln|e^x-1| = \ln C |\tan y|$, 即 $(e^x-1)^3 = C \tan y$.

(5) 原方程化为 $\frac{dy}{1-y^2} = \tan x dx$, 两边积分得 $\frac{1}{2} \ln \left| \frac{1+y}{1-y} \right| = -\ln C |\cos x|$, 即 $\sqrt{\frac{1+y}{1-y}} = C \sec x$.

(6) 原方程化为 $\frac{dy}{y \ln y} \cot x dx$, 两边积分得 $\ln|\ln y| = \ln C |\sin x|$, 即 $y = Ce^{\sin x}$.

例 8.1.2. 求微分方程 $\cos y dx + (1 + e^{-x}) \sin y dy = 0$ 满足 $y(0) = \frac{\pi}{4}$ 的特解.

原式化为 $\frac{dx}{1 + e^{-x}} = -\tan y dy$, 两边积分, 得 $\ln|\cos y| = \ln(1 + e^x) + \ln C$, 即 $\cos y = C(1 + e^x)$, 又 $y(0) = \frac{\pi}{4}$, 故 $C = \frac{\sqrt{2}}{4}$, 所以该微分方程的特解为 $y = \arccos \frac{\sqrt{2}}{4}(1 + e^x)$.

例 8.1.3. 设 $F(x)$ 是 $f(x)$ 的一个原函数, 且 $\frac{f(x)}{F(x)} = -2$, $F(0) = 1$, 求 $\int_0^{+\infty} F(x) dx$.

因为 $F(x)$ 是 $f(x)$ 的一个原函数, 所以 $F'(x) = f(x)$, 且 $f(x) = -2F(x)$, 则

$$F'(x) = -F(x) \Rightarrow \frac{dF(x)}{F(x)} = -2dx$$

两边积分得 $F(x) = Ce^{-2x}$, 又 $F(0) = 1$, 所以 $C = 1$, 于是

$$\int_0^{+\infty} e^{-2x} dx = -\frac{1}{2} e^{-2x} \Big|_0^{+\infty} = \frac{1}{2}.$$

例 8.1.4. 设函数 $y = f(x)$ 在 $(0, +\infty)$ 内严格单调递增且可导, $x = f^{-1}(y)$ 为其反函数,

$$\forall x, y > 0, xy \leq \frac{1}{2}[xf(x) + yf^{-1}(y)]$$

求 $f(x)$ 的解析式.

令 $y = f(u)$, 则由题设知

$$xf(u) \leq \frac{1}{2}[xf(x) + uf(u)] \Rightarrow x[f(u) - f(x)] \leq f(u)(u - x)$$

于是 $\forall x \in (0, +\infty)$, 可得

$$\lim_{u \rightarrow x^+} \frac{f(u) - f(x)}{u - x} \leq \lim_{u \rightarrow x^+} \frac{f(u)}{x} \Rightarrow f'_+(x) \leq \frac{f(x)}{x}$$

$$\lim_{u \rightarrow x^-} \frac{f(u) - f(x)}{u - x} \geq \lim_{u \rightarrow x^-} \frac{f(u)}{x} \Rightarrow f'_-(x) \geq \frac{f(x)}{x}$$

又因为 $f'_-(x) - f'_+(x)$, 则必有 $f'(x) = \frac{f(x)}{x}$, 分离变量积分可得该方程的通解为 $f(x) = Cx$, 又因为函数在 $(0, +\infty)$ 上严格单调递增, 则 $C > 0$, 即 $f(x) = Cx$, 其中 C 为正常数.

8.1.2 齐次微分方程

定义 8.1.2 (齐次微分方程的定义). 形如 $\frac{dy}{dx} = F\left(\frac{y}{x}\right)$ 的方程称为齐次微分方程.

例 8.1.5. 求微分方程 $y' = \frac{y}{x} + \frac{x}{y}$ 的通解.

令 $u = \frac{y}{x}$, 则 $y = ux$, $\frac{dy}{dx} = u + x\frac{du}{dx}$, 代入原方程, 化为 $x\frac{du}{dx} = \frac{1}{u}$, 再化为 $udu = \frac{dx}{dx}$, 两边积分 $\int u du = \int \frac{dx}{dx}$, 解得 $\frac{u^2}{2} = \ln|Cx|$, 故原方程的通解为 $\frac{1}{2}\frac{y^2}{x^2} = \ln|Cx|$, 其中 C 是任意常数.

例 8.1.6. 求微分方程 $\frac{dy}{dx} - \frac{y}{x} = \frac{1}{\ln(x^2 + y^2) - 2\ln x}$ 的通解.

$$\text{原式} \Rightarrow \frac{dy}{dx} - \frac{y}{x} = \ln^{-1} \left[1 + \left(\frac{y}{x} \right)^2 \right] \xrightarrow{\frac{y}{x}=z} \ln(1+z^2) dz = \frac{dx}{x}, \text{ 两边积分, 得} \\ z \ln(1+z^2) - 2z + 2 \arctan z = \ln|x| + C$$

$$\text{即 } \frac{y}{x} \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) - \frac{2y}{x} + 2 \arctan \frac{y}{x} = \ln|x| + C.$$

例 8.1.7 (1996 数学 (三)). 求微分方程 $\frac{dy}{dx} = \frac{y - \sqrt{x^2 + y^2}}{x}$ 的通解.

$$\text{原式} \Rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{y}{x} - \sqrt{1 + \left(\frac{y}{x} \right)^2} \xrightarrow{\frac{y}{x}=z} \frac{-\frac{dz}{x}}{-\sqrt{1+z^2}} = \frac{dx}{x}, \text{ 两边积分, 得} \\ -\ln \left| \sqrt{1+z^2} + z \right| = \ln|x| + \ln C$$

$$\text{即 } \frac{1}{\sqrt{1+z^2}+z} = Cx \Rightarrow \sqrt{x^2+y^2} + y = C.$$

可化为齐次方程的微分方程形如方程

$$\frac{dy}{dx} = f \left(\frac{a_1x + b_1y + c_1}{a_2x + b_2y + c_2} \right)$$

其中 $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ 为常数, 且 $c_1^2 + c_2^2 \neq 0$. 当 $\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} \neq 0$ 时, 令 $x = X + h, y = Y + k$, 由

$$\begin{cases} a_1h + b_1k + c_1 = 0 \\ a_2h + b_2k + c_2 = 0 \end{cases} \quad \text{解出 } h \text{ 与 } k, \text{ 可将原方程化为齐次方程}$$

$$\frac{dY}{dX} = f \left(\frac{a_1X + b_1Y}{a_2X + b_2Y} \right) = f \left(\frac{a_1 + b_1 \frac{Y}{X}}{a_2 + b_2 \frac{Y}{X}} \right) = g \left(\frac{Y}{X} \right)$$

当 $\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = 0$ 时, 即 $\frac{a_1}{a_2} = \frac{b_1}{b_2} = k$, 可设 $u = a_2x + b_2y$, 代入原方程后可化为可分离变量的微分方程, 即有

$$\frac{dy}{dx} = f \left(\frac{ku + c_1}{u + c_2} \right) = g(u), \quad \frac{du}{dx} = a_2 + b_2g(u).$$

8.1.3 线性微分方程

定义 8.1.3 (一阶线性微分方程). 形如 $\frac{dy}{dx} + p(x)y = q(x)$ 的方程称为一阶线性微分方程.

定理 8.1.1 (通解公式). 对于一阶线性微分方程, 则有通解公式为

$$y = e^{-\int p(x)dx} \left[\int q(x) \cdot e^{\int p(x)dx} dx + C \right].$$

例 8.1.8. 用一阶线性微分方程的通解公式, 求解例题 8.1.5.

原方程化为 $yy' - \frac{1}{x}y^2 = x$, 即 $\frac{dy}{dx} \left(\frac{1}{2}y^2 \right) - \frac{2}{x} \left(\frac{1}{2}y^2 \right) = x$, 令 $z = \frac{1}{2}y^2$, 上式化为 $\frac{dz}{dx} - \frac{2}{x}z = x$, 由公式得通解为

$$z = e^{2 \int \frac{dx}{x}} \left[\int xe^{-2 \int \frac{dx}{x}} dx + C \right] = x^2(\ln|x| + C)$$

故原方程的通解为 $\frac{1}{2}y^2 = x^2(\ln|x| + C)$.

8.1.4 Bernoulli 微分方程

定义 8.1.4. 形如 $\frac{dy}{dx} + p(x)y = q(x)y^n$, $n \neq 0, 1$ 的方程称为 Bernoulli 微分方程.

例 8.1.9. 将例题 8.1.5 化为 Bernoulli 方程, 并求其通解.

原方程化为 $y' - \frac{1}{x}y = xy^{-1}$, 此为 Bernoulli 方程, 其中 $n = -1$, 令 $z = y^{1-n} = y^2$, 代入上述方程, 化简得 $\frac{1}{2}\frac{dz}{dx} - \frac{1}{x}z = x$,
即 $\frac{dz}{dx} - \frac{2}{x}z = 2x$, 由公式得通解为

$$z = e^{2 \int \frac{dx}{x}} \left[\int 2xe^{-2 \int \frac{dx}{x}} dx + C \right] = x^2(2\ln|x| + C)$$

故原方程的通解为 $y^2 = x^2(2\ln|x| + C)$.

例 8.1.10 (2023 合肥工业大学). 设 $f(x)$ 是连续函数, 且满足 $f(x) = e^x + e^x \int_0^x f^2(t)dt$, 求 $f(x)$.

由题意可得 $f(0) = 1$, 对方程两边 x 同时求导得

$$f'(x) = e^x + e^x \int_0^x f^2(t)dt + e^x f^2(x) = f(x) + e^x f^2(x)$$

该方程为 Bernoulli 方程, 令 $z(x) = \frac{1}{f(x)}$, 那么有 $z'(x) + z(x) = -e^x$, 由通解公式得

$$z(x) = e^{-\int dx} \left[\int -e^x \cdot e^{\int dx} dx + C \right] = -\frac{1}{2}e^x + Ce^{-x}$$

且 $z(0) = 1$, 解得 $C = \frac{3}{2}$, 故 $f(x) = \frac{2}{3e^{-x} - e^x}$.

例 8.1.11. 求微分方程 $y' \cos y = (1 + \cos x \sin y) \sin y$ 的通解.

令 $\sin y = z$, 那么原方程可化为 $\frac{dz}{dx} = z(z \cos x + 1)$ 即 $\frac{dz}{dx} - z = z^2 \cos x$, 再令 $z^{-1} = u$, 整理上式得 $\frac{du}{dx} + u = -\cos x$,
由通解公式:

$$u = e^{-\int dx} \left[- \int e^{\int dx} dx + C_1 \right] = -\frac{1}{2}(\cos x + \sin x) + C_1 e^{-x}$$

回代 $u = \frac{1}{\sin y}$, 得原方程的通解为 $\frac{2}{\sin y} + \cos x + \sin x = Ce^{-x}$.

例 8.1.12 (第十四届大学生数学竞赛). 求方程的通解 $\frac{dy}{dx} x \ln x \sin y + \cos y(1 - x \cos y)dx = 0$.

令 $\cos y = u$, 那么 $u' = -\sin y \cdot y'$, 原式化为 $u' - \frac{1}{x \ln x}u = -\frac{u^2}{\ln x}$, 则

$$\text{原式} \xrightarrow[n=2]{z=u^{1-n}} \frac{dz}{dx} + \frac{1}{x \ln x}z = \frac{1}{\ln x} \Rightarrow z = e^{-\int \frac{dx}{x \ln x}} \left[\int \frac{1}{\ln x} \cdot e^{\int \frac{dx}{x \ln x}} dx + C \right]$$

$$z = \frac{x+C}{\ln x} \Rightarrow \cos y = \frac{\ln x}{x+C}.$$

8.1.5 恰当方程与积分因子

恰当方程

定义 8.1.5. 对于微分方程

$$P(x, y)dx + Q(x, y)dy = 0$$

若 $\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial Q}{\partial x}$, 则该方程称为恰当方程或全微分方程.

例 8.1.13. 求微分方程 $(\sin y - ye^{-x})dx + (x \cos y + e^{-x})dy = 2xdx$ 的通解

记 $P(x, y) = \sin y - ye^{-x}$, $Q(x, y) = x \cos y + e^{-x}$, 则由

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \cos y - e^{-x} = \frac{\partial Q}{\partial x}$$

知原方程为全微分方程, 且曲线积分 $\int_{(x_0, y_0)}^{(x, y)} Pdx + Qdy$ 与路径无关, 取 $(x_0, y_0) = (0, 0)$, 原函数为

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \int_{(0, 0)}^{(x, y)} P(x, y)dx + Q(x, y)dy = \int_0^x P(x, 0)dx + \int_0^y Q(x, y)dy \\ &= \int_0^x (-2x)dx + \int_0^y (x \cos y + e^{-x})dy = -x^2 + x \sin y + ye^{-x} \end{aligned}$$

故原方程的通解为 $u(x, y) \equiv C$, 即 $x \sin y + ye^{-x} - x^2 \equiv C$.

例 8.1.14. 求微分方程 $y''(3y'^2 - x) = y'$ 的通解.

原方程化为 $y''(3y'^2 - x) - y' = 0$, 且注意到 $d(y'^3) = 3y'^2$, $d(xy') = y' + xy''$, 于是原式化为

$$d(y'^3 - xy') = 0 \Rightarrow y'^3 - xy' = C_1$$

令 $p = y'$, 那么 $dx = \frac{dy}{p}$, 则 $p^3 - xp = C_1$, 即 $x = p^2 - \frac{C_1}{p}$, 两边全微分得

$$dx = 2pdः + \frac{C_1 dp}{p^2}$$

代入 $dx = \frac{dy}{p}$, 得 $dy = \left(2p^2 + \frac{C_1}{p}\right)dp$, 为变量分离方程, 于是两边积分得

$$\int dy = \int \left(2p^2 + \frac{C_1}{p}\right)dp \Rightarrow y = \frac{2}{3}p^3 + C_1 \ln p + C_2$$

其中 $x = p^2 - \frac{C_1}{p}$.

以下一些简单函数的全微分公式, 将对我们较快地进行这种重新组合有所帮助.

(1) $xdy + ydx = d(xy)$	(2) $xdx + ydy = \frac{1}{2}d(x^2 + y^2)$
(3) $\frac{xdy - ydx}{x^2} = d\left(\frac{y}{x}\right)$	(4) $\frac{xdy - ydx}{y^2} = d\left(-\frac{x}{y}\right)$
(5) $\frac{2xydy - y^2dx}{x^2} = d\left(\frac{y^2}{x}\right)$	(6) $\frac{2xydx - x^2dy}{y^2} = d\left(\frac{x^2}{y}\right)$
(7) $\frac{xdx + ydy}{x^2 + y^2} = \frac{1}{2}d[\ln(x^2 + y^2)]$	(8) $\frac{xdy - ydx}{x^2 + y^2} = d\left(\arctan \frac{y}{x}\right)$
(9) $\frac{xdy - ydx}{x^2 - y^2} = \frac{1}{2}d\left(\ln \frac{x+y}{x-y}\right)$	(10) $\frac{xdy - ydx}{xy} = d\left(\ln \frac{y}{x}\right)$

积分因子

定理 8.1.2 (积分因子). 若微分方程 $P(x, y)dx + Q(x, y)dy = 0$ 不满足 $\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial Q}{\partial x}$, 令 $\Delta_\partial = \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial x}$, 那么对于以下特殊情况, 可确定积分因子.

(1) 若 $\frac{\Delta_\partial}{Q}$ 与 y 无关, 则有积分因子 $\mu(x) = \exp \int \frac{\Delta_\partial}{Q} dx$.

(2) 若 $\frac{\Delta_\partial}{P}$ 与 x 无关, 则有积分因子 $\mu(y) = \exp \int \frac{-\Delta_\partial}{P} dy$.

(3) 若满足 $f(mx^a + ny^b) = \frac{\Delta_\partial}{max^{a-1}Q - nby^{b-1}P}$, 则有积分因子

$$\mu(xy) = \exp \int f(mx^a + ny^b) d(mx^a + ny^b).$$

(4) 若满足 $f(\sqrt{x^a y^b}) = \frac{2\sqrt{x^a y^b} \Delta_\partial}{x^{a-1} y^{b-1} (ayQ - bxP)}$, 则有积分因子

$$\mu(xy) = \exp \int f(\sqrt{x^a y^b}) d(\sqrt{x^a y^b}).$$

例 8.1.15. 求解下列方程.

$$\left| \begin{array}{l} (1) (x + y^2)dx - 2xydy = 0. \\ (2) (x - y)dx + (x + y)dy = 0. \\ (3) (1 + xy)ydx + (1 - xy)x dy = 0. \\ (4) xdx = \left(\frac{x^2}{y} - y^3 \right) dy. \end{array} \right.$$

(1) $P(x, y) = x + y^2$, $Q = -2xy$, 于是 $\frac{1}{Q} \left(\frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial x} \right) = -\frac{2}{x}$, 于是有积分因子

$$\mu(x) = \exp \left(-2 \int \frac{dx}{x} \right) = \frac{1}{x^2}$$

方程两边同时乘以积分因子 $\mu(x)$, 并化简为 $d(\ln|x|) + d\left(-\frac{y^2}{x}\right) = 0$, 故原方程的通解为

$$\ln|x| - \frac{y^2}{x} \equiv C.$$

(2) $\frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial x} = -2$, 于是 $\frac{-2}{2(xQ - yP)} = -\frac{1}{x^2 + y^2}$, 则有积分因子

$$\mu(xy) = \exp \left(- \int \frac{d(x^2 + y^2)}{x^2 + y^2} \right) = \frac{1}{x^2 + y^2}$$

方程两边同时乘以积分因子 $\mu(xy)$, 得 $\frac{x-y}{x^2+y^2}dx + \frac{x+y}{x^2+y^2}dy = 0$, 整理得

$$\frac{x dy - y dx}{x^2 + y^2} + \frac{x dx + y dy}{x^2 + y^2} = 0 \Rightarrow d\left(\arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right) + d\left(\frac{\ln(x^2 + y^2)}{2}\right) = 0$$

故原方程的通解为 $\arctan\frac{y}{x} + \frac{1}{2} \ln(x^2 + y^2) \equiv C$.

(3) $\Delta_\partial = 4xy$, 于是 $\frac{2x^2y^2 \cdot \Delta_\partial}{x^3y^3[4(-2xy)]} = -\frac{1}{xy}$, 则有积分因子 $\mu(xy) = \exp\left(-\int \frac{dx}{xy}\right) = \frac{1}{xy}$, 方程两边同时乘以积分因子 $\mu(xy)$, 得 $\frac{1+xy}{x}dx + \frac{1-xy}{y}dy = 0$, 整理得

$$\begin{aligned} \frac{1+xy}{x}dx + \frac{1-xy}{y}dy &= \frac{dx}{x} + ydx + \frac{dy}{y} - xdy = \left(\frac{dx}{x} + \frac{dy}{y}\right) + (ydx - xdy) \\ &= \frac{1}{xy}(ydx - xdy) + \frac{1}{xy}\left(\frac{dx}{x} + \frac{dy}{y}\right) = \frac{y}{x} \cdot \frac{ydx - xdy}{y^2} + \frac{ydx + xdy}{x^2y^2} \\ &= d\left(\ln \frac{x}{y}\right) + d\left(-\frac{1}{xy}\right) = d\left(\ln \frac{x}{y} - \frac{1}{xy}\right) = 0 \end{aligned}$$

故原方程的通解为 $\ln \frac{x}{y} - \frac{1}{xy} \equiv C$.

(4) 方程化为 $xdx + \left(y^3 - \frac{x^2}{y}\right)dy = 0$, 那么 $\Delta_\partial = \frac{2x}{y}$, 那么有积分因子 $\mu(y) = \exp \int \frac{-\Delta_\partial}{P} dy = \frac{1}{y^2}$, 方程两边同时乘

以积分因子 $\mu(y)$, 得 $\frac{x}{y^2}dx + \left(y - \frac{x^2}{y^3}\right)dy = 0$, 整理得

$$\frac{x}{y^2}dx + \left(y - \frac{x^2}{y^3}\right)dy = \frac{2x}{y^2}dx + 2\left(y - \frac{x^2}{y^3}\right)dy = 2ydy + \frac{2xydx}{y^3} - \frac{2x^2dy}{y^3} = d(y^2) + d\left(\frac{x^2}{y^2}\right) = 0$$

故原方程的通解为 $y^2 + \frac{x^2}{y^2} \equiv C$.

定理 8.1.3. 若 $\mu = \mu(x, y)$ 是微分方程 $P(x, y)dx + Q(x, y)dy = 0$ 的一个积分因子, 使得

$$\mu(x, y)P(x, y)dx + \mu(x, y)Q(x, y)dy = d\Phi(x, y)$$

则 $\mu(x, y)g(\Phi(x, y))$ 也是该方程的一个积分因子, 其中 g 是任意一可微的非零函数.

定理 8.1.4 (积分因子的存在性定理). 如果微分方程 $P(x, y)dx + Q(x, y)dy = 0$ 有通解 $u(x, y) = C$, 那么它总有一个积分因子 $\mu = \mu(x, y)$, 同时 $\mu\varphi(u)$ 也是该方程的一个积分因子, 并且方程的积分因子必须具有 $\mu\varphi(u)$ 的形式, 其中 $\varphi(u)$ 是 u 的任意一个可微函数.

例 8.1.16. 求解下列方程.

$$(1) x(4ydx + 2xdy) + y^3(3ydx + 5xdy) = 0. \quad | \quad (2) (x^3y - 2y^2)dx + x^4dy = 0.$$

(1) 对第一组, 有

$$x(4ydx + 2xdy) = x[(2ydx + 2xdy) + 2ydx] = x[2d(xy) + 2ydx] = 2x d(xy) + 2xydx = d(2x^2y)$$

则其积分因子和二元函数为

$$\mu_1 = 1, u_1 = 2x^2y$$

对第二组, 有

$$y^3(3ydx + 5xdy) = 3y^4dx + 5xy^3dy$$

易见它有一个积分因子 $\mu_2 = \frac{1}{xy^4}$, 相乘后得

$$\frac{3}{x}dx + \frac{5}{y}dy = 3d(\ln|x|) + 5d(\ln|y|) = d(\ln|x^3y^5|)$$

相应地有 $u_2 = \ln|x^3y^5|$, 根据积分因子的存在性定理, 可以考虑选择适当的可微函数 φ 与 $\tilde{\varphi}$ 使得

$$1 \cdot \varphi(2x^2y) = \frac{1}{xy^4} \tilde{\varphi}(\ln|x^3y^5|)$$

取 $\varphi(2x^2y) = 2x^2y$, $\tilde{\varphi}(\ln|x^3y^5|) = 2x^3y^5$, 则得到原方程的一个积分因子 $\mu = 2x^2y$, 将它乘原方程两边, 得

$$2x^2y d(2x^2y) + 6x^2y^5 dx + 10x^3y^4 dy = 0$$

即

$$\frac{1}{2}d(2x^2y)^2 + 2y^5 dx^3 + 2x^3 dy^5 = d(2x^4y^2) + d(2x^2y^5) = d(2x^4y^2 + 2x^3y^5) = 0$$

故原方程的通解为 $x^4y^2 + x^3y^5 = C$.

(2) 将方程改写为

$$x^3ydx + x^4dy + (-2y^2)dx = 0$$

即

$$x^3(ydx + xdy) + (-2y^2)dx = 0 \Rightarrow x^3 d(xy) + (-2y^2)dx = 0$$

第一组有积分因子 $\mu_1 = \frac{1}{x^3}$ 和原函数 $u_1 = xy$; 第二组有积分因子 $\mu_2 = \frac{1}{-2y^2}$ 和原函数 $u_2 = x$, 现寻找可微函数 φ 与 $\tilde{\varphi}$, 使得

$$\frac{1}{x^3}\varphi(xy) = \frac{1}{-2y^2}\tilde{\varphi}$$

取 $\varphi(xy) = \frac{1}{(xy)^2}$, $\tilde{\varphi} = -\frac{2}{x^5}$, 则得到原方程的一个积分因子 $\mu = \mu(x, y) = \frac{1}{x^5y^2}$, 将它乘原方程两边, 得

$$\frac{d(xy)}{x^2y^2} - \frac{2}{x^5}dx = 0$$

即

$$d\left(-\frac{1}{xy}\right) + d\left(\frac{1}{2x^4}\right) = 0$$

故原方程的通解为 $\frac{1}{2x^4} - \frac{1}{xy} = C$.

8.2 高阶微分方程

高阶微分方程是指涉及一个未知函数及其多阶导数的微分方程. 通常形式为:

$$F\left(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}\right) = 0$$

其中 y 是未知函数, $y^{(i)}$ ($i = 0, 1, \dots, n$) 是 y 的 i 阶导数, F 是关于 $x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}$ 的函数, 解高阶微分方程需要使用微积分知识、积分技巧以及一些特定的方法, 如常数变易法、特征方程法等.

8.2.1 常系数齐次线性微分方程

二阶常系数线性齐次微分方程的通解

定理 8.2.1 (二阶常系数线性齐次微分方程的通解结构). 设

$$y'' + py' + qy = 0 \tag{1}$$

(1) 特征方程有两个相异实根 $r_1 \neq r_2$, 则方程 (1) 的通解为 $Y = C_1 e^{r_1 x} + C_2 e^{r_2 x}$;

(2) 特征方程有两个相等实根 $r_1 = r_2 = r$, 则方程 (1) 的通解为 $Y = (C_1 + C_2 x) e^{rx}$;

(3) 特征方程有一对共轭复根 $r_{1,2} = \alpha \pm i\beta$, 则方程 (1) 的通解为

$$Y = e^{\alpha x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x)$$

例 8.2.1 (第十三届数学竞赛决赛). 求区间 $[0, 1]$ 上的连续函数 $f(x)$, 使之满足

$$f(x) = 1 + (1-x) \int_0^x y f(y) dy + x \int_x^1 (1-y) f(y) dy.$$

分别令 $x = 0, 1$, 代入关系式, 得 $f(0) = f(1) = 1$, 并对关系式求导, 有

$$f'(x) = - \int_0^x yf(y)dy + \int_x^1 (1-y)f(y)dy$$

再次求导有

$$f''(x) + f(x) = 0$$

该常系数齐次线性微分方程的特征方程为 $r^2 + 1 = 0$, 特征根为 $r = \pm i$, 故通解为

$$f(x) = C_1 \cos x + C_2 \sin x$$

代入初值 $f(0) = f(1) = 1$, 得

$$C_1 = 1, C_2 = \frac{1 - \cos 1}{\sin 1} = \tan \frac{1}{2}$$

故所求函数为

$$f(x) = \cos x + \tan \frac{1}{2} \sin x.$$

n 阶常系数线性齐次微分方程

定理 8.2.2 (n 阶常系数线性齐次微分方程通解结构). 设 n 阶常系数线性齐次微分方程是

$$y^{(n)} + p_1 y^{(n-1)} + p_2 y^{(n-2)} + \cdots + p_{n-1} y' + p_n y = 0 \quad (2)$$

其中 p_1, p_2, \dots, p_n 是常数, 代数方程

$$r^n + p_1 r^{n-1} + p_2 r^{n-2} + \cdots + p_{n-1} r + p_n = 0$$

称为微分方程 (2) 的特征方程, 特征方程的根叫作微分方程 (2) 的特征根.

(1) 如果 r_1 是特征方程的单根, 则

$$y = C e^{r_1 x}$$

是微分方程 (2) 的解;

(2) 如果特征方程有一对共轭复根 $r_1 = \alpha + i\beta, r_2 = \alpha - i\beta$, 则

$$y = e^{\alpha x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x)$$

是微分方程 (2) 的解;

(3) 如果 r_1 是特征方程的 k 重根, 则

$$y = (C_1 + C_2 x + \cdots + C_k x^{k-1}) e^{r_1 x}$$

是微分方程 (2) 的解;

(4) 如果 $r_1 = \alpha + i\beta, r_2 = \alpha - i\beta$ 都是特征方程的 k 重根, 则

$$y = e^{\alpha x} [(C_1 + C_2 x + \cdots + C_k x^{k-1}) \cos \beta x + (D_1 + D_2 x + \cdots + D_k x^{k-1}) \sin \beta x]$$

是微分方程 (2) 的解.

8.2.2 常系数非齐次线性微分方程

二阶常系数非齐次线性微分方程的通解结构

例 8.2.2 (1997 数二). 设某个二阶常系数非齐次线性微分方程有三个特解:

$$y_1 = xe^x + e^{2x}, \quad y_2 = xe^x + e^{-x}, \quad y_3 = xe^x + e^{2x} - e^{-x}$$

求该微分方程, 并给出其通解.

因为 $\frac{y_1 - y_3}{(y_1 - y_2) + (y_1 - y_3)} = \frac{e^{-x}}{e^{2x}} \neq C$, 于是该方程的通解为

$$y = C_1 e^{-x} + C_2 e^{2x} + xe^x$$

分别求一、二阶导数, 有

$$y' = -C_1 e^{-x} + 2C_2 e^{2x} + e^x(x+1), \quad y'' = C_1 e^{-x} + 4C_2 e^{2x} + e^x(x+2)$$

于是

$$\begin{pmatrix} -e^{-x} & 2e^{2x} \\ e^{-x} & 4e^{2x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y' - e^x(x+1) \\ y'' - e^x(x+2) \end{pmatrix}$$

即

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -e^{-x} & 2e^{2x} \\ e^{-x} & 4e^{2x} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} y' - e^x(x+1) \\ y'' - e^x(x+2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3}e^x[y'' - e^x(x+2)] - \frac{2}{3}e^x[y' - e^x(x+1)] \\ \frac{1}{6}e^{-2x}[y'' - e^x(x+2)] + \frac{1}{6}e^{-2x}[y' - e^x(x+1)] \end{pmatrix}$$

消去 C_1, C_2 得该微分方程为 $y'' - y' - 2y = (1 - 2x)e^x$.

微分算子法

微分算子法是在求解非齐次线性微分方程

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1} y' + a_n y = f(x)$$

的一个特解时常采用的一种方法. 具体地说, 在求解常系数微分方程上述方程时, 可以先求解其特征方程, 得到相应齐次方程的通解, 再求出非齐次方程的一个特解即可.

定义 8.2.1 (微分算子). 为了求非齐次方程的一个特解, 引入微分算子:

$$D = \frac{d}{dx}, \quad D^2 = \frac{d^2}{dx^2}, \quad \dots, \quad D^n = \frac{d^n}{dx^n}$$

以及算子多项式

$$L(D) = D^n + a_1 D^{n-1} + \cdots + a_{n-1} D + a_n$$

这样一来, 微分方程可以写成

$$L(D)y = f(x)$$

显然, 如果记 $\frac{1}{D}f(x)$ 为此方程的任一解, 则

$$L(D)\left(\frac{1}{L(D)}f(x)\right) = f(x)$$

因此, 在形式上可以把 $\frac{1}{D}f(x)$ 看成是 $L(D)$ 的逆算子.

定理 8.2.3. $\frac{1}{D}f(x) = \int f(x)dx$.

定理 8.2.4. 对于任意常数 a , $\frac{1}{D-a}f(x) = e^{ax} \int e^{-ax} f(x)dx$.

定理 8.2.5. 对于任意常数 α 和 β , $\frac{1}{L(D)}(\alpha u(x) + \beta v(x)) = \alpha \frac{1}{L(D)}u(x) + \beta \frac{1}{L(D)}v(x)$.

定理 8.2.6. $\frac{1}{L_1(D)L_2(D)}f(x) = \frac{1}{L_1(D)}\left(\frac{1}{L_2(D)}f(x)\right) = \frac{1}{L_2(D)}\left(\frac{1}{L_1(D)}f(x)\right)$.

定理 8.2.7 (算子特性). (1) $F(D) = D^m$, $\frac{1}{F(D)}f^{(m)}(x) = f(x)$;

(2) $F(D) = D - k$ 时, $\frac{1}{F(D)}e^{bx} = \frac{e^{bx}}{b-k}$, $b \neq k$;

(3) $F(D) = (D-b)(D-a)$ 时, $\frac{1}{F(D)}f(x) = \frac{1}{D-b}\frac{1}{D-a}f(x)$, 当 $ab \neq 0$ 时, $\frac{1}{D-b}\frac{1}{D-a} = \frac{1}{ab}$;

(4) $\frac{1}{F(D)}e^{kx} = \frac{1}{F(k)}e^{kx}$, $F(k) \neq 0$;

(5) $\frac{1}{F(D)}u(x)e^{kx} = e^{kx}\frac{1}{F(D+k)}u(x)$;

(6) $\frac{1}{F(D)}[f_1(x) + f_2(x)] = \frac{1}{F(D)}f_1(x) + \frac{1}{F(D)}f_2(x)$;

(7) $F(D) = D - k$, $\frac{1}{F(D)}x^\alpha = \left(-\sum_{n=0}^{\alpha} \frac{D^n}{k^{n+1}}\right)x^\alpha$.

例 8.2.3 (2010 数学 (一)). 求微分方程 $y'' - 3y' + 2y = 2xe^x$ 的通解.

记 $D = \frac{d}{dx}$, $Iy = y$, 则原方程可改写为 $(D^2 - 3D + 2I)y = 2xe^x$, 即 $(D - I)(D - 2I)y = 2xe^x$, 令 $(D - 2I)y = z(x)$, 则有 $(D - I)z(x) = 2xe^x$, 即 $\frac{dz(x)}{dx} - z(x) = 2xe^x$, 解得

$$z(x) = e^{\int dx} \left[\int 2xe^x \cdot e^{-\int dx} + C_1 \right] = e^x (x^2 + C_1)$$

再由 $(D - 2I)y = z(x)$ 化为 $\frac{dy}{dx} - 2y = e^x (x^2 + C_1)$, 故原方程的通解为

$$\begin{aligned} y &= e^{\int dx} \left[\int e^x (x^2 + C_1) \cdot e^{-\int 2dx} + C_2 \right] = e^{2x} \left[\int e^{-x} (x^2 + C_1) dx + C_2 \right] \\ &= e^{2x} [(-x^2 e^{-x} - 2xe^{-x} - 2e^{-x}) - C_1 e^{-x} + C_2] = (-x^2 - 2x - 2 - C_1) e^x + C_2 e^{2x} \end{aligned}$$

其中 C_1, C_2 为任意常数.

例 8.2.4. 求微分方程 $y'' + y' - 2y = \frac{e^x}{1 + e^x}$.

记 $D = \frac{d}{dx}$, 则原方程可改写为 $(D^2 + D - 2)y = \frac{e^x}{1 + e^x}$, 即 $(D + 2)(D - 1)y = \frac{e^x}{1 + e^x}$, 令 $z(x) = (D - 1)y$, 则有 $(D + 2)z(x) = \frac{e^x}{1 + e^x}$, 即 $\frac{dz(x)}{dx} + 2z = \frac{e^x}{1 + e^x}$, 解得

$$z(x) = e^{-2\int dx} \left[\int \frac{e^x}{1 + e^x} \cdot e^{2\int dx} dx + C_1 \right] = \frac{1}{2} - \frac{1}{e^x} + \frac{\ln(e^x + 1)}{e^{2x}}$$

再由 $(D - 1)y = z(x)$ 化为 $\frac{dy}{dx} - y = \frac{1}{2} - \frac{1}{e^x} + \frac{\ln(e^x + 1)}{e^{2x}}$, 故原方程的通解为

$$\begin{aligned} y &= e^{\int dx} \left\{ \int \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{e^x} + \frac{\ln(e^x + 1)}{e^{2x}} \right] \cdot e^{-\int dx} dx + C_2 \right\} = e^x \left\{ \int \left[\frac{1}{2e^x} - \frac{1}{e^{2x}} + \frac{\ln(e^x + 1)}{e^{3x}} \right] dx + C_2 \right\} \\ &= -\frac{(e^{3x} + 1) \ln(e^x + 1)}{3e^{2x}} + \frac{x e^x}{3} + C_2 e^x + \frac{1}{3e^x} + \frac{C_1}{e^{2x}} - \frac{1}{6} \end{aligned}$$

其中 $\int \frac{\ln(e^x + 1)}{e^{3x}} dx \stackrel{e^x=t}{=} \int \frac{\ln(t+1)}{t^4} dt = -\frac{1}{3} \int \ln(t+1) d\frac{1}{t^3} = -\frac{1}{3} \left[\frac{\ln(t+1)}{t^3} - \int \frac{dt}{t^3(t+1)} \right]$, 且

$$\int \frac{dt}{t^3(t+1)} \stackrel{u=\frac{t+1}{t}}{=} \int \left(\frac{1}{u} - \frac{2}{u^2} + \frac{1}{u^3} \right) du = \ln|u| + \frac{4u-1}{2u^2} + C$$

即得 $\int \frac{\ln(e^x + 1)}{e^{3x}} dx = -\frac{\ln(e^x + 1)}{3} + \frac{-2 \ln(e^x + 1) + 2e^{2x} - e^x}{6e^{3x}} + \frac{x}{3} + C$.

Laplace 变换法

定义 8.2.2 (Laplace 变换). 假设函数 $f(x)$ 在区间 $[0, +\infty)$ 上分段连续, 如果参变量积分

$$F(s) = \int_0^{+\infty} e^{-st} f(t) dt$$

收敛, 则称函数 $F(s)$ 为 $f(x)$ 的 Laplace 变换, 并记为

$$F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\}$$

称函数 $f(t)$ 为 $F(s)$ 的 Laplace 逆变换, 并记为

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\{F(s)\}.$$

常见的 Laplace 变换 (以下 $s > 0, \alpha, \lambda, n > -1$)

$(1) \mathcal{L}\{1\} = \frac{1}{s}$	$(2) \mathcal{L}\{t^n\} = \frac{n!}{s^{n+1}}$
$(3) \mathcal{L}\{e^{\alpha t}\} = \frac{1}{s - \alpha}$	$(4) \mathcal{L}\{t^n e^{\alpha t}\} = \frac{n!}{(s - \alpha)^{n+1}}$
<hr/>	<hr/>
$(5) \mathcal{L}\{\sin \omega t\} = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$	$(6) \mathcal{L}\{\cos \omega t\} = \frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$(7) \mathcal{L}\{t \sin \omega t\} = \frac{2s\omega}{(s^2 + \omega^2)^2}$	$(8) \mathcal{L}\{t \cos \omega t\} = \frac{s^2 - \omega^2}{(s^2 + \omega^2)^2}$
<hr/>	<hr/>
$(9) \mathcal{L}\{e^{\lambda t} \sin \omega t\} = \frac{\omega}{(s - \lambda)^2 + \omega^2}$	$(10) \mathcal{L}\{e^{\lambda t} \cos \omega t\} = \frac{s - \lambda}{(s - \lambda)^2 + \omega^2}$
$(11) \mathcal{L}\{te^{\lambda t} \sin \omega t\} = \frac{2\omega(s - \lambda)}{[(s - \lambda)^2 + \omega^2]^2}$	$(12) \mathcal{L}\{te^{\lambda t} \cos \omega t\} = \frac{(s - \lambda)^2 - \omega^2}{[(s - \lambda)^2 + \omega^2]^2}$

例 8.2.5 (2010 数学 (一)). (用 Laplace 变换) 求解例题 8.2.3.

对方程两边进行 Laplace 变换, 得 $s^2 Y(s) - 3sY(s) + 2Y(s) = \frac{2}{(s-1)^2}$, 解得

$$Y(s) = 2 \left[\frac{1}{s-2} - \frac{1}{s-1} - \frac{1}{(s-1)^2} - \frac{1}{(s-1)^3} \right]$$

所以一个特解为 $y^* = 2 \left(e^{2x} - e^x - xe^x - \frac{x^2}{2} e^x \right)$, 又对应齐次线性微分方程 $y'' - 3y' + 2y = 0$ 的通解为 $Y = C_1 e^x + C_2 e^{2x}$, 故原方程的通解为

$$y = Y + y^* = C_1 e^x + C_2 e^{2x} - (x^2 + 2x + 2) e^x.$$

8.2.3 可降阶的高阶微分方程

$$y^{(n)} = f(x)$$

方程特点是右端为自变量 x 的函数, 且不含有函数 y 及其导数 $y', y'', \dots, y^{(n-1)}$, 将方程两边对 x 积分 n 次, 即得其通解

$$y = \int dx \cdots \int f(x)dx + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(n-i)!} x^{n-i}.$$

定理 8.2.8. 对于二阶常系数非齐次线性微分方程 $y'' + py' + qy = f(x)$, 若由特征方程 $r^2 + pr + q = 0$ 求出特征根为 λ_1, λ_2 , 且有

$$\lambda_1 + \lambda_2 = -p, \lambda_1 \cdot \lambda_2 = q$$

那么方程总可以化为

$$(y' - \lambda_1 y)' - \lambda_2(y' - \lambda_1 y) = f(x).$$

例 8.2.6. 试用降阶法求解例题 8.2.3.

将原方程改写为 $(y' - 2y)' - (y' - 2y) = 2xe^x$, 设 $u = y' - 2y$, 则上述方程化为 $u' - u = 2xe^x$, 解得

$$u = e^{\int dx} \left[\int 2xe^x e^{-\int dx} dx + C_1 \right] = e^x \left(\int 2x dx + C_1 \right) = x^2 e^x + C_1 e^x$$

再求一阶微分方程 $y' - 2y = x^2 e^x + C_1 e^x$ 得原方程的通解为

$$y = e^{2x} \left[\int (x^2 e^x + C_1 e^x) e^{-2x} dx + C_2 \right] = -(x^2 + 2x + 1)e^x - C_1 e^x + C_2 e^{2x}.$$

8.2.4 Euler 微分方程

齐次 Euler 微分方程

定义 8.2.3. 形如

$$x^n y^{(n)} + a_1 x^{n-1} y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1} x y' + a_n y = 0.$$

的微分方程称为齐次 Euler 微分方程.

定理 8.2.9. 若采用记号 D 表示对 x 求导的运算 $\frac{d}{dx}$, 那么有

$$x^k y^{(k)} = D(D-1)\cdots(D-k+1) = D^k.$$

例 8.2.7. 求微分方程 $x^2 y'' - 2xy' + 2y = 0$ 的通解.

令 $x = e^t$, $D = \frac{d}{dt}$, 那么原方程化为 $(D^2 - D)y = 0$, 易得 $y = C_1 x^2 + C_2 x$.

非齐次 Euler 微分方程

定义 8.2.4. 形如

$$x^n y^{(n)} + a_1 x^{n-1} y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1} x y' + a_n y = f(x).$$

的微分方程称为非齐次 Euler 微分方程.

例 8.2.8. 求微分方程 $xy' + 2y = 4 \ln x$ 的通解.

$$\text{原式 } \xrightarrow{x=e^t} \frac{dy}{dt} + 2y = 4t \Rightarrow y = e^{-2 \int dt} \left[\int 4t \cdot e^{2 \int dt} dt + C \right] = (2t - 1) + Ce^{-2t} = 2 \ln x - 1 + \frac{C}{x^2}.$$

例 8.2.9. 求微分方程 $4x^4 y''' - 4x^3 y'' + 4x^2 y' = 1$ 的通解.

将原方程改写为 $x^3 y''' - x^2 y'' + xy' = \frac{1}{4x}$, 并令 $x = e^t$, $D = \frac{d}{dx}$, 于是原式化为

$$D(D-1)(D-2)y - D(D-1)y + Dy = D(D-2)^2 y = \frac{1}{4e^t}$$

令 $(D-2)^2 y = z$, 那么 $z = \frac{1}{D} \frac{1}{4e^t} = \int \frac{dt}{4e^t} = -\frac{1}{4} e^{-t} + C_1$, 再令 $w = (D-2)y$, 于是, $(D-2)w = w' - 2w = -\frac{1}{4} e^{-t} + C_1$, 由一阶线性微分方程通解公式得

$$w = e^{2 \int dt} \left[\int \left(-\frac{1}{4} e^{-t} + C_1 \right) e^{-2 \int dt} dt + C_2 \right] = e^{2t} \left[\frac{1}{12} e^{-3t} - \frac{C_1}{2} e^{-2t} + C_2 \right] = \frac{1}{12} e^{-t} + \frac{C_1}{2} + C_2 e^{2t}$$

又 $y' - 2y = w$, 再由一阶线性微分方程通解公式得

$$y = C_2 x^2 \ln x + C_1 x^2 - \frac{1}{36x} + C_3.$$

例 8.2.10. 求微分方程 $(1+x)^2 y'' - (1+x)y' + y = \frac{1}{1+x}$ 满足初值条件 $y(0) = y'(0) = 0$ 的特解.

令 $1+x = t$, 再令 $t = e^u$, $D = \frac{d}{dt}$, 于是原式化为

$$D(D-1)y - Dy + y = e^{-u} \Rightarrow (D-1)^2 y = e^{-u}$$

令 $z = (D-1)y$, 于是上式化为 $z' - z = e^{-u}$, 由一阶线性微分方程通解公式得

$$z = e^{\int du} \left[\int e^{-u} \cdot e^{-\int du} du + C_1 \right] = e^u \left[-\frac{1}{2} e^{-2u} + C_1 \right] = -\frac{1}{2} e^{-u} + C_1 e^u$$

由已知得 $z(0) = -\frac{1}{2(1+x)} + C_1(1+x) \Big|_{x=0} = 0 \Rightarrow C_1 = \frac{1}{2}$, 又 $y' - y = -\frac{1}{2} e^{-u} + \frac{1}{2} e^u$, 再求一阶微分方程通解公式

$$y = e^{\int du} \left[\int \left(-\frac{1}{2} e^{-u} + \frac{1}{2} e^u \right) e^{-\int du} du + C_2 \right] = e^u \left[\frac{1}{4} e^{-2u} + \frac{1}{2} u + C_2 \right] = \frac{1}{4} e^{-u} + \frac{1}{2} u e^u + C_2$$

回代 $e^u = 1+x$, 并 $y(0) = 0$, 解得 $C_2 = -\frac{1}{4}$, 于是该方程的特解为

$$y = \frac{x+1}{2} \ln(x+1) + \frac{1}{4}(x+1) - \frac{x+1}{4}.$$

例 8.2.11. 求微分方程 $x^2 y'' - 2xy' + 2y = 2x^3$ 的通解.

法一: 令 $x = e^t$, $D = \frac{d}{dt}$, 则 $xy' = Dy$, $x^2 y'' = D(D-1)y$, 原方程化为

$$(D^2 - 3D + 2)y = 2e^{3t} = (D-1)(D-2)y = 2e^{3t}$$

令 $(D-2)y = z$, 那么有 $(D-1)z = \frac{dz}{dt} - z = 2e^{3t}$, 为一阶线性微分方程, 则有通解

$$z = e^{\int dt} \left[\int 2e^{3t} \cdot e^{-\int dt} + C_1 \right] = e^t \left[\int 2e^{2t} dt + C_1 \right] = e^{3t} + C_1 e^t$$

又 $z = (D - 2)y = \frac{dy}{dt} - 2y = e^{3t} + C_1e^t$, 故又有通解公式

$$y = e^{2\int dt} \left[\int (e^{3t} + C_1e^t) \cdot e^{-2\int dt} dt + C_2 \right] = e^{2t} [e^t - C_1e^{-t} + C_2] = e^{3t} - C_1e^t + C_2e^{2t}$$

回代 $e^t = x$, 解得该方程的通解为 $y = x^3 + C_2x^2 - C_1x$.

法二: 设 $y = x^k$, 代入对应齐次线性微分方程

$$x^2y'' - 2xy' + 2y = 0$$

得到 k 满足的方程, 即特征方程为 $k^2 - 3k + 2 = 0$, 解得 $k_1 = 1$, $k_2 = 2$, 于是齐次 Euler 微分方程的通解为 $Y = C_1x + C_2x^2$,

又因为 $f(x) = 2x^3$ 于是 $f(e^t) = 2e^{3t}$, 而 3 不是特征根, 故可设其特解为 $y^* = ae^{3t}$, 即原方程的特解为 $y^* = ax^3$, 代入原方程解得 $a = 1$, 所以原方程的通解为 $y = C_1x + C_2x^2 + x^3$.

例 8.2.12. 求微分方程 $x^2y'' - 2xy' + 2y + x - 2x^3 = 0$ 的通解.

法一: 令 $x = e^t$, $D = \frac{d}{dt}$, 那么原方程化为

$$(D - 1)(D - 2)y = 2e^{3t} - e^t$$

令 $(D - 2)y = z$, 那么有 $(D - 1)z = \frac{dz}{dt} - z = 2e^{3t} - e^t$, 为一阶线性微分方程, 则有通解

$$z = e^{\int dt} \left[\int (2e^{3t} - e^t)e^{-\int dt} dt + C_1 \right] = e^t [e^{2t} - t + C_1] = e^{3t} - te^t + C_1e^t$$

又 $z = (D - 2)y = \frac{dy}{dt} - 2y = e^{3t} - te^t + C_1e^t$, 故又有通解公式

$$\begin{aligned} y &= e^{2\int dt} \left[\int (e^{3t} - te^t + C_1e^t)e^{-2\int dt} dt + C_2 \right] = e^{2t} [e^t + (t+1)e^{-t} - C_1e^{-t} + C_2] \\ &= e^{3t} + (t+1)e^t - C_1e^t + C_2e^{2t} = x^3 + C_2x^2 + x \ln x + C'_1x \end{aligned}$$

其中 $C'_1 = 1 - C_1$.

法二: 令 $y = x^k$, 代入对应齐次线性微分方程, 即例题 8.2.7, 得通解为 $Y = C_1x^2 + C_2x$, 又 $f(x) = 2x^3 - x$ 即 $f(e^t) = 2e^{3t} - e^t$, 而 3 不是特征根, 但 1 是方程的一重特征根, 故可设其特解为 $y^* = 2Ae^{3t} + Bte^t$, 即设原方程的特解为 $y^* = 2Ax^3 + Bx \ln x$, 代入原方程解得, $A = \frac{1}{2}$, $B = 1$, 所以原方程的通解为 $y = x^3 + C_1x^2 + C_1x + x \ln x$.

8.2.5 二阶变系数齐次线性微分方程

二阶变系数齐次线性微分方程

引理 8.2.1 (Liouville 引理). 设函数 $y_1(x)$ 为二阶变系数齐次线性微分方程

$$y'' + P(x)y' + Q(x)y = 0$$

的一个非零解, 则该方程的与 $y_1(x)$ 线性无关的另一个特解为

$$y_2(x) = y_1(x) \cdot \int \frac{\exp \left(- \int P(x)dx \right)}{y_1^2(x)} dx.$$

例 8.2.13 (2016 数二). 已知函数 $y_1(x) = e^x$, $y_2(x) = u(x)e^x$ 是二阶微分方程

$$(2x - 1)y'' - (2x + 1)y' + 2y = 0$$

的两个解, 若 $u(-1) = e$, $u(0) = -1$, 求 $u(x)$, 并写出该微分方程的通解.

由引理 8.2.1 知, $u(x) = \int \frac{\exp\left(\int \frac{2x+1}{2x-1} dx\right)}{e^{2x}} dx = C_1 \int (2x-1)e^{-x} dx = -C_1 e^{-x}(1+2x) + C_2$, 由 $u(-1) = e$, $u(0) = -1$,
解得 $C_1 = 1$, $C_2 = 0$, 则 $u(x) = -e^{-x}(1+2x)$, 那么 y_1 与 y_2 线性无关, 则微分方程的通解为

$$y = k_1 e^x - k_2 e^{-x}(1+2x) \quad k_{1,2} \in \mathbf{R}.$$

定理 8.2.10. 设有二阶变系数齐次线性微分方程 $p_1(x)y'' + p_2(x)y' + p_3(x)y = 0$ 那么

(1) 当关于 r 的一元二次方程 $r^2 p_1(x) + r p_2(x) + p_3(x) = 0$ 的两个根

$$r_{1,2} = \frac{-p_2(x) \pm \sqrt{p_2^2(x) - 4p_1(x)p_3(x)}}{2p_1(x)}$$

中至少有一个 r 是非零常数时, $y^* = e^{rx}$ 是该方程的一个特解; 特别地, 当

$$p_1(x) \pm p_2(x) + p_3(x) = 0$$

时, $y^* = e^{\pm x}$ 是原方程的一个特解;

(2) 当 $\frac{p_2(x) + xp_3(x)}{p_3(x)} = a$ (其中 a 为常数) 时, $y^* = x - a$ 是该方程的一个特解; 特别地, 当

$$p_2(x) + xp_3(x) = 0$$

时, $y^* = x$ 是该方程的一个特解;

(3) 当 $\alpha(\alpha-1)p_1(x) + \alpha x p_2(x) + x^2 p_3(x) = 0$ (α 为非零常数) 时, $y^* = x^\alpha$ 是该方程的一个特解;

(4) 当 $\frac{p_3(x) - p_1(x)}{p_2(x)} = -\cot x$, 时 $y^* = \sin x$ 是该方程的一个特解;

(5) 当 $\frac{p_3(x) - p_1(x)}{p_2(x)} = \tan x$, 时 $y^* = \cos x$ 是该方程的一个特解.

例 8.2.14. 求微分方程 $(2x-1)y'' - (2x+1)y' + 2y = 0$ 满足初值条件 $y(0) = 0$, $y'(0) = 1$ 的特解.

记 $p_1(x) = 2x-1$, $p_2(x) = -(2x+1)$, $p_3(x) = 2$, 则有 $p_1(x) + p_2(x) + p_3(x) = 0$, 且

$$\frac{p_2(x) + xp_3(x)}{p_3(x)} = -\frac{1}{2}$$

于是由定理 8.2.10 (1)(2) 可知 $y_1(x) = e^x$, $y_2(x) = x + \frac{1}{2}$ 为原方程的两个特解, 且它们线性无关, 于是方程的通解为
 $y = C_1 e^x + C_2 \left(x + \frac{1}{2}\right)$, 又有初值条件 $y(0) = 0$, $y'(0) = 1$ 代入解得 $C_1 = -1$, $C_2 = 2$, 于是该方程的特解为 $y = 2x+1-e^x$.

例 8.2.15. 求微分方程 $xy'' + (x-2)y' - (2x+4)y = 0$ 的通解.

记 $p_1(x) = x$, $p_2(x) = x-2$, $p_3(x) = -(2x+4)$, 则由 $r^2 p_1(x) + r p_2(x) + p_3(x) = 0$ 解得

$$\begin{aligned} r_{1,2} &= \frac{-p_2(x) \pm \sqrt{p_2^2(x) - 4p_1(x)p_3(x)}}{2p_1(x)} = \frac{2-x \pm \sqrt{(x-2)^2 + 4x(2x+4)}}{2x} \\ &= \frac{2-x \pm |3x+2|}{2x} = 1 + \frac{2}{x} \text{ 或 } -2 \end{aligned}$$

于是由定理 8.2.10 (1) 知 $y_1(x) = e^{-2x}$ 是该方程的一个特解, 再由引理 8.2.1 得与 $y_1(x)$ 线性无关的另一个特解为

$$\begin{aligned} y_2(x) &= y_1(x) \cdot \int \frac{\exp\left(-\int P(x)dx\right)}{y_1^2(x)} dx = e^{-2x} \int \frac{\exp\left(-\int \frac{x-2}{x} dx\right)}{e^{-4x}} dx \\ &= e^{-2x} \int x^2 e^{3x} dx = e^x \left(\frac{1}{3}x^2 - \frac{2}{9}x + \frac{2}{27}\right) \end{aligned}$$

故由通解结构知原方程的通解为 $y = C_1 e^{-2x} + C_2 e^x \left(\frac{1}{3}x^2 - \frac{2}{9}x + \frac{2}{27}\right)$.

例 8.2.16. 求微分方程的通解 $(x^2 \ln x)y'' - xy' + y = 0$ 的通解.

记 $p_1(x) = x^2 \ln x$, $p_2(x) = -x$, $p_3(x) = 1$, 则 $p_2(x) + xp_3(x) = 0$, 于是由定理 8.2.10 (2) 知 $y_1(x) = x$ 是该方程的一个特解, 再由引理 8.2.1 得与 $y_1(x)$ 线性无关的另一个特解为

$$\begin{aligned} y_2(x) &= y_1(x) \cdot \int \frac{\exp\left(-\int P(x)dx\right)}{y_1^2(x)} dx = x \int \frac{\exp\left(\int \frac{x}{x^2 \ln x} dx\right)}{x^2} dx \\ &= x \int \frac{\ln x}{x^2} dx = -x \int \ln x d\left(\frac{1}{x}\right) = -(\ln x + 1) \end{aligned}$$

故由通解结构知原方程的通解为 $y = C_1 x + C_2 (\ln x + 1)$.

例 8.2.17. 求微分方程 $y'' \cos x - 2y' \sin x + 3y \cos x = 0$ 的通解.

记 $p_1(x) = \cos x$, $p_2(x) = -2 \sin x$, $p_3(x) = 3 \cos x$, 则 $\frac{p_3(x) - p_1(x)}{p_2(x)} = -\cot x$, 于是由定理 8.2.10 (4) 知, $y_1(x) = \sin x$ 是该方程的一个特解, 再由引理 8.2.1 得与 $y_1(x)$ 线性无关的另一个特解为

$$\begin{aligned} y_2(x) &= y_1(x) \cdot \int \frac{\exp\left(-\int P(x)dx\right)}{y_1^2(x)} dx = \sin x \int \frac{\exp\left(\int \frac{2 \sin x}{\cos x} dx\right)}{\sin^2 x} dx \\ &= \sin x \int \frac{dx}{\sin^2 x \cos^2 x} = \sin x (\tan x - \cot x) \end{aligned}$$

故由通解结构知原方程的通解为 $y = C_1 \sin x + C_2 \sin x (\tan x - \cot x)$.

二阶变系数非齐次线性微分方程

例 8.2.18. 试用定理 8.2.1, 求解例题 8.2.11 的通解.

记 $p_1(x) = x^2$, $p_2(x) = -2x$, $p_3(x) = 2$, 则 $p_2(x) + xp_3(x) = 0$ 且

$$\alpha(\alpha - 1)p_1(x) + \alpha x p_2(x) + x^2 p_3(x) = (\alpha^2 - 3\alpha + 2)x^2$$

令 $(\alpha^2 - 3\alpha + 2) = 0$ 解得 $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 2$, 于是 $y_1(x) = x$, $y_2(x) = x^2$ 是对应齐次方程 $x^2 y'' - 2xy' + 2y = 0$ 的两个线性无关的特解, 从而由通解结构知齐次方程的通解为

$$Y = C_1 x + C_2 x^2$$

下面利用常系数变易法求原方程的解, 将原方程改写为

$$y'' - \frac{2}{x} y' + \frac{2}{x^2} y = 2x$$

令 $y = C_1(x)x + C_2(x)x^2$ 为原方程的解, 代入原方程, 且由

$$\begin{cases} C_2''(x) \\ C_1''(x) + 2C_2'(x) \end{cases} = 0$$

解得 $\begin{cases} C_1(x) = C_1 - x^2 \\ C_2(x) = C_2 + 2x \end{cases}$, 故所求通解为

$$y = (C_1 - x^2)x + (C_2 + 2x)x^2 = C_1 x + C_2 x^2 + x^3.$$

例 8.2.19. 已知 $y_1 = e^x$ 是微分方程 $y'' + \frac{x}{1-x}y' - \frac{1}{1-x}y = x - 1$ 对应的齐次线性微分方程的一个特解, 求所给二阶变系数非齐次线性微分方程的通解.

记 $p_1(x) = 1$, $p_2(x) = \frac{x}{1-x}$, $p_3(x) = -\frac{1}{1-x}$, 则 $p_2(x) + xp_3(x) = 0$, 于是由定理 8.2.1 (2) 知 $y_2(x) = x$ 是该方程的一个特解, 则该方程对应的齐次线性微分方程的通解为

$$Y = C_1 e^x + C_2 x$$

利用常系数变易法求原方程的同解为

$$y = -1 - x - x^2 + C_1 e^x - C_2 x.$$

8.3 微分方程综合性问题

8.3.1 微分方程与函数性质

例 8.3.1 (2022 数一). 设函数 $y(x)$ 是微分方程 $y' + \frac{1}{2\sqrt{x}}y = 2 + \sqrt{x}$ 的满足条件 $y(1) = 3$ 的解, 求曲线 $y = y(x)$ 的渐近线.

根据求解公式,

$$y = e^{-\int \frac{dx}{2\sqrt{x}}} \left[\int (2 + \sqrt{x}) \cdot e^{\int \frac{dx}{2\sqrt{x}}} dx + C \right] = e^{-\sqrt{x}} \left[2 \int e^{\sqrt{x}} dx + \int \sqrt{x} e^{\sqrt{x}} dx + C \right] = 2x + Ce^{-\sqrt{x}}$$

由 $y(1) = 3$ 得 $C = e$, 故 $y = 2x + e^{1-\sqrt{x}}, x \in [0, +\infty)$, 由于函数 $y(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上没用无定义的点, 故曲线 $y = 2x + e^{1-\sqrt{x}}$ 没用铅直渐近线, 又因为 $\lim_{x \rightarrow +\infty} y(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} (2x + e^{1-\sqrt{x}}) = +\infty$, 所以曲线 $y(x)$ 没用水平渐近线, 下计算斜渐近线

$$\begin{aligned} k &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{y}{x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2x + e^{1-\sqrt{x}}}{x} = 2 \\ b &= \lim_{x \rightarrow +\infty} (y(x) - kx) = \lim_{x \rightarrow +\infty} e^{1-\sqrt{x}} = 0 \end{aligned}$$

因此 $y = 2x$ 为曲线 $y = 2x + e^{1-\sqrt{x}}$ 的斜渐近线, 也是唯一的渐近线.

例 8.3.2. 设函数 $f(x)$ 在 $\left(\frac{1}{2}, +\infty\right)$, 且 $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f[(x+h)^2] - f(x^2+h)}{h} = 1, f(1) = 1$, 求 $f(x)$ 的表达式.

$$\begin{aligned} \text{因为 } \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f[(x+h)^2] - f(x^2+h)}{h} &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f[(x+h)^2] - f(x^2)}{h} - \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x^2) - f(x^2+h)}{h} = [f(x^2)]' - f'(x^2) = 1, \text{ 则} \\ 2xf'(x^2) - f'(x^2) &= 1 \Rightarrow f'(x) = \frac{1}{2\sqrt{x}-1} \Rightarrow f(x) = \int \frac{dx}{2\sqrt{x}-1} = \sqrt{x} + \frac{1}{2} \ln(2\sqrt{x}-1) + C \end{aligned}$$

又 $f(1) = 1$, 解得 $C = 0$, 因此 $f(x) = \sqrt{x} + \frac{1}{2} \ln(2\sqrt{x}-1)$.

例 8.3.3. 设函数 $f(x)$ 在区间 $[1, +\infty)$ 上二阶连续可导, $f(1) = 0, f'(1) = 1, z = (x^2 + y^2)f(x^2 + y^2)$ 满足 $\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0$, 求 $f(x)$ 在 $[1, +\infty)$ 上的最大值.

令 $u = x^2 + y^2$, 则 $z = uf(u)$, 那么

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial x} &= \frac{dz}{du} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = 2xf(u) + 2uxf'(u) \\ \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} &= 2f(u) + 2(5x^2 + y^2)f'(u) + 4x^2uf''(u) \end{aligned}$$

利用函数 z 中 x 与 y 的对称性, 易得

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 2f(u) + 2(x^2 + 5y^2)f'(u) + 4y^2uf''(u)$$

又 $\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0$, 所以

$$u^2f''(u) + 3uf'(u) + f(u) = 0 \quad (1)$$

(1) 式为二阶的 Euler 微分方程, 令 $u = e^t$, 则 (1) 式化为 $\frac{d^2 f}{dt^2} + 2\frac{df}{dt} + f = 0$, 其特征方程为 $\lambda^2 + 2\lambda + 1 = 0 \Rightarrow \lambda_{1,2} = -1$, 于是 (1) 式的通解为

$$f = e^{-t}(C_1 + C_2 t) \Rightarrow \frac{1}{u}(C_1 + C_2 \ln u)$$

又 $f(1) = 0, f'(1) = 1$, 解得 $C_1 = 0, C_2 = 1$, 故 $f(x) = \frac{\ln x}{x}$, 令 $f'(x) = \frac{1 - \ln x}{x^2} = 0$, 解得 $x = e$, 且在 $[1, e]$ 上 $f'(x) < 0 \Rightarrow f(x) \searrow$; 在 $[e, +\infty)$ 上 $f'(x) > 0 \Rightarrow f(x) \nearrow$, 故 $f_{max} = \left. \frac{\ln x}{x} \right|_{x=e} = \frac{1}{e}$.

8.3.2 微分方程与积分

微分方程与定积分

例 8.3.4 (2023 四川大学). 设函数 $f(x)$ 满足 $\int_0^x f^2(t)dt = e^x f(x) + 1$, 求 $f(x)$.

令 $x=0$, 得 $f(0)=-1$, 对方程两边求导, 得 Bernoulli 方程:

$$f'(x) + f(x) = e^{-x} f^2(x)$$

令 $z(x) = \frac{1}{f(x)}$, 于是上式化为 $z'(x) - z(x) = -e^{-x}$, 由一阶线性微分方程通解公式得

$$z(x) = e^{\int dx} \left[\int -e^{-x} \cdot e^{-\int dx} dx + C \right] = \frac{1}{2} e^{-x} + C e^x$$

并且 $z(0) = -1$, 得 $C = -\frac{3}{2}$, 于是 $f(x) = \frac{2e^x}{1-3e^{2x}}$.

例 8.3.5. 求出所有在 $[0, +\infty)$ 上的正值连续函数 $g(x)$, 使得 $\frac{1}{2} \int_0^x g^2(t)dt = \frac{1}{x} \left(\int_0^x g(t)dt \right)^2$.

对方程两边求导, 得

$$\frac{1}{2} g^2(x) = \frac{2 \int_0^x g(t)dt \cdot g(x) \cdot x - \left(\int_0^x g(t)dt \right)^2}{x^2}$$

即

$$\left(\int_0^x g(t)dt \right)^2 - 2xg(x) \int_0^x g(t)dt + \frac{x^2}{2} g^2(x) = 0$$

注意到当 $x \in [0, +\infty)$ 时, 有 $g(x) > 0$, 于是 $\int_0^x g(t)dt > 0$, $\forall x > 0$, 故

$$\int_0^x g(t)dt = \frac{2xg(x) \pm \sqrt{4x^2 g^2(x) - 2x^2 g^2(x)}}{2} = xg(x) \pm \frac{1}{\sqrt{2}} xg(x)$$

两边再次求导, 得

$$g(x) = \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \right) (g(x) + xg'(x)) \Rightarrow \begin{cases} g(x) &+ (1 + \sqrt{2})xg'(x) = 0 \\ -g(x) &+ (\sqrt{2} - 1)xg'(x) = 0 \end{cases}$$

当 $g'(x) + \frac{1}{(1 + \sqrt{2})x} g(x) = 0$ 时, 化为变量分离方程 $\frac{dg(x)}{g(x)} = -\frac{dx}{(1 + \sqrt{2})x}$, 两边积分得

$$\ln |g(x)| = -\frac{1}{1 + \sqrt{2}} \ln |x| + \ln C_1 \Rightarrow g(x) = e^{-\frac{1}{1 + \sqrt{2}} \ln x + C_1} = e^{C_1} x^{1-\sqrt{2}}$$

同理可得 $g(x) = e^{C_1} x^{1+\sqrt{2}}$, 由于 $g(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上为连续正值函数, 而 $x^{1-\sqrt{2}}$ 在 $x=0$ 处不连续, 所以 $g(x) = e^{C_1} x^{1+\sqrt{2}}$, $x > 0$.

例 8.3.6. 设 $f(x)$ 具有连续导数, 且 $\forall a \in \mathbb{R}$, $f(x+a) = \int_x^{x+a} \frac{t(t^2+1)}{f(t)} dt + f(x)$, $f(1) = \sqrt{2}$, 求 $f(x)$.

法一: 视 a 为未知数, 令 $x=0$, 有 $f(a) = \int_0^a \frac{t(t^2+1)}{f(t)} dt + f(0)$, 两边求导有

$$f'(a) = \frac{a(a^2+1)}{f(a)} \Rightarrow f'(a) \cdot f(a) = a(a^2+1) \Rightarrow \frac{1}{2} [f^2(a)]' = a^3 + a$$

$$\Rightarrow \int f^2(a)da = \int (2a^3 + 2a)da \Rightarrow f^2(a) = \frac{1}{2} a^4 + a^2 + C$$

由 $f(1) = \sqrt{2}$ 解得 $C = \frac{1}{2}$, 于是 $f^2(x) = \frac{1}{2} x^4 + x^2 + \frac{1}{2} = \frac{1}{2} (x^2 + 1)^2 \Rightarrow f(x) = \frac{x^2 + 1}{\sqrt{2}}$ (由 $f(1) > 0$ 可舍负).

法二: 利用导数的定义,

$$f'(x) = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{f(x+a) - f(x)}{a} = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\int_x^{x+a} \frac{t(t^2+1)}{f(t)} dt + f(x) - f(x)}{a} = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\int_x^{x+a} \frac{t(t^2+1)}{f(t)} dt}{a} = \frac{x(x^2+1)}{f(x)}$$

得 $f'(x) \cdot f(x) = x(x^2+1)$, 下同法一.

例 8.3.7. 设 $f(x)$ 在 $(0, +\infty)$ 内一阶可导, $g(x)$ 为 $f(x)$ 的反函数, 且 $g(x)$ 连续, 若

$$\int_1^{f(x)} g(t) dt = x^2 e^x - 4e^2 - \int_1^{x-1} f(t+1) dt, \quad f(2) = 1$$

求 $f(x)$ 的表达式.

方程两边对 x 求导得

$$g[f(x)]f'(x) = 2xe^x + x^2 e^x - f(x)$$

即

$$xf'(x) = 2xe^x + x^2 e^x - f(x) \Rightarrow f'(x) + \frac{1}{x}f(x) = (2+x)e^x$$

由一阶线性微分方程通解公式得

$$f(x) = e^{-\int \frac{1}{x} dx} \left[\int (2x+1)e^x \cdot e^{\int \frac{1}{x} dx} + C \right] = xe^x + \frac{C}{x}$$

由 $f(2) = 1$, 故 $C = 2 - 4e^2$, 故 $f(x) = xe^x + \frac{2 - 4e^2}{x}$ ($x > 0$).

例 8.3.8. 设 $f(x)$ 可微, 且满足 $x = \int_0^x f(t) dt + \int_0^x tf(t-x) dt$, 求

(1) $f(x)$ 的表达式;

$$(2) I(n) = \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} |f(t)|^n dt \quad (n = 2, 3, \dots).$$

(1) 令 $t-x=u$, 则

$$x = \int_0^x f(t) dt + \int_0^x tf(t-x) dt = \int_0^x f(t) dt + \int_{-x}^0 uf(u) du + x \int_{-x}^0 f(u) du$$

上式两边分别对 x 求导, 得

$$1 = f(x) - xf(-x) + \int_{-x}^0 f(u) du + xf(-x) \quad (1)$$

对式 (1) 求导得

$$f'(x) + f(-x) = 0 \quad (2)$$

对式 (2) 再次求导得 $f''(x) - f'(-x) = 0$, 并用 $-x$ 替换式 (2) 中的 x , 得 $f'(-x) + f(x) = 0$ 于是有二阶常系数齐次线性方程 $f''(x) + f(x) = 0$, 且 $f(0) = 1$, $f'(0) = -f(0) = -1$, 微分方程的特征方程为 $r^2 + 1 = 0$, 故它的通解为

$$f(x) = C_1 \cos x + C_2 \sin x$$

代入初值条件, 得 $C_1 = 1$, $C_2 = -1$, 故 $f(x) = \cos x - \sin x = \sqrt{2} \cos \left(x + \frac{\pi}{4} \right)$.

(2) 令 $x = t + \frac{\pi}{4}$, 得

$$I(n) = 2^{\frac{n}{2}} \int_0^{\pi} |\cos x|^n dx = 2^{\frac{n}{2}+1} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^n x dx = \begin{cases} 2^{\frac{n}{2}+1} \frac{(n-1)!!}{n!!}, & n = 3, 5, 7, \dots \\ 2^{\frac{n}{2}+1} \frac{(n-1)!!}{n!!} \cdot \frac{\pi}{2}, & n = 2, 4, 6, \dots \end{cases}$$

微分方程与重积分

例 8.3.9. 设函数 $f(t)$ 在 $[0, +\infty)$ 上连续, 求 $\lim_{t \rightarrow 0} f^{-t^2}(t)$, 其中 $f(t)$ 满足方程

$$f(t) = e^{4\pi t^2} + \iint_{x^2+y^2 \leq 4t^2} f\left(\frac{1}{2}\sqrt{x^2+y^2}\right) dx dy.$$

因为 $\iint_{x^2+y^2 \leq 4t^2} f\left(\frac{1}{2}\sqrt{x^2+y^2}\right) dx dy = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{2t} \rho f\left(\frac{1}{2}\rho\right) d\rho = 8\pi \int_0^t u f(u) du$, 所以 $f(t) = e^{4\pi t^2} + 8\pi \int_0^t u f(u) du$,

且 $f(0) = 1$, 方程两边对 t 求导, 得 $f'(t) = 8\pi t e^{4\pi t^2} + 8\pi t f(t)$

$$f(t) = e^{8\pi \int t dt} \left[\int 8\pi t e^{4\pi t^2} \cdot e^{-8\pi \int t dt} + C \right] = e^{4\pi t^2} \left[8\pi \int t dt + C \right] = 4\pi t^2 e^{4\pi t^2} + C e^{4\pi t^2}$$

$$\xrightarrow{f(0)=1} 4\pi t^2 e^{4\pi t^2} + e^{4\pi t^2}$$

那么

$$\lim_{t \rightarrow 0} f^{-t^2}(t) = \lim_{t \rightarrow 0} \left(4\pi t^2 e^{4\pi t^2} + e^{4\pi t^2} \right)^{-t^2} = \exp \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t^2} \ln \left(4\pi t^2 e^{4\pi t^2} + e^{4\pi t^2} \right)$$

$$= \exp \lim_{t \rightarrow 0} \frac{4\pi t^2 e^{4\pi t^2} + e^{4\pi t^2} - 1}{t^2} = e^{4\pi+4\pi} = e^{8\pi}.$$

例 8.3.10. 设函数 $u = f\left(\sqrt{x^2+y^2}\right)$, 满足 $\lim_{x \rightarrow 0^+} f'(x) = 0$, 且

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \iint_{s^2+t^2 \leq x^2+y^2} \frac{ds dt}{1+s^2+t^2}$$

(1) 试求函数 $f'(x)$ 的表达式; (2) 若 $f(0) = 0$, 求 $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f(x)}{x^4}$.

(1) 设 $r = \sqrt{x^2+y^2}$, 则

$$\frac{\partial u}{\partial x} = f'(r) \frac{x}{r}, \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f''(r) \frac{x^2}{r^2} + f'(r) \frac{r - \frac{x^2}{r}}{r^2} = f''(r) \frac{x^2}{r^2} + f'(r) \frac{r^2 - x^2}{r^3}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = f'(r) \frac{y}{r}, \quad \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f''(r) \frac{y^2}{r^2} + f'(r) \frac{r - \frac{y^2}{r}}{r^2} = f''(r) \frac{y^2}{r^2} + f'(r) \frac{r^2 - y^2}{r^3}$$

$$\iint_{s^2+t^2 \leq r^2} \frac{ds dt}{1+s^2+t^2} = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^r \frac{\rho d\rho}{1+\rho^2} = \pi \ln(1+r^2)$$

因为 $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \iint_{s^2+t^2 \leq x^2+y^2} \frac{ds dt}{1+s^2+t^2}$, 所以 $f''(r) + \frac{1}{r} f'(r) = \pi \ln(1+r^2)$,

$$f'(r) = e^{-\int \frac{dr}{r}} \left[\int \pi \ln(1+r^2) \cdot e^{\int \frac{dr}{r}} dr + C \right] = \frac{\pi(1+r^2)}{2r} [\ln(1+r^2) - 1] + \frac{C}{r}$$

即

$$f'(x) = \frac{\pi(1+x^2)}{2x} [\ln(1+x^2) - 1] + \frac{C}{x}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f'(x) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \left[\frac{\pi(1+x^2)}{2x} \ln(1+x^2) + \frac{2C - \pi - \pi x^2}{2x} \right] = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{2C - \pi - \pi x^2}{2x} = 0$$

$$\text{即 } C = \frac{\pi}{2}, \text{ 所以 } f'(x) = \frac{\pi(1+x^2)}{2x} [\ln(1+x^2) - 1] + \frac{\pi}{2x}.$$

(2) 运用 L'Hospital 法则得到 $f'(x)$, 再将 $f'(x) = \frac{\pi(1+x^2)}{2x} [\ln(1+x^2) - 1] + \frac{\pi}{2x}$ 代入得,

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f(x)}{x^4} &\stackrel{L'}{=} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{f'(x)}{4x^3} = \frac{\pi}{8} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{x^3} \left[\frac{1+x^2}{x} \ln(1+x^2) - x \right] \\ &= \frac{\pi}{8} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{x^3} \left[\frac{1+x^2}{x} \left(x^2 - \frac{x^4}{2} + o(x^4) \right) - x \right] \\ &= \frac{\pi}{8} \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{x^3} \left(\frac{x^3}{2} + o(x^3) \right) = \frac{\pi}{16}. \end{aligned}$$

例 8.3.11. 设 $z = (x^2 + y^2)f(x^2 + y^2)$, 其中 f 具有连续二阶偏导数, $f(1) = 0$, $f'(1) = 1$, 且 z 满足方程 $\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0$, 求

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \iint_D z \, dx \, dy, \quad D : 0 < \varepsilon \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq 1.$$

令 $x^2 + y^2 = t$, 则 $z = tf(t)$, 于是

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial t}{\partial x} f(t) + t \cdot f'(t) \frac{\partial t}{\partial x} = 2xf(t) + 2txf'(t) = 2x[f(t) + 2tf'(t)]$$

于是,

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} &= 2[f(t) + 2tf'(t)] + 2x[f'(t) \cdot 2x + 2xf'(t) + tf''(t) \cdot 2x] \\ &= 2[f(t) + 2tf'(t)] + 4x^2[2f'(t) + tf''(t)] \end{aligned}$$

同理可得 $\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 2[f(t) + 2tf'(t)] + 4y^2[2f'(t) + tf''(t)]$, 解此 Euler 方程, 由 $f(0) = 1$, $f'(0) = 1$, 特解 $f(t) = \frac{1}{t} \ln t$, 所以 $z = tf(t) = \ln t = \ln(x^2 + y^2)$, 从而可得

$$\iint_D z \, dx \, dy = \iint_D \ln(x^2 + y^2) \, dx \, dy = \int_0^{2\pi} d\theta \int_\varepsilon^1 r \ln r^2 \, dr = -\pi(1 + 2\varepsilon^2 \ln \varepsilon - \varepsilon^2) = -\pi.$$

例 8.3.12. 设函数 $f(x)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 上连续, 且满足

$$f(t) = 2 \iint_{x^2+y^2 \leq t^2} (x^2 + y^2) f(\sqrt{x^2 + y^2}) \, dx \, dy + t^4$$

求 $f(x)$.

采用极坐标将二重积分化为定积分, 得

$$\iint_{x^2+y^2 \leq t^2} (x^2 + y^2) f(\sqrt{x^2 + y^2}) \, dx \, dy = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^t \rho^3 f(\rho) \, d\rho = 2\pi \int_0^t \rho^3 f(\rho) \, d\rho$$

代入原式得

$$f(t) = 4\pi \int_0^t \rho^3 f(\rho) \, d\rho + t^4$$

两边求导得

$$f'(t) = 4\pi t^3 f(t) + 4t^3 f(0) = 0$$

此为一阶线性微分方程, 其通解为

$$f(t) = e^{4\pi \int t^3 dt} \left[\int 4t^3 \cdot e^{-4\pi \int t^3 dt} dt + C \right] = e^{\pi t^4} \left[\int 4t^3 \cdot e^{-\pi t^4} dt + C \right] = Ce^{\pi t^4} - \frac{1}{\pi}.$$

又有 $f(0) = 0$ 得 $C = \frac{1}{\pi}$, 于是 $f(x) = \frac{1}{\pi} (e^{\pi x^4} - 1)$.

微分方程与曲面积分

例 8.3.13. 设曲线积分

$$\int_L [f'(x) + 2f(x) + e^x]y \, dx + [f'(x) - x] \, dy$$

与路径无关, 且 $f(0) = 0$, $f'(0) = \frac{1}{2}$, 其中 $f(x)$ 一阶连续可导, 求 $f(x)$ 的表达式.

令 $P = [f'(x) + 2f(x) + e^x]y$, $Q = [f'(x) - x]$, 因为积分与路径无关, 所以

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial y} \Rightarrow f''(x) - f'(x) - 2f(x) = e^x + 1$$

该方程为二阶常系数非齐次线性微分方程, 令 $D = \frac{d}{dx}$, $if(x) = f(x)$, 则有

$$(D^2 - D - 2)f(x) = e^x + 1 \Rightarrow (D - 2)\underbrace{(D + 1)f(x)}_z = e^x + 1$$

那么 $z' - 2z = e^x + 1$, 该方程为一阶线性微分方程, 有通解公式

$$z = e^{\int dx} \left[\int (e^x + 1)e^{-2 \int dx} dx + C_1 \right] = C_1 e^{2x} - e^x - \frac{1}{2}$$

因此 $f' + f = C_1 e^{2x} - e^x - \frac{1}{2}$, 继续由通解公式

$$f = e^{-\int dx} \left[\int \left(C_1 e^{2x} - e^x - \frac{1}{2} \right) e^{\int dx} dx + C_2 \right] = \frac{C_1}{3} e^{2x} - \frac{1}{2} e^x - \frac{1}{2} + C_2 e^{-x}$$

代入 $f(0) = 0, f'(0) = \frac{1}{2}$, 得方程组 $\begin{cases} C_1 + 3C_2 = 3 \\ 2C_1 - 3C_2 - 2 = 3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} C_1 = 2 \\ C_2 = \frac{1}{3} \end{cases}$ 因此 $f(x) = \frac{2}{3} e^{2x} - \frac{1}{2} e^x + \frac{1}{3} e^{-x} - \frac{1}{2}$.

例 8.3.14. 设对右半空间 $x > 0$ 内任意的光滑有向封闭曲面 Σ 都有

$$\iint_{\Sigma} xf(x) dy dz - xyf(x) dz dx - ze^{2x} dx dy = 0$$

其中函数 $f(x)$ 在 $(0, +\infty)$ 内具有连续一阶导数, 且 $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = 1$, 求 $f(x)$ 的表达式.

设 $P = xf(x), Q = -xyf(x), R = -ze^{2x}$, 那么

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} = xf'(x) + f(x) - xf(x) - e^{2x}$$

由 Gauss 定理知, $I = \pm \iiint_{\Omega} (xf'(x) + f(x) - xf(x) - e^{2x}) dx dy dz = 0$, 由 Ω 的任意性知,

$$xf'(x) + f(x) - xf(x) - e^{2x} = 0 \Rightarrow f'(x) + \left(\frac{1}{x} - 1 \right) f(x) = \frac{1}{x} e^{2x}$$

该方程为一阶线性微分方程, 有通解为

$$f(x) = e^{\int (1 - \frac{1}{x}) dx} \left[\int \frac{1}{x} e^{2x} \cdot e^{\int (\frac{1}{x} - 1) dx} dx + C \right] = \frac{e^x}{x} \left[\int e^x dx + C \right] = \frac{e^x}{x} (e^x + C)$$

又因为

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{e^x}{x} (e^x + C) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{e^x + C}{x} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1 + x + o(x^2) + C}{x} = 1$$

即 $C = -1$, 因此 $f(x) = \frac{e^x}{x} (e^x - 1)$.

例 8.3.15. 设 S 是曲面 $az = x^2 + y^2$, $(0 \leq z \leq a)$ 的第一卦限部分上侧,

$$A = \iint_S x^2 z dy dz + y^2 z dz dx + xz^2 dx dy$$

求满足 $f(0) = A, f'(0) = -A$ 的二阶可导函数 $f(x)$, 使得 $y(f(x) + 3e^{3x}) dx + f'(x) dy$ 是某二元函数的全微分.

补充三个面, 分别为

$$\begin{aligned}\Sigma_1 : z = a, x^2 + y^2 \leq a^2, & z \geq 0, \text{ 方向取下侧} \\ \Sigma_2 : x = 0, & \text{ 方向取前侧}, \Sigma_3 : y = 0, \text{ 方向取右侧}\end{aligned}$$

于是, 由 Gauss 定理

$$\begin{aligned}I &= \iint_{\Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + S} (x^2 z dy dz + y^2 z dz dx + xz^2 dx dy) = - \iiint_{\Omega} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} \right) dx dy dz \\ &= -2 \iiint_{\Omega} (2x + y) z dx dy dz = -2 \iint_{x^2 + y^2 \leq a^2} (2x + y) dx dy \int_{\frac{x^2 + y^2}{a}}^a z dz \\ &= -2 \iint_D (2x + y) \left[\frac{a^2}{2} - \frac{(x^2 + y^2)^2}{2a^2} \right] dx dy = - \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_0^a (2r \cos \theta + r \sin \theta) \left(a^2 - \frac{r^4}{a^2} \right) r dr \\ &= - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{8a^5}{21} \cos \theta + \frac{4a^5}{21} \sin \theta \right) d\theta = -\frac{4}{7} a^5\end{aligned}$$

则

$$A = I - \iint_{\Sigma_1} - \iint_{\Sigma_2} - \iint_{\Sigma_3} = I - \left(-a^2 \iint_{x^2 + y^2 \leq a^2} x dx dy \right) = -\frac{4}{7} a^5 + \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_0^a r^2 \cos \theta dr = -\frac{5}{21} a^5$$

由于 $y(f(x) + 3e^{3x})dx + f'(x)dy$ 是某二元函数的全微分, 所以

$$\frac{\partial [yf(x) + 3e^{3x}]}{\partial y} = \frac{df'(x)}{dx} \Rightarrow f''(x) - f(x) = 3e^{2x}$$

记 $D = \frac{d}{dx}$, 则上式可改写为 $(D+1)(D-1)f(x) = 3e^{2x}$, 令 $z(x) = (D-1)f(x)$, 于是

$$z(x) = e^{-\int dx} \left[\int 3e^{2x} \cdot e^{\int dx} dx + C_1 \right] = e^{2x} + C_1 e^{-x}$$

由题意可求得 $C_1 = \frac{10}{21}a^5 - 1$, 且 $f'(x) - f(x) = e^{2x} + C_1 e^{-x}$ 的通解为

$$f(x) = e^{\int dx} \left[\int (e^{2x} + C_1 e^{-x}) \cdot e^{-\int dx} dx + C_2 \right] = e^{2x} - \frac{C_1}{2} e^{-x} + C_2 e^x$$

并且令 $x = 0$, 解得 $C_2 = -\frac{3}{2}$, 于是 $f(x) = e^{2x} - \frac{3}{2} e^{-x} - \left(\frac{5}{21} a^5 - \frac{1}{2} \right) e^{-x}$.

例 8.3.16. 设曲面积分

$$A = \frac{1}{a^5} \iint_S (x^2 z dy dz + y^2 z dz dx + z^2 x dx dy)$$

其中 S 是曲面 $x^2 + y^2 = az (0 \leq z \leq a), a > 0$ 第一卦限部分的外侧, 求三阶可导函数 $f(x)$, 使得满足以下条件:

$$(1) \quad f^{(i)}(0) = (-1)^i A, \quad (i = 0, 1, 2);$$

$$(2) \quad \text{使得 } y[f'(x) + 3e^{2x}]dx + f''(x)dy \text{ 是某个函数的全微分.}$$

法一: 曲面 $z = \frac{x^2 + y^2}{2}$ 的法向量的方向余弦为 $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma) = \frac{(2x, 2y, -a)}{\sqrt{a^2 + 4x^2 + 4y^2}}$, 故由两类曲面积分之间的关系, 得 $A = \frac{1}{a^5} \iint_S \frac{(x^2 z, y^2 z, z^2 x) \cdot (2x, 2y, -a)}{\sqrt{a^2 + 4x^2 + 4y^2}} dS$, 并且 $dS = \sqrt{1 + (z'_x)^2 + (z'_y)^2} dx dy = \frac{1}{a} \sqrt{a^2 + 4x^2 + 4y^2} dx dy$, 则

$$\begin{aligned}A &= \frac{1}{a^6} \iint_D \left(x^2 \left(\frac{x^2 + y^2}{a} \right), y^2 \left(\frac{x^2 + y^2}{a} \right), \left(\frac{x^2 + y^2}{a} \right)^2 x \right) \cdot (2x, 2y, -a) dx dy \\ &= \frac{1}{a^7} \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_0^a r^5 (2 \cos^3 \theta + 2 \sin^3 \theta - \cos \theta) \cdot r dr = \frac{1}{7} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (2 \cos^3 \theta + 2 \sin^3 \theta - \cos \theta) d\theta\end{aligned}$$

$$= \frac{1}{7} \left(\frac{4}{3} + \frac{4}{3} - 1 \right) = \frac{5}{21}$$

法二：添加辅助面 $S_x : x = 0, (y, z) \in D_{yz}$, 方向向内, $S_y : y = 0, (z, x) \in D_{zx}$, 方向向左, $S_z : z = a, (x, y) \in D_{xy}$: $x^2 + y^2 \leq a^2, x \geq 0, y \geq 0$, 方向上, 它们三个与 S 围成的区域为 Ω , 易得 $\iint_{S_x} = \iint_{S_y} = 0$, 而

$$\iint_{S_z} (x^2 z dy dz + y^2 z dz dx + z^2 x dx dy) = \iint_{D_{xy}} a^2 x dx dy = a^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta d\theta \int_0^a r^2 dr = \frac{a^5}{3}$$

由 Gauss 公式, 可得

$$\iint_{S_x + S_y + S_z + S} = \iiint_{\Omega} (4xz + 2yz) dV$$

其中 $\Omega : x^2 + y^2 \leq az, x \geq 0, y \geq 0, 0 \leq z \leq a$, 那么

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} (4xz + 2yz) dV &= \iint_{D_{xy}} dx dy \int_{\frac{x^2+y^2}{a}}^a (2x + y) \cdot 2z dz = \iint_{D_{xy}} (2x + y) \left[a^2 - \left(\frac{x^2 + y^2}{a} \right)^2 \right] dx dy \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_0^a (2r \cos \theta + r \sin \theta) \left(a^2 - \frac{r^4}{a^2} \right) r dr = \frac{4a^5}{7} \end{aligned}$$

于是可得 $A = \frac{1}{a^5} \left(\frac{4a^5}{7} - \frac{a^5}{3} \right) = \frac{5}{21}$,

再求函数 $f(x)$, 由于 $y[f'(x) + 3e^{2x}] dx + f''(x) dy$ 是某个函数的全微分, 于是有

$$\frac{\partial}{\partial y} (y[f'(x) + 3e^{2x}]) = \frac{\partial}{\partial x} (f''(x))$$

整理得 $f'''(x) - f'(x) = 3e^{2x}$, 该方程的齐次通解为 $r^3 - r = r(r^2 - 1) = 0 \Rightarrow r_1 = 0, r_2 = 1, r_3 = -1$, 那么 $Y = C_1 + C_2 e^x + C_3 e^{-x}$, 其特解为 $f(x) = \frac{1}{D(D-1)(D+1)} 3e^{2x} = \frac{1}{2} e^{2x}$, 那么该微分方程的通解为

$$f(x) = C_1 + C_2 e^x + C_3 e^{-x} + \frac{1}{2} e^{2x}$$

$$\text{又 } f(0) = A, f'(0) = -A, f''(0) = A, \text{ 解得 } f(x) = \frac{1}{2} e^{2x} - \frac{3}{2} e^x - \frac{11}{42} e^{-x} + \frac{3}{2}.$$

例 8.3.17. 设函数 $f(t)$ 在 $[0, +\infty)$ 上连续,

$$\Omega(t) = \{(x, y, z) \mid x^2 + y^2 + z^2 \leq t^2, z \geq 0, t \geq 0\}$$

$S(t)$ 是 $\Omega(t)$ 的表面, $D(t)$ 是 $\Omega(t)$ 在 xOy 平面上的投影区域, $L(t)$ 是 $D(t)$ 的边界曲线, 已知 $\forall t \in (0, +\infty)$ 恒有,

$$\oint_{L(t)} f(x^2 + y^2) \sqrt{x^2 + y^2} ds + \iint_{S(t)} (x^2 + y^2 + z^2) dS = \iint_{D(t)} f(x^2 + y^2) d\sigma + \iiint_{\Omega(t)} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} dV$$

求 $f(t)$ 的表达式.

$S(t)$ 由两部分组成, 分别记作:

$$S_1(t) : z = \sqrt{t^2 - x^2 - y^2}, (x, y) \in D(t); S_2(t) : z = 0, (x, y) \in D(t)$$

对弧长曲线积分的直接参数方程计算法, $L(t)$ 的参数方程为

$$L(t) : x = t \cos \theta, y = t \sin \theta, 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

则

$$ds = \sqrt{x'^2(\theta) + y'^2(\theta)} d\theta = t d\theta$$

代入对弧长的曲线积分式, 得

$$\oint_{L(t)} f(x^2 + y^2) \sqrt{x^2 + y^2} ds = \int_0^{2\pi} f(t^2) t \cdot t d\theta = 2\pi f(t^2) t^2$$

由曲面积分被积函数定义在积分曲面上和二重积分的极坐标计算方法, 得

$$\begin{aligned} \iint_{S(t)} (x^2 + y^2 + z^2) dS &= t^2 \iint_{S_1(t)} dS + \iint_{S_2(t)} (x^2 + y^2) dS = t^2 \cdot \frac{4\pi t^2}{2} + \iint_{D(t)} (x^2 + y^2) d\sigma \\ &= 2\pi t^4 + \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^t \rho^2 \rho d\rho = 2\pi t^4 + \frac{\pi}{2} t^4 = \frac{5}{2}\pi t^4 \end{aligned}$$

由二重积分的极坐标计算方法, 得

$$\iint_{D(t)} f(x^2 + y^2) d\sigma = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^t \rho f(\rho^2) d\rho = 2\pi \int_0^t \rho f(\rho^2) d\rho$$

由三重积分的球坐标计算方法, 得

$$\iiint_{\Omega(t)} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} dV = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_0^t r \cdot r^2 \sin \varphi dr = \frac{\pi}{2} t^4$$

将上述结果代入题设等式, 得

$$2\pi t^2 f(t^2) + \frac{5}{2}\pi t^4 = 2\pi \int_0^t f(\rho^2) \rho d\rho + \frac{\pi}{2} t^4 \quad (*)$$

整理得 $f(t^2) = \frac{\int_0^t f(\rho^2) d\rho}{t^2} - t^2$, 由 $f(t)$ 在 $t = 0$ 连续, 故

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} f(t^2) = f(0) = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\int_0^t f(\rho^2) \rho d\rho}{t^2} - \lim_{t \rightarrow 0^+} t^2 = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{f(t^2)t}{2t} = \frac{f(0)}{2}$$

故 $f(0) = 0$, 由等式 (*) 知 $f(t)$ 可导, 对两端求导并整理得

$$f'(t^2) + \frac{1}{2t^2} f(t^2) + 2 = 0$$

令 $u = t^2$, 有 $f'(u) + \frac{1}{2u} f(u) = -2$, 该方程为一阶非齐次线性微分方程, 由通解公式, 得

$$f(u) = e^{-\frac{1}{2} \int \frac{du}{u}} \left[\int -2 \cdot e^{\frac{1}{2} \int \frac{du}{u}} du + C \right] = \frac{1}{\sqrt{u}} \left[-2 \int \sqrt{u} du + C \right] = -\frac{4}{3}u + \frac{C}{\sqrt{u}}$$

即 $f(t) = -\frac{4}{3}t + \frac{C}{\sqrt{t}}$, 其中 C 为任意常数, 由 $f(0) = 0$ 得 $C = 0$, 故 $f(t) = -\frac{4}{3}t$.

8.3.3 微分方程与幂级数

例 8.3.18 (2007 数一). 设幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 内收敛, 其和函数 $y(x)$ 满足

$$y'' - 2xy' - 4y = 0, \quad y(0) = 0, \quad y'(0) = 1$$

(1) 证明: $a_{n+2} = \frac{2}{n+1} a_n$, $n = 1, 2, \dots$; (2) 求 $y(x)$ 的表达式.

(1) 对 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ 求一、二阶导数, 有

$$y'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^{n-1}, \quad y''(x) = \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1) a_n x^{n-2}$$

并代入关系式 $y'' - 2xy' - 4y = 0$, 整理可得

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(n+2) a_{n+2} x^n = \sum_{n=0}^{\infty} 4a_n x^n + \sum_{n=1}^{\infty} 2na_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} 2(n+2)a_n x^n$$

对比上式系数可得 $a_{n+2} = \frac{2}{n+1} a_n$.

(2) 因为 $y(0) = a_0 = 0, y'(0) = a_1 = 1$, 故 $a_{2n} = 0, n = 0, 1, 2, \dots$, 且

$$a_{2n+1} = \frac{2}{2n} a_{2n-1} = \cdots = \frac{2^n}{2n \cdot (2n-2) \cdots 4 \cdot 2} a_1 = \frac{1}{n!} n = 1, 2, \dots$$

从而

$$y = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n+1} x^{2n+1} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{n!} = x \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(x^2)^n}{n!} = x e^{x^2} x \in (-\infty, +\infty).$$

例 8.3.19. 求级数 $1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!}$ 的值.

因为 $\frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \searrow$, 且注意到

$$\frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} = \frac{\sqrt{1 \cdot 3 \cdot \sqrt{3 \cdot 5} \cdots \sqrt{(2n-1) \cdot (2n+1)}}}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdots (2n)} \frac{1}{\sqrt{2n+1}}$$

由 $\sqrt{ab} < \frac{a+b}{2} (a \neq b)$, 所以

$$0 < \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} < \frac{1}{\sqrt{2n+1}} \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$$

由 Leibniz 定理, 原级数收敛; 收敛半径为 1, 这是因为

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{2n+1}{2n+2} = 1$$

由此可知幂级数在 $(-1, 1)$ 内收敛, 记 $f(x) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} x^n$, 那么

$$f'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)!! n}{(2n)!!} x^{n-1}, 2x f'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)!!}{(2n-2)!!} x^n$$

于是有

$$2f'(x) - 2x f'(x) = f(x)$$

及

$$\frac{f'(x)}{f(x)} = \frac{1}{2(1-x)}$$

两边积分得 $\ln f(x) = \ln \frac{1}{\sqrt{1-x}}$, 因此 $f(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x}}$, 即 $1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} x^n = \frac{1}{\sqrt{1-x}}$, 令 $x \rightarrow -1^+$ 取极限得

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

例 8.3.20. 已知当 $x > 0$ 时, 有 $(1+x^2)f'(x) + (1+x)f(x) = 1$, 且

$$g'(x) = f(x), f(0) = g(0) = 0$$

证明: $\frac{1}{4} < \sum_{n=1}^{\infty} g\left(\frac{1}{n}\right) < 1$.

证 因为 $f'(x) + \frac{1+x}{1+x^2} f(x) = \frac{1}{1+x^2}$, 由一阶线性微分方程通解公式得

$$f(x) = e^{-\int \frac{1+x}{1+x^2} dx} \left[\int \frac{1}{1+x^2} \cdot e^{\int \frac{1+x}{1+x^2} dx} dx + C \right] = \frac{e^{-\arctan x}}{\sqrt{1+x^2}} \int_0^x \frac{e^{\arctan t}}{\sqrt{1+t^2}} dt$$

在 $x \in (0, 1]$ 上, 有

$$f(x) = \int_0^x \frac{e^{\arctan t - \arctan x}}{\sqrt{1+t^2} \cdot \sqrt{1+x^2}} dt \leqslant \int_0^x \frac{dt}{1+t^2} = \arctan x < x$$

于是有

$$\sum_{n=1}^{\infty} g\left(\frac{1}{n}\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\frac{1}{n}} f(x) dx < \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\frac{1}{n}} x dx = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{12} < 1$$

另一方面, 由 $e^x > 1 + x$, $x \neq 0$, 有

$$\begin{aligned} f(x) &\geq \frac{1}{1+x^2} \int_0^x e^{\arctan t - \arctan x} dt \geq \frac{1}{1+x^2} \int_0^x [1 + (\arctan t - \arctan x)] dt \\ &= \frac{1}{1+x^2} \int_0^x \left[1 + \frac{(t-x)}{1+\xi^2}\right] dt \geq \frac{1}{1+x^2} \int_0^x [1+t-x] dt = \frac{1}{1+x^2} \left(x - \frac{x^2}{2}\right) \end{aligned}$$

于是有

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} g\left(\frac{1}{n}\right) &= \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\frac{1}{n}} f(x) dx \geq \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\frac{1}{n}} \frac{1}{1+x^2} \left(x - \frac{x^2}{2}\right) dx \geq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{1+\frac{1}{n^2}} \int_0^{\frac{1}{n}} \left(x - \frac{x^2}{2}\right) dx \\ &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2+1} \left(1 - \frac{1}{3n}\right) \geq \frac{1}{3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2+1} \geq \frac{1}{3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+1)} = \frac{1}{3} > \frac{1}{4} \end{aligned}$$

综上得证.

例 8.3.21 (第十届数学竞赛决赛). 求 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{3} \cdot \frac{2}{5} \cdot \frac{3}{7} \cdots \frac{n}{2n+1} \cdot \frac{1}{n+1}$.

级数的通项化为

$$a_n = \frac{2(2n)!!}{(2n+1)!!(n+1)} \cdot \frac{1}{2^{n+1}} = \frac{2(2n)!!}{(2n+1)!!(n+1)} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^{2(n+1)}$$

令 $f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(2n)!!}{(2n+1)!!(n+1)} x^{2(n+1)}$, 记 $u_n(x) = \frac{2(2n)!!}{(2n+1)!!(n+1)} x^{2(n+1)}$,

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{u_{n+1}(x)}{u_n(x)} \right| &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2(2n+2)!!}{(2n+3)!!(n+2)} x^{2(n+1)} \cdot \frac{(2n+1)!!(n+1)}{2(2n)!!x^{2(n+1)}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(2n+3)(n+1)}{(2n+3)(n+2)} x^2 = x^2 \end{aligned}$$

所以 $x^2 < 1$ 时, $f(x)$ 的幂级数收敛, 其收敛区间为 $(-1, 1)$,

$$f'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \cdot (2n)!!}{(2n+1)!!} x^{2n+1}, \quad f''(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \cdot (2n)!!}{(2n-1)!!} x^{2n}$$

$$\begin{aligned} f''(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \cdot (2n)!!}{(2n-1)!!} x^{2n} = x \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \cdot (2n)!!}{(2n-1)!!} x^{2n-1} = x \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \cdot (2n)!!}{(2n-1)!!} \int_0^x x^{2n-1} dx \right)' \\ &= x \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \cdot (2n-2)!!}{(2n-1)!!} x^{2n} \right)' = x \left(x \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \cdot (2n-2)!!}{(2n-1)!!} x^{2n-1} \right)' \\ &= x \left(x \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4 \cdot (2n)!!}{(2n+1)!!} x^{2n+1} \right)' = x \left[x \left(4x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \cdot (2n)!!}{(2n+1)!!} x^{2n+1} \right) \right]' \\ &= x [x(4x + f'(x))]' = x(8x + f'(x) + xf''(x)) \Rightarrow f''(x) - \frac{x}{1-x^2} f'(x) = \frac{8x^2}{1-x^2} \end{aligned}$$

这是关于 $f'(x)$ 的一阶线性微分方程, 其通解为

$$\begin{aligned} f'(x) &= e^{\int \frac{-x}{1-x^2} dx} \left[\int \frac{8x^2}{1-x^2} \cdot e^{-\int \frac{x}{1-x^2} dx} dx + C_1 \right] = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \left[8 \int \frac{x^2}{\sqrt{1-x^2}} dx + C_1 \right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} (4 \arcsin x - 4x\sqrt{1-x^2} + C_1) \end{aligned}$$

因为 $f'(0) = 0$, 可得 $C_1 = 0$, 所以 $f'(x) = 4 \left(\frac{\arcsin x}{\sqrt{1-x^2}} - x \right)$, 积分得

$$f(x) = 4 \int \left(\frac{\arcsin x}{\sqrt{1-x^2}} - x \right) dx = 2 \arcsin^2 x - 2x^2 + C_2$$

又有 $f(0) = 0$, 可得 $C_2 = 0$, 所以 $f(x) = 2 \arcsin^2 x - 2x^2$, 于是有

$$\text{原式} = \sum_{n=1}^{\infty} a_n = f\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 2 \arcsin^2\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) - 1 = \frac{\pi^2}{8} - 1$$

第二部分

线性代数

第9章

行列式

“不管数学的任一分支是多么抽象，总有一天会应用在这实际世界上。”

——罗巴切夫斯基

行列式在线性代数中有广泛的应用，包括求解线性方程组、计算矩阵的逆、判断矩阵是否可逆等。行列式还可以用来计算矩阵的特征值和特征向量，因而在许多领域中都有重要的应用。

9.1 行列式的计算

9.1.1 行列式的定义及性质

定义 9.1.1. n 级排列由 $1, 2, \dots, n$ 组成的一个有序数组称为一个 n 级排列，通常记为 $i_1 i_2 \cdots i_n$ 。

定义 9.1.2. 在一个排列中，如果一对数的前后位置与大小顺序相反，即前面的数大于后面的数，则它们构成一个逆序。

定义 9.1.3. 一个排列中的逆序总数，称为这个排列的逆序数，通常记为 $\tau(i_1 i_2 \cdots i_n)$ 。

定义 9.1.4. 逆序数为奇数（偶数）的排列，称为奇（偶）排列。

定义 9.1.5. 把一个排列中某两个数的位置互换，而其余的数不动，就得到另一个排列，这样的一个变换称为一次对换。

定理 9.1.1. 任意一个排列经过一次对换后，奇偶性改变。

定理 9.1.2. n 级排列共有 $n!$ 种，奇偶排列各占一半。

例 9.1.1. 选择 i 与 k ，使 $a_{1i}a_{32}a_{4k}a_{25}a_{53}$ 成为五阶行列式中一个带负号的项。

将给定的项改写成行标自然顺序, 即

$$a_{1i}a_{25}a_{32}a_{4k}a_{53}$$

列标构成的排列 $i52k4$ 中缺 1 和 4, 令 $i = 1, k = 4, \tau(15243) = 3 + 1 = 4$, 故该项带正号; 令 $i = 4, k = 1, \tau(45213) = 3 + 3 + 1 = 7$, 故该项带负号.

例 9.1.2. 求 $f(x) = \begin{vmatrix} 2x & x & 1 & 2 \\ 1 & x & 1 & -1 \\ 3 & 2 & x & 1 \\ 1 & 1 & 1 & x \end{vmatrix}$ 中 x^4 与 x^3 的系数.

只有行列式的对角线上的元素相乘才出现 x^4 , 并且带正号, 于是 x^4 的系数为 2; 同理, 含 x^3 的项只有一项, 即

$$x \cdot 1 \cdot x \cdot x = x^3$$

而且其列标所构成的排列为 2134, 于是 $\tau(2134) = 1$, 即 x^3 的系数为 -1.

定义 9.1.6. $\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$ 是所有取自不同行不同列的 n 个元素的乘积 $a_{1_1}a_{2j_2}\cdots a_{nj_n}$ 的代数和, 这里 $j_1j_2\cdots j_n$ 是一个 n 级排列. 当 $j_1j_2\cdots j_n$ 是偶排列时, 该项前面带正号; 当 $j_1j_2\cdots j_n$ 是奇排列时, 该项前面带负号, 即

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \sum_{j_1j_2\cdots j_n} (-1)^{\tau(j_1j_2\cdots j_n)} a_{1j_1}a_{2j_2}\cdots a_{nj_n}$$

其中 $\sum_{j_1j_2\cdots j_n}$ 表示对所有 n 级排列求和. n 阶行列式有时简记为 $|a_{ij}|_n$, 而且有如下另外两种类似的定义:

$$|a_{ij}|_n = \sum_{i_1i_2\cdots i_n} (-1)^{\tau(i_1i_2\cdots i_n)} a_{i_11}a_{i_22}\cdots a_{i_nn}$$

和

$$|a_{ij}|_n = \sum_{\substack{i_1i_2\cdots i_n \\ j_1j_2\cdots j_n}} (-1)^{\tau(i_1i_2\cdots i_n) + \tau(j_1j_2\cdots j_n)} a_{i_1j_1}a_{i_2j_2}\cdots a_{i_nj_n}.$$

由 n 级排列的性质可知, n 阶行列式共有 $n!$ 项, 其中冠以正号的项和冠以负号的项 (不算元素本身所带的负号) 各占一半.

例 9.1.3. 证明 n 阶行列式微分法:

$$\frac{d}{dx} \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{i1} & f_{i2} & \cdots & f_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nn} \end{vmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{d}{dx} f_{i1} & \frac{d}{dx} f_{i2} & \cdots & \frac{d}{dx} f_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nn} \end{vmatrix}.$$

证 从行列式的定义出发予以证明,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{i1} & f_{i2} & \cdots & f_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nn} \end{vmatrix} &= \frac{d}{dx} \sum_{j_1 j_2 \cdots j_n} (-1)^{\tau(j_1 j_2 \cdots j_n)} \prod_{i=1}^n f_{i j_i} \\ &= \sum_{j_1 j_2 \cdots j_n} (-1)^{\tau(j_1 j_2 \cdots j_n)} \frac{d}{dx} \prod_{i=1}^n f_{i j_i} = \sum_{j_1 j_2 \cdots j_n} (-1)^{\tau(j_1 j_2 \cdots j_n)} \sum_{i=1}^n f_{1 j_1} f_{2 j_2} \cdots \frac{d}{dx} f_{i j_i} \cdots f_{n j_n} \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j_1 j_2 \cdots j_n} (-1)^{\tau(j_1 j_2 \cdots j_n)} f_{1 j_1} f_{2 j_2} \cdots \frac{d}{dx} f_{i j_i} \cdots f_{n j_n} = \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{d}{dx} f_{i1} & \frac{d}{dx} f_{i2} & \cdots & \frac{d}{dx} f_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nn} \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

定理 9.1.3. 行列式 D 与它的转置行列式 D^\top (将 D 行的项转为列的项, 如第 1 行转为第 1 列, \dots , 第 n 行转为第 n 列) 相等.

定理 9.1.4. 互换行列式的两行 (列), 行列式变号 (例如, 交换第 1 行和第 2 行, 记为 $r_1 \leftrightarrow r_2$; 交换第 1 列和第 2 列, 记为 $c_1 \leftrightarrow c_2$).

定理 9.1.5. 行列式的某一行(列) 中所有的元素都乘以同一数 k , 等于用数 k 乘此行列式.

推论 9.1.1. 行列式中某一行 (列) 的所有元素的公因子可以提到整个行列式的外面.

定理 9.1.6. 行列式中如果有两行 (列) 元素成比例, 则此行列式等于零.

定理 9.1.7. 若行列式的某一列 (行) 的所有元素都是两数之和, 例如第 i 列的元素都是两数之和, 即

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1i} + a'_{1i} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2i} + a'_{2i} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{ni} + a'_{ni} & \cdots & a_{2n} \end{vmatrix}$$

则 D 等于下列两个行列式之和

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1i} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2i} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{ni} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a'_{1i} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a'_{2i} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a'_{ni} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$$

定理 9.1.8. 把行列式的某一行 (列) 的各元素乘以同一数然后加到另一行 (列) 对应的元素上, 行列式不变.

常见的行列式展开.

二阶行列式

$$(1) \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$$

三阶行列式

$$(2) \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{13}a_{22}a_{31} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32}$$

上三角形、下三角形、对角行列式

$$(3) \begin{array}{c|ccccc} a_{11} & & * & & a_{11} & & O \\ & a_{22} & & & a_{22} & & O \\ & & \ddots & & & & \ddots \\ O & & & a_{nn} & & O & & a_{nn} \end{array} = a_{11}a_{22} \cdots a_{nn}$$

副对角线方向的行列式

$$(4) \begin{array}{c|ccccc} * & & a_{1n} & & O & & a_{1n} \\ & & a_{2,n-1} & & \ddots & & a_{2,n-1} \\ & \ddots & & & \ddots & & \ddots \\ a_{n1} & & O & & a_{n1} & & O \end{array} = (-1)^{\frac{n(n-1)}{2}} \prod_{i=1}^n a_{i,n-i+1}$$

9.1.2 行列式按行 (列) 展开定理

定理 9.1.9 (Laplace 展开定理). 取定行指标 $i_1, i_2, \dots, i_p, 1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_p \leq n$, 遍取行列式 $\det A$ 中第 i_1, i_2, \dots, i_p 行上的 p 阶子式, 并分别乘以相应的代数余子式, 其和即为 $\det A$, 具体地说, 有

$$\det A = \sum_{1 \leq j_1 < j_2 < \dots < j_p \leq n} A \begin{pmatrix} i_1 i_2 \cdots i_p \\ j_1 j_2 \cdots j_p \end{pmatrix} \left[(-1)^{\sum_{k=1}^p i_k + \sum_{k=1}^p j_k} A \begin{pmatrix} i_{p+1} i_{p+2} \cdots i_n \\ j_{p+1} j_{p+2} \cdots j_n \end{pmatrix} \right]$$

其中 $i_1 i_2 \cdots i_p i_{p+1} \cdots i_n$ 和 $j_1 j_2 \cdots j_p j_{p+1} \cdots j_n$ 都是 $1, 2, \dots, n$ 的排列, 并且 $1 \leq i_{p+1} < i_{p+2} < \cdots \leq i_n, 1 \leq j_{p+1} < j_{p+2} < \cdots \leq j_n$.

例 9.1.4. 利用 Laplace 展开定理计算下列行列式:

$$(1) D = \begin{vmatrix} -4 & 1 & 2 & -2 & 1 \\ 0 & 3 & 0 & 1 & -5 \\ 2 & -3 & 1 & -3 & 1 \\ -1 & -1 & 3 & -1 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 2 & 5 \end{vmatrix}. \quad (2) D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ x_1 & x_2 & 0 & 0 & 0 & x_3 \\ a_1 & b_1 & 1 & 1 & 1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & x_1 & x_2 & x_3 & c_2 \\ a_3 & b_3 & x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & c_3 \\ x_1^2 & x_2^2 & 0 & 0 & 0 & x_3^2 \end{vmatrix}.$$

(1) 将行列式 D 按第 1 列、第 3 列作 Laplace 展开, 得到

$$\begin{aligned} D &= \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq 5} A\begin{pmatrix} i_1 & i_2 \\ 1 & 3 \end{pmatrix} \left[(-1)^{i_1+i_2+1+3} A\begin{pmatrix} i_3 & i_4 & i_5 \\ 2 & 4 & 5 \end{pmatrix} \right] \\ &= (-1)^{1+3+1+3} \begin{vmatrix} -4 & 2 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 3 & 1 & -5 \\ -1 & -1 & 0 \\ 4 & 2 & 5 \end{vmatrix} + (-1)^{1+4+1+3} \begin{vmatrix} -4 & 2 \\ -1 & 3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 3 & 1 & -5 \\ -3 & -3 & 1 \\ 4 & 2 & 5 \end{vmatrix} \\ &\quad + (-1)^{3+4+1+3} \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 3 & 1 & -5 \\ 4 & 2 & 5 \end{vmatrix} \\ &= -8 \times (-20) - (-10) \times (-62) - 7 \times 87 = -1069. \end{aligned}$$

(2) 将行列式 D 按第 3 列、第 4 列和第 5 列作 Laplace 展开, 得到

$$\begin{aligned} D &= \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < i_3 \leq 6} A\begin{pmatrix} i_1 & i_2 & i_3 \\ 3 & 4 & 5 \end{pmatrix} \left[(-1)^{i_1+i_2+i_3+3+4+5} A\begin{pmatrix} i_4 & i_5 & i_6 \\ 1 & 2 & 6 \end{pmatrix} \right] \\ &= (-1)^{3+4+5+3+4+5} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 \end{vmatrix} = \prod_{1 \leq j < i \leq 3} (x_i - x_j)^2. \end{aligned}$$

9.1.3 具象行列式的计算

化为三角形矩阵

例 9.1.5 (2016 复旦大学). 设 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n}$, 其中 $a_{ij} = \max\{i, j\}$, 求行列式 $\det \mathbf{A}$.

对于 $i = 2, \dots, n$, 依次将第 i 行的 -1 倍加到第 $i-1$ 行, 得

$$\det \mathbf{A} = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & \cdots & n \\ 2 & 2 & 3 & \cdots & n \\ 3 & 3 & 3 & \cdots & n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n & n & n & \cdots & n \end{vmatrix} \xrightarrow[i=2, \dots, n]{r_{i-1}-r_i} \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -1 & -1 & -1 & \cdots & -1 & 0 \\ n & n & n & \cdots & n & n \end{vmatrix} = (-1)^{n-1} n.$$

例 9.1.6. 设 $n \geq 2$, 计算 n 阶行列式 $D_n = \det(a_{ij})$, 其中 $a_{ij} = |i-j|$, $i, j = 1, 2, \dots, n$.

从最后一行起, 依次将后一行减去前一行, 再将所得行列式的最后一行加到其他行, 得

$$D_n = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 2 & \cdots & n-2 & n-1 \\ 1 & 0 & 1 & \cdots & n-3 & n-2 \\ 2 & 1 & 0 & \cdots & n-4 & n-3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ n-2 & n-3 & n-4 & \cdots & 0 & 1 \\ n-1 & n-2 & n-3 & \cdots & 1 & 0 \end{vmatrix} \xrightarrow[i=2, \dots, n]{r_i-r_{i-1}} \begin{vmatrix} 0 & 1 & 2 & \cdots & n-2 & n-1 \\ 1 & -1 & -1 & \cdots & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & \cdots & -1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & -1 \end{vmatrix}$$

$$\frac{c_j+c_n}{j=1, \dots, n-1} \left| \begin{array}{cccccc} n-1 & n & n+1 & \cdots & 2n-3 & n-1 \\ 0 & -2 & -2 & \cdots & -2 & -1 \\ 0 & 0 & -2 & \cdots & -2 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 \end{array} \right| = (-1)^{n-1} 2^{n-2} (n-1).$$

例 9.1.7. 计算行列式 $D_n = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & \cdots & n \\ 2 & 3 & 4 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ n-1 & n & 1 & \cdots & n-2 \\ n & 1 & 2 & \cdots & n-1 \end{vmatrix}.$

依次将第 n 行减去第 $n-1$ 行, 第 $n-1$ 行减去第 $n-2$ 行, \dots , 第 2 行减去第 1 行, 再将各列加到第 1 列, 得

$$\begin{aligned} D_n &\xrightarrow[i=n, \dots, 1]{r_i - r_{i-1}} \left| \begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 3 & \cdots & n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1-n \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & 1 & 1-n & \cdots & 1 \\ 1 & 1-n & 1 & \cdots & 1 \end{array} \right| \xrightarrow[j=2, \dots, n]{c_1 + c_j} \left| \begin{array}{ccccc} \frac{n(n+1)}{2} & \vdots & 2 & 3 & \cdots & n \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \vdots & 1 & 1 & \cdots & 1-n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \vdots & 1 & 1-n & \cdots & 1 \\ 0 & \vdots & 1-n & 1 & \cdots & 1 \end{array} \right| \\ &= \frac{n(n+1)}{2} \left| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & \cdots & 1-n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & 1-n & \cdots & 1 \\ 1-n & 1 & \cdots & 1 \end{array} \right| \xrightarrow[j=2, \dots, n-1]{c_1 + c_j} \frac{n(n+1)}{2} \left| \begin{array}{ccccc} -1 & 1 & \cdots & 1-n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ -1 & 1-n & \cdots & 1 \\ -1 & 1 & \cdots & 1 \end{array} \right|_{n-1} \\ &\xrightarrow{j=2, \dots, n-1} \frac{n(n+1)}{2} \left| \begin{array}{cccc} -1 & 0 & \cdots & -n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ -1 & -n & \cdots & 0 \\ -1 & 0 & \cdots & 0 \end{array} \right|_{n-1} = (-1)^{\frac{n(n-1)}{2}} \frac{n^{n-1}(n+1)}{2}. \end{aligned}$$

例 9.1.8 (2008 山西师范大学). 计算 $f(x+1) - f(x)$, 其中

$$f(x) = \left| \begin{array}{ccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & x \\ 1 & 2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & x^2 \\ 1 & 3 & 3 & 0 & \cdots & 0 & x^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & n & C_n^2 & C_n^3 & \cdots & C_n^{n-1} & x^n \\ 1 & n+1 & C_{n+1}^2 & C_{n+1}^3 & \cdots & C_{n+1}^{n-1} & x^{n+1} \end{array} \right|.$$

由二项式定理 $(a+b)^n = \sum_{k=0}^n C_n^k a^{n-k} b^n$,

$$f(x+1) - f(x) = \left| \begin{array}{ccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 2x+1 \\ 1 & 3 & 3 & 0 & \cdots & 0 & 3x^2+3x+1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & n & C_n^2 & C_n^3 & \cdots & C_n^{n-1} & nx^{n-1} + C_n^2 x^{n-2} + \cdots + 1 \\ 1 & n+1 & C_{n+1}^2 & C_{n+1}^3 & \cdots & C_{n+1}^{n-1} & (n+1)x^n + C_{n+1}^2 x^{n-1} + \cdots + 1 \end{array} \right|$$

将第一列乘 -1 , 第二列乘 $-x$, 第三列乘 $-x^2$, \dots , 第 n 列乘 $-x^{n-1}$, 都加到最后一列, 得

$$f(x+1) - f(x) \stackrel{\frac{c_{n+1}-x^{j-1}c_j}{j=1,\dots,n}}{=} \left| \begin{array}{ccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 3 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & n & C_n^2 & C_n^3 & \cdots & C_n^{n-1} & 0 \\ 1 & n+1 & C_{n+1}^2 & C_{n+1}^3 & \cdots & C_{n+1}^{n-1} & (n+1)x^n \end{array} \right| = (n+1)!x^n.$$

化为对角型矩阵

$$\left| \begin{array}{ccccc} 1 & 1 & \cdots & 1 & 2-n \\ 1 & 1 & \cdots & 2-n & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & 2-n & \cdots & 1 & 1 \\ 2-n & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{array} \right|.$$

第二列至第 n 列都加到第一列, 再将第一列的 -1 倍加到其他各列, 得

$$D_n \stackrel{\frac{c_1+c_j}{j=2,\dots,n}}{=} \left| \begin{array}{ccccc} 1 & 1 & \cdots & 1 & 2-n \\ 1 & 1 & \cdots & 2-n & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & 2-n & \cdots & 1 & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{array} \right| \stackrel{\frac{c_j-c_1}{j=2,\dots,n}}{=} \left| \begin{array}{ccccc} 1 & 0 & \cdots & 0 & 1-n \\ 1 & 0 & \cdots & 1-n & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & 1-n & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{array} \right| = (-1)^{\frac{n^2+n-2}{2}}(n-1)^{n-1}.$$

例 9.1.10 (2008 北京科技大学). 计算行列式 $|A|$, 其中

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n-1 & n+x \\ 1 & 2 & \cdots & (n-1)+x & n \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & 2+x & \cdots & n-1 & n \\ 1+x & 2 & \cdots & n-1 & n \end{pmatrix}.$$

从第二行至第 n 行都减去第一行, 再把所有列都加到最后一列, 得对角型行列式

$$|A| \stackrel{\frac{r_i-r_1}{i=2,\dots,n}}{=} \left| \begin{array}{ccccc} 1 & 2 & \cdots & n-1 & n+x \\ 0 & 0 & \cdots & x & -x \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & x & \cdots & 0 & -x \\ x & 0 & \cdots & 0 & -x \end{array} \right| \stackrel{\frac{c_n+c_j}{j=1,\dots,n-1}}{=} \left| \begin{array}{ccccc} 1 & 2 & \cdots & n-1 & x + \frac{n(n+1)}{2} \\ 0 & 0 & \cdots & x & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & x & \cdots & 0 & 0 \\ x & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{array} \right| = (-1)^{\frac{n(n-1)}{2}} \left(x + \frac{n^2+n}{2} \right) x^{n-1}.$$

$$\left| \begin{array}{ccccc} x & 4 & 4 & \cdots & 4 \\ 1 & x & 2 & \cdots & 2 \\ 1 & 2 & x & \cdots & 2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & 2 & 2 & \cdots & x \end{array} \right|$$

例 9.1.11 (2002 华东师范大学). 计算 n 阶行列式 $D_n =$

先把第一列乘二, 再把第一行除以二, 得

$$D_n \xrightarrow[c_1 \times 2]{r_1/2} \left| \begin{array}{ccccc} x & 2 & 2 & \cdots & 2 \\ 2 & x & 2 & \cdots & 2 \\ 2 & 2 & x & \cdots & 2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2 & 2 & 2 & \cdots & x \end{array} \right| \xrightarrow[r_i - r_1]{i=2, \dots, n} \left| \begin{array}{ccccc} x & 2 & 2 & \cdots & 2 \\ 2-x & x-2 & 0 & \cdots & 0 \\ 2-x & 0 & x-2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2-x & 0 & 0 & \cdots & x-2 \end{array} \right|$$

$$\xrightarrow[j=2, \dots, n]{c_1 + c_j} \left| \begin{array}{ccccc} x+2(n-1) & 2 & 2 & \cdots & 2 \\ 0 & x-2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & x-2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & x-2 \end{array} \right| = (x+2n-2)(x-2)^{n-1}$$

例 9.1.12 (2005 北京工业大学). 计算 n 阶行列式

$$\left| \begin{array}{ccccc} a+1 & a+2 & a+3 & \cdots & a+n \\ a+2 & a+3 & a+4 & \cdots & a+1 \\ a+3 & a+4 & a+5 & \cdots & a+2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a+n & a+1 & a+2 & \cdots & a+n-1 \end{array} \right|.$$

从最后一行开始, 每行都减去其前一行, 然后各列都加到第一列, 并按第一列展开, 得

$$D \xrightarrow[i=n, \dots, 2]{r_i - r_{i-1}} \left| \begin{array}{cccccc} a+1 & a+2 & a+3 & \cdots & a+n-1 & a+n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1-n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1-n & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & 1-n & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{array} \right|$$

$$\xrightarrow[j=2, \dots, n]{c_1 + c_j} \left| \begin{array}{cccccc} \frac{1}{2}n(2a+n+1) & a+2 & a+3 & \cdots & a+n-1 & a+n \\ 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1-n \\ 0 & 1 & 1 & \cdots & 1-n & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 1-n & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{array} \right|$$

$$= \frac{1}{2}n(2a+n+1) \left| \begin{array}{ccccc} 1 & 1 & \cdots & 1 & 1-n \\ 1 & 1 & \cdots & 1-n & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1-n & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{array} \right|_{n-1} = (-1)^{\frac{n(n-1)}{2}} \left[a + \frac{n(n+1)}{2} \right] n^{n-1}.$$

建立递推公式

例 9.1.13. 求下列 n 阶行列式

$$(1) D_n = \left| \begin{array}{ccc} 2a & a^2 & \\ 1 & 2a & a^2 \\ \ddots & \ddots & \ddots \\ & 1 & 2a & a^2 \\ & & 1 & 2a \end{array} \right|. \quad (2) D_n = \left| \begin{array}{ccc} a+b & ab & \\ 1 & a+b & ab \\ \ddots & \ddots & \ddots \\ & 1 & a+b & ab \\ & & 1 & a+b \end{array} \right|.$$

(1) 把 D_n 第 1 列乘 $-\frac{1}{2}a$ 加到第 2 列, 再把第 2 列乘 $-\frac{2}{3}a$ 加到第 3 列, 如此下去, 直至把第 $n-1$ 列乘 $-\frac{n-1}{n}a$ 加到第 n 列, 得

$$D_n \xrightarrow[j=1, \dots, n-1]{c_{j+1}-c_j \times \frac{j}{j+1}a} \begin{vmatrix} 2a & 0 & & & \\ 1 & \frac{3}{2}a & 0 & & \\ & 1 & \frac{4}{3}a & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & 0 \\ & & & 1 & \frac{n+1}{n}a \end{vmatrix} = (n+1)a^n.$$

(2) 把 D_n 按第一行展开, 得

$$D_n = (a+b)D_{n-1} - ab \begin{vmatrix} 1 & ab & & & \\ 0 & a+b & ab & & \\ & 1 & a+b & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & ab \\ & & & 1 & a+b \end{vmatrix}_{n-1} = (a+b)D_{n-1} - abD_{n-2}.$$

所以有递推公式

$$D_n - aD_{n-1} = b(D_{n-1} - aD_{n-2})$$

由此逐次递推, 得

$$D_n - aD_{n-1} = b^2(D_{n-2} - aD_{n-3}) = \cdots = b^{n-2}(D_2 - aD_1)$$

注意到

$$D_1 = a+b, D_2 = \begin{vmatrix} a+b & ab \\ 1 & a+b \end{vmatrix} = a^2 + ab + b^2$$

所以

$$D_n - aD_{n-1} = b^n$$

根据对称性, 有

$$D_n - bD_{n-1} = a^n$$

若 $a = b$ (可见上题), 则 $D_n = a^n + aD_{n-1}$, 由此递推, 得

$$D_n = (n+1)a^n$$

若 $a \neq b$, 可得 $D_n = \frac{b^{n+1} - a^{n+1}}{b-a}$.

例 9.1.14 (1994 华中师范大学). 计算 $n+1$ 阶行列式

$$D_{n+1} = \begin{vmatrix} a & -1 & & & & \\ ax & a & -1 & & & \\ ax^2 & ax & a & -1 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \\ ax^{n-1} & ax^{n-2} & ax^{n-3} & \cdots & a & -1 \\ ax^n & ax^{n-1} & ax^{n-2} & \cdots & ax & a \end{vmatrix}.$$

法一: 将第二列的 $-x$ 倍加到第一列, 第三列的 $-x$ 倍加到第二列, 以此类推,

$$D_{n+2} \xrightarrow[j=1, \dots, n]{c_j-xc_{j+1}} \begin{vmatrix} a+x & -1 & & & & \\ 0 & a+x & -1 & & & \\ 0 & 0 & a+x & -1 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a+x & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & a \end{vmatrix} = a(a+x)^n.$$

法二: 先把第二列乘 a 加到第一列, 并提出第一列的公因子 $x+a$, 再按第一行展开, 得

$$D_{n+1} = (x+a)D_n = (x+a)^2D_{n-1} = \cdots = (x+a)^{n-1}D_2 = (x+a)^{n-1} \begin{vmatrix} a & -1 \\ ax & a \end{vmatrix} = a(x+a)^n.$$

例 9.1.15 (2006 中国科学院). 已知 α, β, γ 为实数, 求 $\det A =$

$$\begin{pmatrix} \alpha & \beta & & & \\ \gamma & \alpha & \beta & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & \gamma & \alpha & \beta \\ & & & \gamma & \alpha \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n}$$
 的值.

显然, 若 $\beta = 0$ 或 $\gamma = 0$, 则 $\det A = \alpha^n$. 因此, 下设 $\beta\gamma \neq 0$ 把 $D_n = \det A$ 按第一行展开, 得

$$D_n = \alpha D_{n-1} - \beta\gamma D_{n-2}$$

令 $p + q = \alpha, pq = \beta\gamma$, 则 p, q 是二次方程 $x^2 - \alpha x + \beta\gamma = 0$ 的根. 故有如下递推公式

$$D_n - pD_{n-1} = q(D_{n-1} - pD_{n-2})$$

由此逐次递推, 得

$$D_n - pD_{n-1} = q^2(D_{n-2} - pD_{n-3}) = \cdots = q^{n-2}(D_2 - pD_1)$$

注意到

$$D_1 = \alpha = p + q, D_2 = \begin{vmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \alpha \end{vmatrix} = \alpha^2 - \beta\gamma = p^2 + pq + q^2$$

所以

$$D_n - pD_{n-1} = q^{n-2}[p^2 + pq + q^2 - p(p + q)] = q^n$$

根据对称性

$$D_n - qD_{n-1} = p^n$$

若 $\alpha^2 = 4\beta\gamma$, 则 $p = q$, 所以 $D_n = p^n + pD_{n-1}$. 由此递推, 得

$$D_n = (n+1)p^n = (n+1)\left(\frac{\alpha}{2}\right)^n$$

若 $\alpha^2 \neq 4\beta\gamma$, 则 $p \neq q$, 则有

$$D_n = \frac{p^{n+1} - q^{n+1}}{p - q} = \frac{\left(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4\beta\gamma}\right)^{n+1} - \left(\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4\beta\gamma}\right)^{n+1}}{2^{n+1}\sqrt{\alpha^2 - 4\beta\gamma}}.$$

升阶法

例 9.1.16. 计算下列行列式 $|A|$, $a_i \neq 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$),

$$(1) A = \begin{pmatrix} 1 + a_1^2 & a_1 a_2 & \cdots & a_1 a_n \\ a_2 a_1 & 1 + a_2^2 & \cdots & a_2 a_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_n a_1 & a_n a_2 & \cdots & 1 + a_n^2 \end{pmatrix} \quad \parallel \quad (2) A = \begin{pmatrix} 1 + a_1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 + a_2 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 + a_n \end{pmatrix}.$$

(1) 把 $|A|$ 添加一行、一列且保持值不变,

$$|A| = \begin{vmatrix} 1 & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ 0 & 1 + a_1^2 & a_1 a_2 & \cdots & a_1 a_n \\ 0 & a_2 a_1 & 1 + a_2^2 & \cdots & a_2 a_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & a_n a_1 & a_n a_2 & \cdots & 1 + a_n^2 \end{vmatrix}_{n+1} \xrightarrow[i=1, \dots, n]{r_{i+1} - a_i r_1} \begin{vmatrix} 1 & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ -a_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -a_n & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{vmatrix}$$

$$\xrightarrow[j=1, \dots, n]{c_1 + a_j c_{j+1}} \begin{vmatrix} 1 + \sum_{k=1}^n a_k^2 & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{vmatrix} = 1 + \sum_{k=1}^n a_k^2.$$

(2) 同样地, 把 $|A|$ 添加一行、一列且保持值不变,

$$|A| = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \\ 0 & 1+a_1 & 1 & \cdots & \cdots & \cdots & 1 \\ 0 & 1 & 1+a_2 & \cdots & & & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & 1 & 1 & \cdots & 1+a_n & n+1 & \end{vmatrix} \xrightarrow[i=1, \dots, n]{r_{i+1}-r_1} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ -1 & a_1 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & 0 & a_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & 0 & 0 & \cdots & a_n \end{vmatrix}$$

$$\xrightarrow[c_1 + \frac{1}{a_j} c_{j+1}]{j=1, \dots, n} \begin{vmatrix} 1 + \sum_{k=1}^n \frac{1}{a_k} & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 0 & a_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & a_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_n \end{vmatrix} = \prod_{k=1}^n a_k \left(1 + \sum_{k=1}^n \frac{1}{a_k} \right).$$

例 9.1.17 (2003 南开大学). 计算下列行列式的值:

$$D = \begin{vmatrix} a_1 + b_1 c_1 & a_2 + b_1 c_2 & \cdots & a_n + b_1 c_n \\ a_1 + b_2 c_1 & a_2 + b_2 c_2 & \cdots & a_n + b_2 c_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_1 + b_n c_1 & a_2 + b_n c_2 & \cdots & a_n + b_n c_n \end{vmatrix}$$

其中 $n \geq 3$.

法一: 利用升阶法,

$$D = \begin{vmatrix} 1 & c_1 & c_2 & \cdots & c_n \\ 0 & a_1 + b_1 c_1 & a_2 + b_1 c_2 & \cdots & a_n + b_1 c_n \\ 0 & a_1 + b_2 c_1 & a_2 + b_2 c_2 & \cdots & a_n + b_2 c_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & a_1 + b_n c_1 & a_2 + b_n c_2 & \cdots & a_n + b_n c_n \end{vmatrix}_{n+1} \xrightarrow[i=1, \dots, n]{r_{i+1}-b_i r_1} \begin{vmatrix} 1 & c_1 & c_2 & \cdots & c_n \\ -b_1 & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ -b_2 & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -b_n & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & c_1 & c_2 & \cdots & c_n \\ -1 & -b_1 & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ -1 & -b_2 & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & -b_n & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \end{vmatrix}_{n+2} \xrightarrow[j=1, \dots, n]{c_{j+2}+a_j c_1} \begin{vmatrix} 1 & 0 & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ 0 & 1 & c_1 & c_2 & \cdots & c_n \\ -1 & -b_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & -b_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & -b_n & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{vmatrix} \xrightarrow[n \geq 3]{\text{Laplace}} 0.$$

法二: 由行列式的乘法规则, 并注意到 $n \geq 3$, 得

$$D = \begin{vmatrix} 1 & b_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & b_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & b_n & 0 & \cdots & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ c_1 & c_2 & \cdots & c_n \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{vmatrix} = 0.$$

例 9.1.18 (2017 中国科学院大学). 计算行列式

$$D = \begin{vmatrix} 1-a_1 & a_2 & & & \\ -1 & 1-a_2 & a_3 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -1 & 1-a_{n-1} & a_n \\ & & & -1 & 1-a_n \end{vmatrix}.$$

利用升阶法, 考虑 $n+1$ 阶行列式

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & a_1 & & & \\ -1 & 1-a_1 & a_2 & & \\ & -1 & 1-a_2 & a_3 & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & -1 & 1-a_{n-1} \\ & & & & -1 & a_n \\ & & & & & 1-a_n \end{vmatrix}_{n+1} \xrightarrow[r_{i+1}+r_i]{i=1, \dots, n} 1$$

另一方面, 将 Δ 按第一行展开, 得 $\Delta = D + a_1 D'$, 即 $D = 1 - a_1 D'$, 其中 D' 是 Δ 右下角的 $n-1$ 阶子式, 由此递推, 可得

$$D = 1 - a_1 + a_1 a_2 - a_1 a_2 a_3 + \cdots + (-1)^n a_1 a_2 \cdots a_n.$$

9.1.4 抽象行列式的计算

定理 9.1.10 (行列式的乘法公式). $|kA| = k^n |A|$.

例 9.1.19 (2006 数一). 设矩阵 $A = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 2 \end{pmatrix}$, E 为 2 阶单位矩阵, 矩阵 B 满足 $BA = B + 2E$, 求 $|B|$.

由 $BA = B + 2E$ 得 $B(A - E) = 2E$, 两边取行列式, 有

$$|B| \cdot |A - E| = |2E| = 4$$

因为 $|A - E| = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix} = 2$, 所以 $|B| = 2$.

例 9.1.20. 已知 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta, \gamma$ 均为 4 维列向量, 又 $A = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta)$, $B = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \gamma)$, 若 $|A| = 3, |B| = 2$, 求 $|A + 2B|$.

$$|A + 2B| = |3\alpha_1, 3\alpha_2, 3\alpha_3, \beta + 2\gamma| = 3^3 |\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta + 2\gamma| = 3^3 (|\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta| + 2|\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \gamma|) = 27 \times 7 = 187.$$

9.2 Vandermonde 行列式与代数余子式

9.2.1 Vandermonde 行列式计算

定理 9.2.1. n 阶 Vandermonde 行列式为

$$D_n = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_n^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_1^{n-1} & x_2^{n-1} & \cdots & x_n^{n-1} \end{vmatrix} = \prod_{1 \leq j < i \leq n} (x_i - x_j).$$

例 9.2.1. 计算下列行列式:

$$(1) D_{n+1} = \begin{vmatrix} a^n & (a-1)^n & \cdots & (a-n)^n \\ a^{n-1} & (a-1)^{n-1} & \cdots & (a-n)^{n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a & a-1 & \cdots & a-n \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{vmatrix} \quad (2) D_{n-1} = \begin{vmatrix} 2^n - 2 & 2^{n-1} - 2 & \cdots & 2^3 - 2 & 2 \\ 3^n - 3 & 3^{n-1} - 3 & \cdots & 3^3 - 3 & 6 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ n^n - n & n^{n-1} - n & \cdots & n^3 - n & n^2 - n \end{vmatrix}.$$

(1) 将 D_{n+1} 的第 $n+1$ 行依次与第 $n, n-1, \dots, 1$ 行互换, 再将新的行列式的第 $n+1$ 行依次与第 $n, n-1, \dots, 2$ 行互换, 如此下去, 总共经过 $n+(n+1)+\dots+2+1 = \frac{n(n+1)}{2}$ 次行与行的互换, 最后得 Vandermonde 行列式

$$\begin{aligned} D_{n+1} &= (-1)^{\frac{n(n+1)}{2}} \begin{vmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ a & a-1 & \cdots & a-n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a^{n-1} & (a-1)^{n-1} & \cdots & (a-n)^{n-1} \\ a^n & (a-1)^n & \cdots & (a-n)^n \end{vmatrix} = (-1)^{\frac{n(n+1)}{2}} \prod_{0 \leq j < i \leq n} [(a-i)-(a-j)] \\ &= \prod_{0 \leq j < i \leq n} (i-j) = \prod_{k=1}^n k!. \end{aligned}$$

(2) 利用升阶法, 将 D 添上一行一列, 然后将第一行的 i 倍加到后面各行, 再将第 j 列与后面的 $n-j$ 列逐次交换, $j=2, 3, \dots, n-1$, 化为 Vandermonde 行列式,

$$\begin{aligned} D &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 2^n - 2 & 2^{n-1} - 2 & \cdots & 2^3 - 2 & 2 \\ 0 & 3^n - 3 & 3^{n-1} - 3 & \cdots & 3^3 - 3 & 6 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & n^n - n & n^{n-1} - n & \cdots & n^3 & n^2 - n \end{vmatrix}_n = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 2 & 2^n & 2^{n-1} & \cdots & 2^3 & 2^2 \\ 3 & 3^n & 3^{n-1} & \cdots & 3^3 & 3^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ n & n^n & n^{n-1} & \cdots & n^3 & n^2 \end{vmatrix}_{\substack{r_i + ir_1 \\ i=2, \dots, n}} \\ &= n! \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 1 & 2^{n-1} & 2^{n-2} & \cdots & 2^2 & 2^1 \\ 1 & 3^{n-1} & 3^{n-2} & \cdots & 3^2 & 3^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & n^{n-1} & n^{n-2} & \cdots & n^2 & n^1 \end{vmatrix} = n!(-1)^{\frac{(n-2)(n-1)}{2}} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2^2 & \cdots & 2^{n-2} & 2^{n-1} \\ 1 & 3 & 3^2 & \cdots & 3^{n-2} & 3^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & n & n^2 & \cdots & n^{n-2} & n^{n-1} \end{vmatrix} \\ &= (-1)^{\frac{n^2+n+2}{2}} \prod_{1 \leq j < i \leq n+1} (i-j). \end{aligned}$$

例 9.2.2. 计算下列行列式:

$$(1) D_n = \begin{vmatrix} 1 & a_1 & a_1^2 & \cdots & a_1^{n-2} & a_1^{n-1} + S/a_1 \\ 1 & a_2 & a_2^2 & \cdots & a_2^{n-2} & a_2^{n-1} + S/a_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & a_n & a_n^2 & \cdots & a_n^{n-2} & a_n^{n-1} + S/a_n \end{vmatrix}. \quad (2) D = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^n \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^n \\ 0 & -2 & -2 & \cdots & -2 \end{vmatrix}.$$

其中 $S = \sum_{i=1}^n a_i$, 且 $a_i \neq 0$.

(1) 先拆项, 再利用 Vandermonde 行列式计算,

$$\begin{aligned} D_n &= \begin{vmatrix} 1 & a_1 & a_1^2 & \cdots & a_1^{n-2} & a_1^{n-1} \\ 1 & a_2 & a_2^2 & \cdots & a_2^{n-2} & a_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & a_n & a_n^2 & \cdots & a_n^{n-2} & a_n^{n-1} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & a_1 & a_1^2 & \cdots & a_1^{n-2} & S/a_1 \\ 1 & a_2 & a_2^2 & \cdots & a_2^{n-2} & S/a_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & a_n & a_n^2 & \cdots & a_n^{n-2} & S/a_n \end{vmatrix} \\ &= \prod_{1 \leq j < i \leq n} (a_i - a_j) + \frac{S}{\prod_{i=1}^n a_i} \begin{vmatrix} a_1 & a_1^2 & \cdots & a_1^{n-2} & a_1^{n-1} & 1 \\ a_2 & a_2^2 & \cdots & a_2^{n-2} & a_2^{n-1} & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & a_n^2 & \cdots & a_n^{n-2} & a_n^{n-1} & 1 \end{vmatrix} \\ &= \prod_{1 \leq j < i \leq n} (a_i - a_j) + (-1)^{n-1} \frac{S}{\prod_{i=1}^n a_i} \begin{vmatrix} 1 & a_1 & a_1^2 & \cdots & a_1^{n-2} & a_1^{n-1} \\ 1 & a_2 & a_2^2 & \cdots & a_2^{n-2} & a_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & a_n & a_n^2 & \cdots & a_n^{n-2} & a_n^{n-1} \end{vmatrix} \end{aligned}$$

$$= \left[1 + (-1)^{n-1} \frac{S}{\prod_{i=1}^n a_i} \right] \prod_{1 \leq j < i \leq n} (x_i - x_j).$$

(2) 先拆项, 再利用 Vandermonde 行列式计算,

$$\begin{aligned} D &= \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^n \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^n \\ -2 & -2 & -2 & \cdots & -2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^n \\ 0 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^n \\ 2 & -2 & -2 & \cdots & -2 \end{vmatrix} \\ &= -2 \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^n \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{vmatrix} + (-1)^n 2 \prod_{i=1}^n \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{n-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n-1} & x_{n-1}^2 & \cdots & x_{n-1}^{n-1} \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^{n-1} \end{vmatrix} \\ &= -2 \prod_{i=1}^n (1 - x_i) \prod_{1 \leq j < i \leq n} (x_i - x_j) + (-1)^n 2 \prod_{i=1}^n x_i \prod_{1 \leq j < i \leq n} (x_i - x_j) \\ &= 2 \left[- \prod_{i=1}^n (1 - x_i) + (-1)^n \prod_{i=1}^n x_i \right] \prod_{1 \leq j < i \leq n} (x_i - x_j). \end{aligned}$$

9.2.2 方幂指数跳跃

例 9.2.3 (2006 山东大学). 计算 n 阶行列式

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_n^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_1^{n-2} & x_2^{n-2} & \cdots & x_n^{n-2} \\ x_1^n & x_2^n & \cdots & x_n^n \end{vmatrix}.$$

在 D 中增加一行一列, 凑成 $n+1$ 阶 Vandermonde 行列式:

$$D_{n+1} = \left| \begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n & y \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_n^2 & y^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_1^{n-2} & x_2^{n-2} & \cdots & x_n^{n-2} & y^{n-2} \\ x_1^n & x_2^n & \cdots & x_n^n & y^n \end{array} \right| = \prod_{k=1}^n (y - x_k) \prod_{1 \leq j < i \leq n} (x_i - x_j)$$

这是关于变量 y 的恒等式, 一方面, 将上式左边 D_{n+1} 按第 D_{n+1} 列展开, 得 y 的 n 次多项式:

$$D_{n+1} = A_{1,n+1} + yA_{2,n+1} + \cdots + y^{n-1}A_{n,n+1} + y^nA_{n+1,n+1}$$

其中 $A_{k,n+1}$ 是 D_{n+1} 的 $(k, n+1)$ 元的代数余子式 ($1 \leq k \leq n+1$), 且 y^{n-1} 的系数为

$$A_{n,n+1} = (-1)^{n+n+1}D = -D$$

另一方面, 对于 D_{n+1} 的右边, 因为

$$\prod_{k=1}^n (y - x_k) = y^n - \sum_{k=1}^n x_k y^{n-1} + \cdots + (-1)^n \prod_{k=1}^n x_k$$

所以, y^{n-1} 的系数为 $-\sum_{k=1}^n x_k \prod_{1 \leq j < i \leq n} (x_i - x_j)$, 因此, 有

$$D = \sum_{k=1}^n x_k \prod_{1 \leq j < i \leq n} (x_i - x_j).$$

9.2.3 代数余子式问题

定义 9.2.1. 在 n 阶行列式 $D = |a_{ij}|$ 中, 去掉元素 a_{ij} 所在的第 i 行和第 j 列后, 余下的 $n-1$ 阶行列式, 称为 a_{ij} 的余子式, 记为 M_{ij} .

定义 9.2.2. 称 $A_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij}$ 为 a_{ij} 的代数余子式.

定义 9.2.3. 在 n 阶行列式 $D = |a_{ij}|$ 中, 任意选定 k 行 k 列 ($1 \leq k \leq n$), 位于这些行列交叉处的 k^2 个元素, 按原来顺序构成一个 k 阶行列式, 称为 D 的一个 k 阶子式.

定理 9.2.2. 行列式等于它的任一行 (列) 的各元素与其对应的代数余子式乘积之和, 即按第 i 行展开, $D = a_{i1}A_{i1} + a_{i2}A_{i2} + \cdots + a_{in}A_{in}$ ($i = 1, 2, \dots, n$); 按第 j 列展开, $D = a_{1j}A_{1j} + a_{2j}A_{2j} + \cdots + a_{nj}A_{nj}$ ($j = 1, 2, \dots, n$).

定理 9.2.3. 行列式某一行 (列) 的元素与另一行 (列) 的对应元素的代数余子式乘积之和等于零, 即

$$a_{i1}A_{j1} + a_{i2}A_{j2} + \cdots + a_{in}A_{jn} = 0, i \neq j$$

或

$$a_{1i}A_{1j} + a_{2i}A_{2j} + \cdots + a_{ni}A_{nj} = 0, i \neq j.$$

例 9.2.4. 设四阶矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 1 & 8 \\ -2 & 1 & 4 & -7 \\ 3 & 0 & 5 & -9 \\ a & b & c & d \end{pmatrix}$$

而 A_{ij} 是 \mathbf{A} 的 (i, j) 元的代数余子式 ($i, j = 1, 2, 3, 4$), 试计算

$$(1) 2A_{14} - 2A_{24} + 3A_{34} - 3A_{44};$$

$$(2) A_{41} + A_{42} + A_{43} + A_{44}.$$

(1) 由于 $a_{11}A_{14} + a_{21}A_{24} + a_{31}A_{34} + a_{41}A_{44} = 0$, 所以

$$2A_{14} - 2A_{24} + 3A_{34} + a_{44} = 0 \Rightarrow 2A_{14} - 2A_{24} + 3A_{34} - 3A_{44} = -(a+3)A_{44}$$

$$\text{且 } A_{44} = (-1)^{4+4} \begin{vmatrix} 2 & 0 & 1 \\ -2 & 1 & 4 \\ 3 & 0 & 5 \end{vmatrix} = 7, \text{ 所以 } 2A_{14} - 2A_{24} + 3A_{34} - 3A_{44} = -7(a+3).$$

(2) 构造一个新矩阵

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 1 & 8 \\ -2 & 1 & 4 & -7 \\ 3 & 0 & 5 & -9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

易知 $|\mathbf{B}| = -217$, 所以 $A_{41} + A_{42} + A_{43} + A_{44} = -217$.

例 9.2.5 (2010 云南大学). 设四阶行列式

$$D = \begin{vmatrix} 3 & -5 & 2 & d \\ a & b & c & d \\ a^2 & b^2 & c^2 & d^2 \\ a^4 & b^4 & c^4 & d^4 \end{vmatrix}$$

计算 $A_{11} + A_{12} + A_{13} + A_{14}$, 其中 A_{ij} 是元素 a_{ij} 的代数余子式.

由于 A_{ij} 与 a_{ij} 的值无关, 现构造一个新的行列式

$$D_1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ a & b & c & d \\ a^2 & b^2 & c^2 & d^2 \\ a^4 & b^4 & c^4 & d^4 \end{vmatrix}$$

由例 9.2.3 知 $D_1 = (a+b+c+d)(a-b)(a-c)(a-d)(b-c)(b-d)(c-d)$, 将 D_1 按第一行展开即得

$$A_{11} + A_{12} + A_{13} + A_{14} = (a+b+c+d)(a-b)(a-c)(a-d)(b-c)(b-d)(c-d).$$

例 9.2.6. 设 3 阶矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{3 \times 3}$ 满足 $\mathbf{A}^\top = k\mathbf{A}^*$ ($k > 0$), 若 $a_{11} = a_{12} = a_{13} = c > 0$, 求 c .

对 $\mathbf{A}^\top = k\mathbf{A}^*$ 两边取行列式, 则

$$\det(\mathbf{A}^\top) = \det(k\mathbf{A}^*) \Rightarrow \det \mathbf{A} = k^n (\det \mathbf{A})^{n-1} = k^3 (\det \mathbf{A})^2 \Rightarrow \det \mathbf{A} = \frac{1}{k^3}$$

又因为 $\mathbf{A}^\top = k\mathbf{A}^*$, 所以 $a_{ij} = kA_{ij}$, 其中 A_{ij} 是 a_{ij} 对应的代数余子式, 那么

$$\det \mathbf{A} = a_{11}A_{11} + a_{12}A_{12} + a_{13}A_{13} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^3 a_{1i}^2 = \frac{3c^2}{k}$$

于是 $\frac{1}{k^3} = \frac{3c^2}{k} \Rightarrow c = \frac{\sqrt{3}}{3k}$.

第 10 章

矩阵

“我有一个对这个命题的十分美妙的证明，

这里空白太小，我写不下了。”

——费马

矩阵是一个按照行和列排列的矩形阵列，由数值或符号组成。它是线性代数中的基本概念，广泛应用于数学、工程、物理学、计算机科学等领域。

矩阵可以表示一组数据或一组方程的系数。它们在解线性方程组、计算向量的线性变换、描述几何变换、图像处理、网络分析等方面非常有用。

10.1 矩阵的基本运算

10.1.1 矩阵的概念

定义 10.1.1 (矩阵). 由 $m \times n$ 个数 a_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) 按一定次序排成的 m 行 n 列的矩形数表

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

称为 $m \times n$ 矩阵 (m 行 n 列矩阵)， a_{ij} 叫做矩阵的元素，矩阵可简记为

$$\mathbf{A} = (a_{ij})_{m \times n} \text{ 或 } \mathbf{A} = (a_{ij}).$$

当 $m = n$ 时，即矩阵的行数与列数相同时，称 \mathbf{A} 为 n 阶方阵；当 $m = 1$ 时，矩阵只有一行，称为行矩阵，记为

$$\mathbf{A} = (a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n})$$

这样的行矩阵也称为 n 维行向量; 当 $n = 1$ 时, 矩阵只有一列, 称为列矩阵, 记为

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix}$$

这样的列矩阵也称为 m 维列向量.

定义 10.1.2 (矩阵的负). 矩阵 \mathbf{A} 中各元素变号得到的矩阵叫做 \mathbf{A} 的负矩阵, 记作 $-\mathbf{A}$, 即

$$-\mathbf{A} = (-a_{ij})_{m \times n}.$$

定义 10.1.3 (零矩阵). 如果矩阵 \mathbf{A} 的所有元素都是 0, 即

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix},$$

则 \mathbf{A} 称为零矩阵, 记为 \mathbf{O} .

定义 10.1.4 (单位矩阵). 主对角线上元素都是 1, 其余元素均为零的方阵称为单位矩阵, 记为 \mathbf{E} (或 \mathbf{I}), 即

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}.$$

定义 10.1.5 (数量矩阵). 主对角线上元素为任意常数, 而主对角线外的元素均为零的矩阵. 若对角矩阵的主对角线上的元素相等, 则称为数量矩阵.

定义 10.1.6 (三角形矩阵). 主对角线下方元素全为零的方阵称为上三角形矩阵; 主对角线上方元素全为零的方阵称为下三角形矩阵; 上、下三角形矩阵统称为三角形矩阵.

定义 10.1.7 (矩阵的转置). 把矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{m \times n}$ 的行列互换而得到的矩阵 $(a_{ji})_{n \times m}$ 称为 \mathbf{A} 的转置矩阵, 记为 \mathbf{A}^\top (或 \mathbf{A}').

定义 10.1.8 (对称矩阵). 如果 n 阶方阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})$ 满足 $a_{ij} = a_{ji}$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$), 即 $\mathbf{A}^\top = \mathbf{A}$, 则称 \mathbf{A} 为对称矩阵.

定义 10.1.9 (反对称矩阵). 如果 n 阶方阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})$ 满足 $a_{ij} = -a_{ji}$ ($i \neq j$), $a_{ii} = 0$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$), 即 $\mathbf{A}^\top = -\mathbf{A}$, 则称 \mathbf{A} 为反对称矩阵.

定理 10.1.1 (方阵的对称表达). 任意 n 阶方阵都可以表示成一个对称方阵与一个反对称方阵的和.

证 设 A 为任意 n 阶方阵, 令 $B = \frac{1}{2}(A + A^\top)$, $C = \frac{1}{2}(A - A^\top)$, 则

$$B^\top = \frac{1}{2}(A + A^\top)^\top = \frac{1}{2}(A + A^\top) = B, C^\top = \frac{1}{2}(A - A^\top)^\top = \frac{1}{2}(A^\top - A) = -C$$

即 B 为对称矩阵, C 为反对称矩阵, 显然 $A = B + C$.

定义 10.1.10 (正交矩阵). 对方阵 A , 如果有 $A^\top A = AA^\top = E$, 则称 A 为正交矩阵.

定理 10.1.2 (正交矩阵的行列式). 若方阵 A 为正交矩阵, 那么 $|A| = \pm 1$.

证 $1 = \det E = \det(A^\top A) = \det(A^\top) \det A = \det^2 A \Rightarrow \det A = \pm 1$.

例 10.1.1. 已知 A 是 4 阶正交矩阵且 $|A| < 0$, B 是 4 阶矩阵, 若 $|B - A| = 5$, 求 $|E - AB^\top|$.

因为 $AA^\top = A^\top A = E$, 所以 $|A| = \pm 1$, 又 $|A| < 0$, 即 $|A| = -1$,

$$|E - AB^\top| = |AA^\top - AB^\top| = |A|(A - B)^\top = -|A - B| = -|-(B - A)| = -(-1)^4|B - A| = -5.$$

定义 10.1.11 (幂零矩阵). 对方阵 A , 如果存在正整数 m , 使 $A^m = 0$, 则称 A 为幂零矩阵.

定义 10.1.12 (幂等矩阵). 满足 $A^2 = A$ 的方阵 A 称为幂等矩阵.

定义 10.1.13 (对合矩阵). 满足 $A^2 = E$ 的方阵 A 称为对合矩阵.

定义 10.1.14 (方阵的行列式). 方阵 A 的元素按原来的位置构成的行列式, 称为方阵 A 的行列式, 记为 $|A|$.

例 10.1.2. 设矩阵 A 是 3 阶方阵, 且

$$|A - 2E| = |A - 3E| = |A - 4E| = 3$$

求 $|A - E|$.

设 $f(x) = |A - xE| = \begin{vmatrix} a_{11} - x & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} - x & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} - x \end{vmatrix}$, 那么 $f(x)$ 一定是以 x 为变量的首项系数为 -1 的三次多项式, 又

$$|A - 2E| = |A - 3E| = |A - 4E| = 3$$

所以 $f(x) = -(x - 2)(x - 3)(x - 4) + 3$, 那么 $|A - E| = f(1) = 9$.

定义 10.1.15 (奇异矩阵与非奇异矩阵). 若 $|A| = 0$, 称 A 为奇异矩阵, 否则称为非奇异矩阵.

定义 10.1.16 (矩阵的迹). 设有 n 阶方阵 A , 那么 A 的迹定义为 $\text{tr} A = \sum_{k=1}^n a_{kk}$.

定理 10.1.3 (迹的相关性质). 又设 $B \in M_n(K)$, $\lambda \in K$, 则

$$\begin{array}{ll} (1) \text{tr}(A + B) = \text{tr}(A) + \text{tr}(B) & (2) \text{tr}(A^\top) = \text{tr}(A) \\ \hline (3) \text{tr}(AB) = \text{tr}(BA) & (4) \text{tr}(\lambda A) = \lambda \text{tr}(A) \end{array}$$

10.1.2 矩阵的运算

矩阵的运算公式

关于矩阵的加法运算公式

$$\begin{array}{ll} (1) \quad \mathbf{A} + \mathbf{B} = \mathbf{B} + \mathbf{A} & (2) \quad (\mathbf{A} + \mathbf{B}) + \mathbf{C} = \mathbf{A} + (\mathbf{B} + \mathbf{C}) \\ (3) \quad \mathbf{A} + (-\mathbf{A}) = \mathbf{0} & (4) \quad (\mathbf{A} - \mathbf{B}) = \mathbf{A} + (-\mathbf{B}) \end{array}$$

关于数乘运算的公式

$$\begin{array}{ll} (5) \quad (kl)\mathbf{A} = k(l\mathbf{A}) & (6) \quad (k+l)\mathbf{A} = k\mathbf{A} + l\mathbf{A} \\ (7) \quad k(\mathbf{A} + \mathbf{B}) = k\mathbf{A} + k\mathbf{B} & \end{array}$$

关于矩阵乘法运算的公式

$$\begin{array}{ll} (8) \quad (\mathbf{AB})\mathbf{C} = \mathbf{A}(\mathbf{BC}) & (9) \quad k(\mathbf{AB}) = (k\mathbf{A})\mathbf{B} = \mathbf{A}(k\mathbf{B}) \\ (10) \quad \mathbf{A}(\mathbf{B} + \mathbf{C}) = \mathbf{AB} + \mathbf{AC} & (11) \quad (\mathbf{B} + \mathbf{C})\mathbf{A} = \mathbf{BA} + \mathbf{CA} \\ (12) \quad \mathbf{EA} = \mathbf{AE} = \mathbf{A} & (13) \quad (\lambda\mathbf{E})\mathbf{A} = \lambda\mathbf{A} = \mathbf{A}(\lambda\mathbf{E}) \\ (14) \quad \mathbf{A}^k \mathbf{A}^l = \mathbf{A}^{k+l} & (15) \quad (\mathbf{A}^k)^l = \mathbf{A}^{kl} \end{array}$$

关于矩阵转置运算的公式

$$\begin{array}{ll} (16) \quad (\mathbf{A}^\top)^\top = \mathbf{A} & (17) \quad (\mathbf{A} + \mathbf{B})^\top = \mathbf{A}^\top + \mathbf{B}^\top \\ (18) \quad (k\mathbf{A})^\top = k\mathbf{A}^\top & (19) \quad (\mathbf{AB})^\top = \mathbf{B}^\top \mathbf{A}^\top \end{array}$$

关于方阵的行列式的公式, 若 \mathbf{A}, \mathbf{B} 是 n 阶方阵, 则

$$\begin{array}{ll} (20) \quad |\mathbf{A}^\top| = |\mathbf{A}| & (21) \quad |\lambda\mathbf{A}| = \lambda^n |\mathbf{A}| \\ (22) \quad |\mathbf{AB}| = |\mathbf{A}||\mathbf{B}| & (23) \quad |\mathbf{AB}| = |\mathbf{BA}| \end{array}$$

需要注意的事项:

- (1) 矩阵的乘法一般不满足交换律, 即 \mathbf{AB} 有意义, 但 \mathbf{BA} 不一定有意义; 即使 \mathbf{AB} 和 \mathbf{BA} 都有意义, 两者也不一定相等.
- (2) 两个非零矩阵相乘, 可能是零矩阵, 从而不能从 $\mathbf{AB} = \mathbf{0}$ 推出 $\mathbf{A} = \mathbf{0}$ 或 $\mathbf{B} = \mathbf{0}$.
- (3) 矩阵的乘法一般不满足消去律, 即不能从 $\mathbf{AC} = \mathbf{BC}$ 推出 $\mathbf{A} = \mathbf{B}$.

定义 10.1.17 (矩阵相等). 设

$$\mathbf{A} = (a_{ij})_{m \times n}, \mathbf{B} = (b_{ij})_{m \times n}$$

如果 $a_{ij} = b_{ij}$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$), 则称矩阵 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 相等, 记作 $\mathbf{A} = \mathbf{B}$.

定义 10.1.18 (矩阵加减). 设

$$\mathbf{A} = (a_{ij})_{m \times n}, \mathbf{B} = (b_{ij})_{m \times n}, \mathbf{C} = (c_{ij})_{m \times n}$$

其中 $c_{ij} = a_{ij} \pm b_{ij}$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$), 则称 C 为矩阵 A 与 B 的和 (或差), 记为 $C = A \pm B$.

定义 10.1.19 (矩阵数乘). 设 k 为一个常数,

$$A = (a_{ij})_{m \times n}, C = (c_{ij})_{m \times n}$$

其中 $c_{ij} = ka_{ij}$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$), 则称矩阵 C 为数 k 与矩阵 A 的数量乘积, 简称数乘, 记为 kA .

定义 10.1.20 (矩阵乘法). 设 $A = (a_{ij})_{m \times s}, B = (b_{ij})_{s \times n}, C = (c_{ij})_{m \times n}$, 其中

$$c_{ij} = \sum_{l=1}^s a_{il}b_{lj} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

则称矩阵 C 为矩阵 A 与 B 的乘积, 记为 AB , 即 $C = AB$.

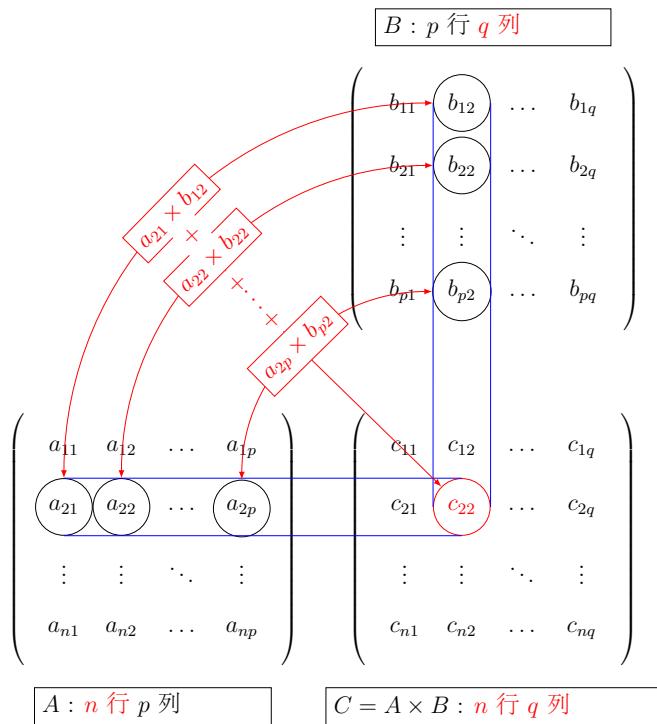


图 10.1.1

例 10.1.3. 设 $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 \end{pmatrix}$, 求 AB 和 CA .

$$AB = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}b_1 & a_{12}b_2 \\ a_{21}b_1 & a_{22}b_2 \\ a_{31}b_1 & a_{32}b_2 \end{pmatrix}; \text{ 同理 } CA = \begin{pmatrix} c_1a_{11} & c_1a_{12} \\ c_2a_{21} & c_2a_{22} \\ c_3a_{31} & c_3a_{32} \end{pmatrix}$$

例 10.1.4. 设 A 是 4 阶方阵, B 是 5 阶方阵, 且 $|A| = 2, |B| = -2$, 求 $|-|A|B|$ 与 $|-|B|A|$.

$$|-|A|B| = |-2B| = (-2)^5|B| = 64, \quad |-|B|A| = |2A| = 2^4|A| = 32.$$

例 10.1.5. 设 A, B 均为 3 阶矩阵, 满足 $AB + 2A + B + E = O$, 若 $|B| = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}$, 求 $|A + E|$.

对 $AB + 2A + B + 2E$ 使用多项式除法, 得

$$AB + 2A + B + 2E = (A + E)(B + 2E) = E \Rightarrow |A + E| = \frac{1}{|B + 2E|} = \frac{1}{30}.$$

例 10.1.6. (2021 数二) 已知矩阵 $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -5 \end{pmatrix}$, 若存在下三角可逆矩阵 P 和上三角可逆矩阵 Q , 使 PAQ 为对角矩阵, 求 P 和 Q .

对 A 做初等行变换, 化为上三角矩阵 B ,

$$\begin{aligned} (A : E) &= \left(\begin{array}{ccc|cc} 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 2 & -5 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{r_2 - 2r_1} \left(\begin{array}{ccc|cc} 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 3 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & -6 & 1 & 0 & 1 \end{array} \right) \\ &\xrightarrow{r_3 + 2r_2} \left(\begin{array}{ccc|cc} 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 3 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -3 & -3 & 2 & 1 \end{array} \right) \rightarrow \left(\begin{array}{ccc|cc} 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -3 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3 & 2 & 1 \end{array} \right) = (B : P) \end{aligned}$$

所以 $P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & -1 & 0 \\ -3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$, 再对 B 作列变换 (或 B^\top 作行变换) 化为对角矩阵, 可求得 Q (或 Q^\top)

$$\begin{pmatrix} B \\ E \end{pmatrix} = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & -1 & \\ 0 & 1 & -3 & \\ 0 & 0 & 0 & \\ \hline 1 & 0 & 0 & \\ 0 & 1 & 0 & \\ 0 & 0 & 1 & \end{array} \right) \xrightarrow{c_3 + c_1} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & \\ 0 & 1 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & \\ \hline 1 & 0 & 1 & \\ 0 & 1 & 3 & \\ 0 & 0 & 1 & \end{array} \right)$$

可得 $Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$. 或

$$(B^\top : E) = \left(\begin{array}{ccc|cc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -3 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{r_3 + 3r_2} \left(\begin{array}{ccc|cc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 3 & 1 \end{array} \right)$$

得 $Q^\top = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 1 \end{pmatrix}$.

10.1.3 Carlson 不等式及其应用

定理 10.1.4 (Carlson 不等式). 对于 $n \times m$ 矩阵

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{pmatrix}$$

其中 $a_{ij} \geq 0$ ($i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$), 则

$$\left[\prod_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} \right) \right]^{\frac{1}{m}} \geq \sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^m a_{ij} \right)^{\frac{1}{m}}$$

其中, 等号成立的充要条件是至少有一列数都是 0 或所有行中的数对应成比例.

证 记 $A_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}$ ($j = 1, 2, \dots, m$), $G_j = \prod_{i=1}^n a_{ij}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 若某个 $A_j = 0$, 则由 $a_{ij} \geq 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 得 $a_{1j} = a_{2j} = \dots = a_{nj} = 0$

此时, $G_1 = G_2 = \dots = G_n = 0$, 从而

$$\left[\prod_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} \right) \right]^{\frac{1}{m}} = \sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^m a_{ij} \right)^{\frac{1}{m}}$$

若所有 $A_j > 0$, 由均值不等式得

$$\frac{a_{i1}}{A_1} + \frac{a_{i2}}{A_2} + \dots + \frac{a_{im}}{A_m} \geq m \left(\frac{\prod_{j=1}^m a_{ij}}{\prod_{j=1}^m A_j} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

将以上 n 个不等式相加得

$$m \geq m \sum_{i=1}^n \left(\frac{\prod_{j=1}^m a_{ij}}{\prod_{j=1}^m A_j} \right)^{\frac{1}{m}} = m \frac{\sum_{i=1}^n G_i^{\frac{1}{m}}}{\left(\prod_{j=1}^m A_j \right)^{\frac{1}{m}}}$$

等号成立的充要条件是至少有一列数都是 0 或 $\frac{a_{i1}}{A_1} = \frac{a_{i2}}{A_2} = \dots = \frac{a_{im}}{A_m}$.

例 10.1.7. 已知 $a, b, c > 0$, 证明:

$$(a^2 + ab + b^2)(b^2 + bc + c^2)(c^2 + ca + a^2) \geq (ab + bc + ca)^3.$$

证 构造 3×3 矩阵

$$\begin{pmatrix} a^2 & b^2 & c^2 \\ ab & b^2 & a^2 \\ b^2 & bc & c^2 \end{pmatrix}$$

由 Carlson 不等式得证.

例 10.1.8. 已知 $a, b, c > 0$, $a^2 + b^2 + c^2 = 14$, 求证: $a^5 + \frac{b^5}{8} + \frac{c^5}{27} \geq 14$.

证 构造 3×5 矩阵

$$\begin{pmatrix} a^5 & a^5 & 1 & 1 & 1 \\ b^5 & b^5 & 4 & 4 & 4 \\ \frac{b^5}{8} & \frac{b^5}{8} & 9 & 9 & 9 \\ \frac{c^5}{27} & \frac{c^5}{27} & 9 & 9 & 9 \end{pmatrix}$$

由 Carlson 不等式得,

$$\begin{aligned} \left[\left(a^5 + \frac{b^5}{8} + \frac{c^5}{27} \right)^2 (1+4+9)^3 \right]^{\frac{1}{5}} &\geq (a^5 \cdot a^5 \cdot 1^3)^{\frac{1}{5}} + \left(\frac{b^5}{8} \cdot \frac{b^5}{8} \cdot 4^3 \right)^{\frac{1}{5}} + \left(\frac{c^5}{27} \cdot \frac{c^5}{27} \cdot 9^3 \right)^{\frac{1}{5}} \\ \left[\left(a^5 + \frac{b^5}{8} + \frac{c^5}{27} \right)^2 14^3 \right]^{\frac{1}{5}} &\geq a^2 + b^2 + c^2 = 14 \end{aligned}$$

整理得证 $a^5 + \frac{b^5}{8} + \frac{c^5}{27} \geq 14$.

例 10.1.9. 已知 $a_i > 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$), $n \geq 2$, 且 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$, 证明: $\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2-a_i} \geq \frac{n}{2n-1}$.

证 原不等式等价为

$$\sum_{i=1}^n \frac{2}{2-a_i} \geq \frac{2n^2}{2n-1}$$

为此, 构造 $n \times 2$ 矩阵

$$\begin{pmatrix} \frac{2}{2-a_1} & 2-a_1 \\ \frac{2}{2-a_2} & 2-a_2 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{2}{2-a_n} & 2-a_n \end{pmatrix}$$

由 Carlson 不等式得,

$$\left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{2}{2-a_i} \right) \sum_{i=1}^n (2-a_i) \right]^{\frac{1}{2}} \geq \sqrt{2n} \Rightarrow \left(\sum_{i=1}^n \frac{2}{2-a_i} \right) (2n-1) \geq 2n^2$$

整理得证 $\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2-a_i} \geq \frac{n}{2n-1}$.

例 10.1.10. (第 36 届 IMO) 设 $a, b, c > 0$, 且 $abc = 1$, 证明: $\frac{1}{a^3(b+c)} + \frac{1}{b^3(c+a)} + \frac{1}{c^3(a+b)} \geq \frac{3}{2}$.

证 原不等式等价为

$$\frac{b^2c^2}{a(b+c)} + \frac{a^2c^2}{b(c+a)} + \frac{a^2b^2}{c(a+b)}$$

构造 3×2 矩阵

$$\begin{pmatrix} \frac{b^2c^2}{a(b+c)} & a(b+c) \\ \frac{a^2c^2}{b(c+a)} & b(c+a) \\ \frac{a^2b^2}{c(a+b)} & c(a+b) \end{pmatrix}$$

由 Carlson 不等式得,

$$\left\{ \left[\frac{b^2c^2}{a(b+c)} + \frac{a^2c^2}{b(c+a)} + \frac{a^2b^2}{c(a+b)} \right] \cdot 2(ab+bc+ca) \right\}^{\frac{1}{2}} \geq ab+bc+ca$$

$$\frac{b^2c^2}{a(b+c)} + \frac{a^2c^2}{b(c+a)} + \frac{a^2b^2}{c(a+b)} \geq \frac{1}{2}(ab+bc+ca) \geq \frac{3}{2} \sqrt[3]{a^2b^2c^2} = \frac{3}{2}.$$

10.2 伴随矩阵与逆矩阵

10.2.1 伴随矩阵

定义 10.2.1 (伴随矩阵). 设 $A = (a_{ij})$ 是 n 阶方阵 ($n \geq 2$), A 的伴随矩阵 A^* (或 $\text{adj } A$) 定义为

$$A^* = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \cdots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \cdots & A_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix},$$

其中 A_{ij} 为 A 的元素 a_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 的代数余子式.

伴随矩阵具有如下性质:

$$(1) \mathbf{A}\mathbf{A}^* = \mathbf{A}^*\mathbf{A} = |\mathbf{A}|\mathbf{E}$$

$$(2) (\lambda\mathbf{A})^* = \lambda^{n-1}\mathbf{A}^*$$

$$(3) |\mathbf{A}^*| = |\mathbf{A}|^{n-1}$$

$$(4) (\mathbf{A}^*)^\top = (\mathbf{A}^\top)^*$$

$$(5) (\mathbf{AB})^* = \mathbf{B}^*\mathbf{A}^*$$

$$(6) \text{当 } \mathbf{A} \text{ 可逆时, } \mathbf{A}^* = |\mathbf{A}|\mathbf{A}^{-1}$$

$$(7) \text{当 } \mathbf{A} \text{ 可逆时, } (\mathbf{A}^*)^{-1} = \frac{1}{|\mathbf{A}|}\mathbf{A}$$

$$(8) \text{当 } \mathbf{A} \text{ 可逆时, } (\mathbf{A}^*)^{-1} = (\mathbf{A}^{-1})^*$$

$$(9) (\mathbf{A}^*)^* = \begin{cases} |\mathbf{A}|^{n-2}\mathbf{A}, & n > 2 \\ \mathbf{A}, & n = 2 \end{cases}$$

$$(10) \text{rank } \mathbf{A}^* = \begin{cases} n, & \text{rank } \mathbf{A} = n \\ 1, & \text{rank } \mathbf{A} = n - 1 \\ 0, & \text{rank } \mathbf{A} < n - 1 \end{cases}$$

例 10.2.1. 设矩阵 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, 矩阵 \mathbf{B} 满足 $\mathbf{ABA}^* = 2\mathbf{BA}^* + \mathbf{E}$, 求 $|2\mathbf{B}^\top|$.

注意到 $\det \mathbf{A} = 3$, 且 $\mathbf{A}^*\mathbf{A} = |\mathbf{A}|\mathbf{E}$, 对 $\mathbf{ABA}^* = 2\mathbf{BA}^* + \mathbf{E}$, 右乘矩阵 \mathbf{A} , 得

$$3\mathbf{AB} = 6\mathbf{B} + \mathbf{A} \Rightarrow 3(\mathbf{A} - 2\mathbf{E})\mathbf{B} = \mathbf{A} \Rightarrow |3(\mathbf{A} - 2\mathbf{E})\mathbf{B}| = 3 \Rightarrow |\mathbf{B}| = \frac{1}{9|\mathbf{A} - 2\mathbf{E}|}$$

其中 $|\mathbf{A} - 2\mathbf{E}| = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} = 1$, 于是 $\mathbf{B} = \frac{1}{9}\mathbf{A}$, 则 $|2\mathbf{B}^\top| = \frac{8}{9}$.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

例 10.2.2. 求矩阵 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ 的所有代数余子式之和.

记矩阵分块矩阵 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{O}_{2 \times 3} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{O}_{3 \times 2} \end{pmatrix}$, 其中 $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ -1 & 2 \end{pmatrix}$, $\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, 则 $\det \mathbf{B} = 5$, $\det \mathbf{C} = 1$, 那么

$$\mathbf{A}^* = |\mathbf{A}|\mathbf{A}^{-1} = (-1)^{2 \times 3}|\mathbf{B}||\mathbf{C}|\begin{pmatrix} \mathbf{O}_{3 \times 2} & \mathbf{C}^{-1} \\ \mathbf{B}^{-1} & \mathbf{O}_{2 \times 3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 5 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \\ 2 & -3 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

因此矩阵 \mathbf{A} 的所有代数余子式之和为 $5 - 5 + 5 - 5 + 5 + 2 - 3 + 1 + 1 = 6$.

10.2.2 可逆矩阵

可逆矩阵具有如下性质:

(1) 方阵 \mathbf{A} 可逆的充分必要条件是 $|\mathbf{A}| \neq 0$;

(2) 若 \mathbf{A} 可逆, 则 \mathbf{A}^\top 亦可逆, 且 $(\mathbf{A}^\top)^{-1} = (\mathbf{A}^{-1})^\top$;

- (3) 若 A 可逆, 则 A^{-1} 亦可逆, 且 $(A^{-1})^{-1} = A$;
- (4) 若 A 可逆, 数 $\lambda \neq 0$, 则 λA 亦可逆, 且 $(\lambda A)^{-1} = \frac{1}{\lambda} A^{-1}$;
- (5) 若 A 可逆, 则 $|A^{-1}| = |A|^{-1}$;
- (6) 若 A, B 为同阶方阵, 且均可逆, 则 AB 亦可逆, 且 $(AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1}$.

定理 10.2.1 (矩阵逆的和). 设矩阵 A 与 B 均为 n 阶矩阵, 则 $|A^{-1} + B^{-1}| = \frac{|A+B|}{|A| \cdot |B|}$.

$$\text{证 } |A^{-1} + B^{-1}| = |EA^{-1} + B^{-1}E| = |B^{-1}BA^{-1} + B^{-1}AA^{-1}| = |B^{-1}(B+A)A^{-1}| = \frac{|A+B|}{|A| \cdot |B|}.$$

定理 10.2.2 (分块矩阵的逆). 设 A 是 $m \times m$ 可逆矩阵, B 是 $m \times n$ 矩阵, C 是 $n \times m$ 矩阵, D 是 $n \times n$ 可逆矩阵, 则有以下分块矩阵的求逆公式:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} A^{-1} + A^{-1}BWCA^{-1} & -A^{-1}BW \\ -WCA^{-1} & W \end{pmatrix}$$

其中 $W = (D - CA^{-1}B)^{-1}$.

证 为方便叙述, 记 $W = (D - CA^{-1}B)^{-1}$ 设 $F = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 的逆矩阵为 $U = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{pmatrix}$, 其中 U 的分块与 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 分块后满足乘法原则, 则根据可逆矩阵的定义 $FU = E$, 下面直接计算 FU 的分块矩阵的乘积即可,

$$\begin{pmatrix} E_{11} & O \\ O & E_{12} \end{pmatrix} = E = FU = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} AU_{11} + BU_{21} & AU_{12} + BU_{22} \\ CU_{11} + DU_{21} & CU_{12} + DU_{22} \end{pmatrix}$$

所以, 各个矩阵小块分别对应相等得:

$$AU_{11} + BU_{21} = E_{11} \quad (1)$$

$$AU_{12} + BU_{22} = O \quad (2)$$

$$CU_{11} + DU_{21} = O \quad (3)$$

$$CU_{12} + DU_{22} = E_{22} \quad (4)$$

由 (1) 可得: $U_{11} = A^{-1}(E_{11} - BU_{21})$, 代入 (3) 中, 有

$$CA^{-1}(E_{11} - BU_{21}) + DU_{21} = O$$

化简后得: $CA^{-1} + (D - CA^{-1}B)U_{21} = O$, 即

$$U_{21} = -(D - CA^{-1}B)CA^{-1} = -WCA^{-1}$$

由 (4) 可得: $U_{12} = C^{-1}(E_{22} - DU_{22})$, 代入 (2) 中, 有

$$A(C^{-1} - C^{-1}DU_{22}) + BU_{22} = O$$

即

$$\begin{aligned} U_{22} &= -(B - AC^{-1}D)^{-1}AC^{-1} = -(B - AC^{-1}D)^{-1}(CA^{-1})^{-1} = -((CA^{-1})(B - AC^{-1}D))^{-1} \\ &= -(CA^{-1}B - CA^{-1}AC^{-1}D)^{-1} = -(CA^{-1}B - D)^{-1} = (D - CA^{-1}B) = W \end{aligned}$$

由 (2) 可得: $U_{12} = -A^{-1}BU_{22}$ 将 $U_{22} = W$ 代入其中可得: $U_{12} = -A^{-1}BW$, 由 (3) 可得: $U_{11} = A^{-1}(E_{11} - BU_{21})$, 将 $U_{21} = -WCA^{-1}$ 代入其中可得:

$$U_{11} = A^{-1}(E_{11} + BWCA^{-1}) = A^{-1} + A^{-1}BWCA^{-1}$$

综上所述, 即得证.

例 10.2.3. 求矩阵 $A = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 5 \\ 1 & 2 & 7 \\ 3 & 4 & 4 \end{pmatrix}$ 的逆矩阵.

法一：因为 $A^{-1} = \frac{1}{|A|} A^*$, 于是

$$A^{-1} = \frac{1}{\begin{vmatrix} 2 & 3 & 5 \\ 1 & 2 & 7 \\ 3 & 4 & 4 \end{vmatrix}} \begin{pmatrix} \begin{vmatrix} 2 & 7 \\ 4 & 4 \end{vmatrix} & -\begin{vmatrix} 3 & 5 \\ 4 & 4 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} 3 & 5 \\ 2 & 7 \end{vmatrix} \\ -\begin{vmatrix} 1 & 7 \\ 4 & 4 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} 2 & 5 \\ 3 & 4 \end{vmatrix} & -\begin{vmatrix} 2 & 5 \\ 1 & 7 \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{vmatrix} & -\begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 4 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -20 & 8 & 11 \\ 17 & -7 & -9 \\ -2 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

法二：将 $(A : E)$ 初等行变换为 $(E : B)$, 则 $B = A^{-1}$, 于是

$$\begin{aligned} (A : E) &= \begin{pmatrix} 2 & 3 & 5 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 7 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 4 & 4 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\substack{r_1 \leftrightarrow r_2 \\ r_2 - 2r_1 \\ r_3 - 3r_1}} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 7 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -9 & 1 & -2 & 0 \\ 0 & -2 & -17 & 0 & -3 & 1 \end{pmatrix} \\ &\xrightarrow{\substack{r_1 + r_3 \\ r_2 \times (-1) \\ r_3 + 2r_2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -10 & 0 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & 9 & -1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\substack{r_1 + 10r_3 \\ r_2 - 9r_3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -20 & 8 & 11 \\ 0 & 1 & 0 & 17 & -7 & -9 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

于是 $A^{-1} = \begin{pmatrix} -20 & 8 & 11 \\ 17 & -7 & -9 \\ -2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$.

法三：设 $M = \begin{pmatrix} A & E \\ -E & O \end{pmatrix}$, 若将 M 的前 n 行施行初等行变换, 将 M 化为分块矩阵 $\begin{pmatrix} B & C \\ O & X \end{pmatrix}$, 那么 $X = A^{-1}$, 则

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} A & E \\ -E & O \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 2 & 3 & 5 & | & E \\ 1 & 2 & 7 & | & E \\ 3 & 4 & 4 & | & O \\ \cdots & \cdots & \cdots & | & \cdots \\ -E & & & | & O \end{pmatrix} \xrightarrow{\substack{r_1 \leftrightarrow r_2 \\ r_2 - 2r_1 \\ r_3 - 3r_1}} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 7 & | & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -9 & | & 1 & -2 & 0 \\ 0 & -2 & -17 & | & 0 & -3 & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & | & \cdots & \cdots & \cdots \\ -E & & & | & O & & \end{pmatrix} \\ &\xrightarrow{\substack{r_1 + r_3 \\ r_2 \times (-1) \\ r_3 + 2r_2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -10 & | & 0 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & 9 & | & -1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & | & -2 & 1 & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & | & \cdots & \cdots & \cdots \\ -E & & & | & O & & \end{pmatrix} \xrightarrow{\substack{r_1 + 10r_3 \\ r_2 - 9r_3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & | & -20 & 8 & 11 \\ 0 & 1 & 0 & | & 17 & -7 & -9 \\ 0 & 0 & 1 & | & -2 & 1 & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & | & \cdots & \cdots & \cdots \\ -E & & & | & O & & \end{pmatrix} \end{aligned}$$

故得 $A^{-1} = \begin{pmatrix} -20 & 8 & 11 \\ 17 & -7 & -9 \\ -2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$.

法四：(该方法仅对三阶矩阵有效) 第一步, 将矩阵前两列复制一份在原矩阵的右侧, 将矩阵前两行复制一份再矩阵的下侧, 再将子矩阵 $\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$ 复制到原矩阵的右下角, 即

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 & 5 \\ 1 & 2 & 7 \\ 3 & 4 & 4 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 3 & 5 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 7 & 1 & 2 \\ 3 & 4 & 4 & 3 & 4 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 3 & 5 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 7 & 1 & 2 \\ 3 & 4 & 4 & 3 & 4 \\ 2 & 3 & 5 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 7 & 1 & 2 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 3 & 5 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 7 & 1 & 2 \\ 3 & 4 & 4 & 3 & 4 \\ 2 & 3 & 5 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 7 & 1 & 2 \end{pmatrix} := B$$

第二步, 删去 B 矩阵的第一行、第一列, 得到 4×4 大小的 C 矩阵, 即 $C = \begin{pmatrix} 2 & 7 & 1 & 2 \\ 4 & 4 & 3 & 4 \\ 3 & 5 & 2 & 3 \\ 2 & 7 & 1 & 2 \end{pmatrix}$; 第三步, 计算 C 的二阶子式,

得到矩阵 A 的伴随矩阵 A^* , 即

$$A^* = \begin{pmatrix} 2 \times 4 - 7 \times 4 & 4 \times 5 - 4 \times 3 & 3 \times 7 - 5 \times 2 \\ 7 \times 3 - 1 \times 4 & 4 \times 2 - 3 \times 5 & 5 \times 1 - 2 \times 7 \\ 1 \times 4 - 2 \times 3 & 3 \times 3 - 4 \times 2 & 2 \times 2 - 3 \times 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -20 & 8 & 11 \\ 17 & -7 & -9 \\ -2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

最后一步, 选择 A^* 的第 i 行 (或列) 与 A 的第 i 列 (或行) 相乘, 即为 $|A|$, 此题 $|A| = 1$, 故 $A^{-1} = \begin{pmatrix} -20 & 8 & 11 \\ 17 & -7 & -9 \\ -2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$.

例 10.2.4. 设实矩阵 $A = (a_{ij})$, A_{ij} 是 a_{ij} 的代数余子式, $|a_{ij}|$ 与 $|A_{ij}|$ 分别表示两个表达式的绝对值, 则下列结论不正确的是

- A. 若 $\det A = 1$ 且对任意 i, j 均有 $a_{ij} = A_{ij}$, 则 A 为正交矩阵
- B. 若 $\det A = 1$ 且对任意 i, j 均有 $a_{ij} = -A_{ij}$, 则 A 为正交矩阵

C. 若 A 为正交矩阵且 $\det A = 1$, 则对任意 i, j , 有 $|a_{ij}| = |A_{ij}|$

D. 若 A 为正交矩阵且 $\det A = -1$, 则对任意 i, j , 有 $|a_{ij}| = |A_{ij}|$

由 $a_{ij} = A_{ij}$, 可知, 对于 A 选项

$$AA^\top = AA^* = \det A \cdot E = E \Rightarrow A \text{ 是正交矩阵}$$

因此 A 正确; 那么 B 选项错误, 因为

$$a_{ij} = -A_{ij} \Rightarrow A^* = -A^\top \not\Rightarrow AA^\top = E$$

对于 C、D 选项, 有

$$AA^\top = E = A^\top A \Rightarrow A^* A = \det A \cdot E = \pm E = \pm A^\top A \Rightarrow A^* = \pm A^\top \Rightarrow |a_{ij}| = |A_{ij}|$$

因此 C,D 正确, 故选 B.

例 10.2.5. 设矩阵 $A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 7 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{pmatrix}$, $B = (2A + E)(A + 2E)^{-1}$, 则 $|B - 2E|$ 中所有元素的代数余子式之和为多少.

由 $B = (2A + E)(A + 2E)^{-1}$, 可知

$$\begin{aligned} (B - 2E)^{-1} &= ((2A + E)(A + 2E)^{-1} - 2E)^{-1} = ((2A + E)(A + 2E)^{-1} - 2(A + 2E)(A + 2E)^{-1})^{-1} \\ &= ((-3E)(A + 2E)^{-1})^{-1} = (-3(A + 2E)^{-1})^{-1} = -\frac{1}{3}(A + 2E) \\ &= -\frac{1}{3} \begin{pmatrix} 3 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 12 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -3 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & -4 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

因为所有代数余子式之和等于这个伴随矩阵所有元素之和, 故先求出它的伴随矩阵, 再计算伴随矩阵各个元素相加, $|B - 2E| = \frac{1}{24}$, 于是 $(B - 2E)^* = |B - 2E|(B - 2E)^{-1} = \frac{1}{24} \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -3 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & -4 \end{pmatrix}$, 因此 $|B - 2E|$ 中所有元素的代数余子式之和为 $-\frac{2}{3}$.

例 10.2.6. 设矩阵 A 的伴随矩阵 $A^* = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 8 \end{pmatrix}$, 且 $ABA^{-1} = BA^{-1} + 3E$, 其中 E 为 4 阶单位矩阵, 求矩阵 B .

因为 $ABA^{-1} = BA^{-1} + 3E \Rightarrow B = (A - E)^{-1} \cdot 3A = 3[A^{-1}(A - E)]^{-1} = 3(A^{-1}A - A^{-1})^{-1} = 3\left(E - \frac{1}{|A|}A^*\right)^{-1}$, 且 $|A^*| = 8$, 又 $|A^*| = |A|^{n-1}$, 故 $|A| = 2$, 所以

$$B = 3 \left(\begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2} & 0 & 4 \end{pmatrix} \right)^{-1} = 3 \left(\begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 & -3 \end{pmatrix} \right)^{-1} = \begin{pmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

例 10.2.7. 设 3 阶矩阵 $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}$, 求 $\left| \left(\frac{1}{4} A^2 \right)^{-1} - A^* \right|$ 及 $\left[\left(\frac{1}{4} A^2 \right)^{-1} - A^* \right]^*$.

$$|A| = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{vmatrix} = 2 + 1 - 1 = 2, \text{ 又因为}$$

$$\begin{aligned} (A : E) &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow[r_3-r_1]{r_1-r_2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &\rightarrow 2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \xrightarrow[r_2-r_3]{r_1+r_3} 2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

于是 $A^* = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, 因为 $A^{-1} = \frac{1}{|A|} A^*$, 所以 $2A^{-1} = A^*$,

$$\left(\frac{1}{4} A^2 \right)^{-1} = 4(A^2)^{-1} = 4 \frac{1}{|A||A|} (A^2)^* = (A^2)^*$$

所以

$$\left| \left(\frac{1}{4} A^2 \right)^{-1} - A^* \right| = \left| (A^2)^* - A^* \right| = |A^*(A^* - E_3)| = |A^*||A^* - E_3| = -2$$

所以

$$\begin{aligned} \left[\left(\frac{1}{4} A^2 \right)^{-1} - A^* \right]^* &= [A^*(A^* - E_3)]^* = (A^* - E_3)^*(A^*)^* \\ &= \begin{pmatrix} 0 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^* \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}^* = \begin{pmatrix} -3 & -4 & 3 \\ 3 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{pmatrix}^* = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 4 \\ 4 & 6 & 6 \\ 6 & 10 & 12 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

10.3 初等变换与初等矩阵

10.3.1 初等变换

例 10.3.1. 设 $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{31} + a_{11} & a_{32} + a_{12} & a_{33} + a_{13} \end{pmatrix}$,

$$P_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, P_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

则必有

- A. $AP_1P_2 = B$ B. $AP_2P_1 = B$ C. $P_1P_2A = B$ D. $P_2P_1A = B$

矩阵 B 是矩阵 A 经过初等行变换得到的, 首先把矩阵 A 的第一行加到第三行, 即 P_2A ; 然后再把 P_2A 的第一行与第二行互换, 即选 C .

例 10.3.2. 设 A 是 3 阶方阵, 将 A 的第 1 列与第 2 列交换得到 B , 再把 B 的第 2 列加到第 3 列得到 C , 求满足 $AQ = C$ 的可逆矩阵 Q .

将所述变换用相应的初等矩阵表示, 即 $B = AE_{12}$, $C = BE_{23}(1)$, 那么 $C = AE_{12}E_{23}(1)$, 则

$$Q = E_{12}E_{23}(1) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

例 10.3.3. 设 $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$, $P = \begin{pmatrix} & & 1 \\ & 1 & \\ 1 & & \end{pmatrix}$, $Q = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & & 1 \\ & 1 & \end{pmatrix}$, 求 $P^{2022}AQ^{2023}$.

P 左乘 A 相当于把 A 的第 1、3 行互换, 故 $P^{2022}A$ 是把 A 的第 1、3 行互换 2022 次, 结果仍为 A ; 同理 AQ^{2023} 相当于把 A 的第 2、3 列互换 2023 次, 那么结果为 $\begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 4 & 6 & 5 \\ 7 & 9 & 8 \end{pmatrix}$.

例 10.3.4 (2006 数一). 设 A 为 3 阶方阵, 将 A 的第 2 行加到第 1 行得 B , 再将 B 的第 1 列的 -1 倍加到第 2 列得 C , 记 $P = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, 则有

- A. $C = P^{-1}AP$ B. $C = PAP^{-1}$ C. $C = P^\top AP$ D. $C = PAP^\top$

将所述变换用相应的初等矩阵表示, $B = E_{12}(1)A$, $C = BE_{12}(-1)$, 于是

$$C = E_{12}(1)AE_{23}(1) = PAP^{-1}$$

故选 B.

例 10.3.5 (2009 数二). 设 A , P 均为 3 阶方阵, 且 $P^\top AP = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$, 若 $P = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$,

$Q = (\alpha_1 + \alpha_2, \alpha_2, \alpha_3)$, 则 $Q^\top AQ$ 为

- A. $\begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$ B. $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$ C. $\begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$ D. $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$

由题意, $Q = PE_{21}(1)$, 那么

$$\begin{aligned} Q^\top AQ &= (PE_{21}(1))^\top APE_{21}(1) = E_{21}^\top(1)P^\top APE_{21}(1) \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

故选 A.

10.3.2 初等矩阵

定义 10.3.1 (初等矩阵). 由于初等变换有 3 种, 相应可以得到 3 种初等矩阵:

- (1) $\mathbf{E}_{ij} \Leftrightarrow$ 交换 \mathbf{E} 的第 i, j 两行 (或列) 所得到的矩阵;
- (2) $\mathbf{E}_i(k) \Leftrightarrow$ \mathbf{E} 的第 i 行 (或列) 乘以非零常数 k 所得到的矩阵;
- (3) $\mathbf{E}_{ij}(k) \Leftrightarrow$ 把 \mathbf{E} 的第 j 行的 k 倍加到第 i 行或者把 \mathbf{E} 的第 i 列的 k 倍加到第 j 列所得到的矩阵.

定理 10.3.1 (初等矩阵的逆). (1) $\mathbf{E}_{ij}^{-1} = \mathbf{E}_{ij}$; (2) $\mathbf{E}_i^{-1}(k) = \mathbf{E}_i\left(\frac{1}{k}\right)$; (3) $\mathbf{E}_{ij}^{-1}(k) = \mathbf{E}_{ij}(-k)$.

例 10.3.6. 试将矩阵 $\begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 5 \end{pmatrix}$ 写成若干个形如 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ x & 1 \end{pmatrix}$ 与 $\begin{pmatrix} 1 & y \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 的矩阵的乘积.

显然, 所给矩阵非奇异, 故可经一系列初等变换化为单位矩阵, 具体地, 有

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 5 \end{pmatrix} \xrightarrow[c_2 - c_1]{r_2 - r_1} \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow[c_2 - c_1]{c_1 - c_2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

用初等矩阵表示, 即

$$\mathbf{E}_{21}(-1)\begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 5 \end{pmatrix}\mathbf{E}_{12}(-1)\mathbf{E}_{21}(-1)\mathbf{E}_{12}(-1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

因此, 有

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 5 \end{pmatrix} = \mathbf{E}_{21}^{-1}(-1)\mathbf{E}_{12}^{-1}(-1)\mathbf{E}_{21}^{-1}(-1)\mathbf{E}_{12}^{-1}(-1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

例 10.3.7. 设 $a \neq 0$, 把矩阵 $\begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & a^{-1} \end{pmatrix}$ 表示成一些形如 $\begin{pmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 与 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ y & 1 \end{pmatrix}$ 的矩阵的乘积.

考虑如何用消法变换将 $\begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & a^{-1} \end{pmatrix}$ 化为单位矩阵,

$$\begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & a^{-1} \end{pmatrix} \xrightarrow[r_1 + \frac{1-a}{a}r_2]{r_2+r_1} \begin{pmatrix} 1 & \frac{1-a}{a^2} \\ a & a^{-1} \end{pmatrix} \xrightarrow[r_1 + \frac{a-1}{a^2}r_2]{r_2-ar_1} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

将上述过程用初等矩阵表示, 得

$$\mathbf{E}_{12}\left(\frac{a-1}{a^2}\right)\mathbf{E}_{21}(-a)\mathbf{E}_{12}\left(\frac{1-a}{a^2}\right)\mathbf{E}_{21}(1)\begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & a^{-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

因此, 有

$$\begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & a^{-1} \end{pmatrix} = \mathbf{E}_{21}^{-1}(1)\mathbf{E}_{12}^{-1}\left(\frac{1-a}{a^2}\right)\mathbf{E}_{21}^{-1}(-a)\mathbf{E}_{12}^{-1}\left(\frac{a-1}{a^2}\right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & \frac{a-1}{a} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ a & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & \frac{1-a}{a^2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

例 10.3.8. 设矩阵 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$ 经初等行变换变为矩阵 $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} -1 & 2 & 2 \\ 2 & -1 & 2 \\ -2 & 2 & a \end{pmatrix}$

(1) 求 a 的值;

(2) 求满足 $\mathbf{PA} = \mathbf{B}$ 的所有可逆矩阵 \mathbf{P} .

(1) 易得 $\text{rank } \mathbf{A} = 2$, 并且 $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} -1 & 2 & 2 \\ 2 & -1 & 2 \\ -2 & 2 & a \end{pmatrix} \xrightarrow[r_3+r_2]{r_2 \times \frac{1}{3}} \begin{pmatrix} -1 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & a \end{pmatrix}$, 则 $\text{rank } \mathbf{B} = 2 \Rightarrow a = 0$.

(2) 记 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3)$, $\mathbf{B}^\top = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$, 求解 $\mathbf{A}^\top \mathbf{X} = \mathbf{B}^\top$, 转化为求解三个方程组 $\mathbf{A}^\top \mathbf{x}_i = \beta_i$ ($i = 1, 2, 3$), 于是

$$(\mathbf{A}^\top \mid \mathbf{B}^\top) = \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 2 & -1 & 2 & 2 \\ 1 & -1 & 0 & 2 & -1 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & -2 & 2 & 0 \end{array} \right) \xrightarrow[r_3-2r_1-2r_2]{r_1-r_2} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -2 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

因此 $\mathbf{A}^\top \mathbf{X} = \mathbf{0}$ 的基础解系为 $\xi = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\mathbf{A}^\top \mathbf{x}_i = \beta_i$ 的通解分别为

$$\eta_1 = k_1 \xi + \begin{pmatrix} \frac{1}{-2} \\ -2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-k_1 \\ -2+k_1 \\ k_1 \end{pmatrix}, \quad \eta_2 = k_2 \xi + \begin{pmatrix} \frac{1}{-2} \\ 1+k_2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-k_2 \\ 1+k_2 \\ k_2 \end{pmatrix}, \quad \eta_3 = k_3 \xi + \begin{pmatrix} \frac{0}{-2} \\ -2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_3 \\ -2+k_3 \\ k_3 \end{pmatrix}$$

故满足 $\mathbf{A}^\top \mathbf{X} = \mathbf{B}^\top$ 的解为 $\mathbf{X}(\eta_1, \eta_2, \eta_3)$, 当 $\det \mathbf{X} \neq 0$ 时, \mathbf{X} 可逆, 即

$$\begin{vmatrix} 1-k_1 & 1-k_2 & -k_3 \\ -2+k_1 & 1+k_2 & -2+k_3 \\ k_1 & k_2 & k_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -2 & 1 & -2 \\ k_1 & k_2 & k_3 \end{vmatrix} = -2k_1 + 2k_2 + 3k_3 \neq 0.$$

例 10.3.9. 设矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

求三阶可逆矩阵 \mathbf{P} , 四阶可逆矩阵 \mathbf{Q} , 使得 $\mathbf{A} = \mathbf{P} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{Q}$.

先对 \mathbf{A} 作初等变换, 有

$$\mathbf{A} \xrightarrow[r_1-2r_2]{r_3+3r_1} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

对应的初等矩阵为

$$\mathbf{E}_{31}(3)\mathbf{E}_{12}(-2)\mathbf{A}\mathbf{E}_{24} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

于是 $\mathbf{P} = (\mathbf{E}_{31}(3)\mathbf{E}_{12}(-2))^{-1} = \mathbf{E}_{12}(2)\mathbf{E}_{31}(-3)$, $\mathbf{Q} = \mathbf{E}_{24}^{-1} = \mathbf{E}_{24}$, 即

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

推论 10.3.1. 设 \mathbf{A} , \mathbf{B} 分别是 $n \times m$ 和 $m \times n$ 矩阵 ($n \geq m$), $\lambda \neq 0$, 求证:

$$|\lambda \mathbf{E}_n - \mathbf{AB}| = \lambda^{n-m} |\lambda \mathbf{E}_m - \mathbf{BA}|.$$

证 只需证 $n > m$ 的情形, 对分块矩阵 $\begin{pmatrix} \mathbf{E}_n & \mathbf{A} \\ \mathbf{B} & \lambda \mathbf{E}_m \end{pmatrix}$ 和 $\begin{pmatrix} \lambda \mathbf{E}_n & \mathbf{A} \\ \mathbf{B} & \mathbf{E}_m \end{pmatrix}$ 作初等行变换, 有

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}_n & \mathbf{O} \\ -\mathbf{B} & \mathbf{E}_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{E}_n & \mathbf{A} \\ \mathbf{B} & \lambda \mathbf{E}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{E}_m & \mathbf{A} \\ \mathbf{O} & \lambda \mathbf{E}_m - \mathbf{AB} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}_n & -\mathbf{A} \\ \mathbf{O} & \mathbf{E}_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \mathbf{E}_n & \mathbf{A} \\ \mathbf{B} & \mathbf{E}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda \mathbf{E}_n - \mathbf{AB} & \mathbf{O} \\ \mathbf{B} & \mathbf{E}_m \end{pmatrix}$$

对上述二式两边同时取行列式, 可得

$$\lambda^m |\lambda \mathbf{E}_n - \mathbf{AB}| = \lambda^m \begin{vmatrix} \lambda \mathbf{E}_n & \mathbf{A} \\ \mathbf{B} & \mathbf{E}_m \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \lambda \mathbf{E}_n & \mathbf{A} \\ \lambda \mathbf{B} & \lambda \mathbf{E}_m \end{vmatrix} = \lambda^n \begin{vmatrix} \mathbf{E}_n & \mathbf{A} \\ \mathbf{B} & \lambda \mathbf{E}_m \end{vmatrix} = \lambda^m |\lambda \mathbf{E}_m - \mathbf{BA}|$$

所以 $|\lambda \mathbf{E}_n - \mathbf{AB}| = \lambda^{n-m} |\lambda \mathbf{E}_m - \mathbf{BA}|$.

例 10.3.10. 计算行列式 $D_n = \begin{vmatrix} 1+a_1+x_1 & a_1+x_1 & \cdots & a_1+x_n \\ a_2+x_1 & 1+a_2+x_2 & \cdots & a_2+x_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_n+x_1 & a_n+x_2 & \cdots & 1+a_n+x_n \end{vmatrix}$.

令 $\mathbf{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n)^\top$, $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^\top$, $\mathbf{e} = (1, 1, \dots, 1)^\top$, 那么由推论 10.3.1 可得

$$\begin{aligned} D_n &= \left| \mathbf{E}_n + \mathbf{A}\mathbf{e}^\top + \mathbf{e}\mathbf{X}^\top \right| = \left| \mathbf{E}_n + (\mathbf{A}, \mathbf{e}) \begin{pmatrix} \mathbf{e}^\top \\ \mathbf{X}^\top \end{pmatrix} \right| = \left| \mathbf{E}_2 + \begin{pmatrix} \mathbf{e}^\top \\ \mathbf{X}^\top \end{pmatrix} (\mathbf{A}, \mathbf{e}) \right| = \left| \mathbf{E}_2 + \begin{pmatrix} \mathbf{e}^\top \mathbf{A} & \mathbf{e}^\top \mathbf{e} \\ \mathbf{X}^\top \mathbf{A} & \mathbf{X}^\top \mathbf{e} \end{pmatrix} \right| \\ &= \begin{vmatrix} 1+\mathbf{e}^\top \mathbf{A} & \mathbf{e}^\top \mathbf{e} \\ \mathbf{X}^\top \mathbf{A} & 1+\mathbf{X}^\top \mathbf{e} \end{vmatrix} = (1+\mathbf{e}^\top \mathbf{A})(1+\mathbf{X}^\top \mathbf{e}) - (\mathbf{e}^\top \mathbf{e})(\mathbf{X}^\top \mathbf{A}) = \left(1 + \sum_{i=1}^n a_i\right) \left(1 + \sum_{i=1}^n x_i\right) - n \sum_{i=1}^n a_i x_i \end{aligned}$$

例 10.3.11 (2008 上海交通大学). 设 $\prod_{i=1}^n a_i \neq 0$, 计算 n 阶行列式

$$D = \begin{vmatrix} 0 & a_1+a_2 & a_1+a_3 & \cdots & a_1+a_n \\ a_2+a_1 & 0 & a_2+a_3 & \cdots & a_2+a_n \\ a_3+a_1 & a_3+a_2 & 0 & \cdots & a_3+a_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n+a_1 & a_n+a_2 & a_n+a_3 & \cdots & 0 \end{vmatrix}.$$

取 $\mathbf{A} = \text{diag}(-2a_1, -2a_2, \dots, -2a_n)$, $\mathbf{A}^\top = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ a_1 & a_2 & \cdots & a_n \end{pmatrix}$, 那么

$$\begin{aligned} D &= \det(\mathbf{A} + \mathbf{AB}) = \det \mathbf{A} \cdot \det(\mathbf{E}_n + \mathbf{A}^{-1} \mathbf{AB}) = (-2)^n \prod_{i=1}^n a_i \det(\mathbf{E}_2 + \mathbf{B} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A}) \\ &= (-2)^n \prod_{i=1}^n a_i \begin{vmatrix} 1 - \frac{n}{2} & -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{1}{a_j} \\ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i & 1 - \frac{n}{2} \end{vmatrix} = (-2)^n \prod_{i=1}^n a_i \left[(n-2)^2 - \sum_{i,j=1}^n \frac{a_i}{a_j} \right]. \end{aligned}$$

10.4 矩阵的秩

10.4.1 秩的相关不等式证明

定义 10.4.1 (满秩方阵). 对于 n 阶方阵 \mathbf{A} , 若 $\text{rank } \mathbf{A} = n$, 则称 \mathbf{A} 为满秩 (非退化) 方阵, 否则称为降秩 (退化) 方阵.

定理 10.4.1 (矩阵与向量组秩的联系). 设 $\boldsymbol{\alpha}_i$ ($i = 1, 2, \dots, m$), $\boldsymbol{\beta}$ 是 n 维列向量, 则

$$\text{rank}(\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2, \dots, \boldsymbol{\alpha}_m) \leqslant \text{rank}(\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2, \dots, \boldsymbol{\alpha}_m, \boldsymbol{\beta}) \leqslant \text{rank}(\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2, \dots, \boldsymbol{\alpha}_m) + 1.$$

例 10.4.1. 设 \mathbf{A} , \mathbf{B} 分别是 $f \times m$, $f \times n$ 的矩阵, 证明: $\text{rank } \mathbf{A} \leqslant \text{rank}(\mathbf{A}, \mathbf{B}) \leqslant \text{rank } \mathbf{A} + n$.

证 设 $\mathbf{A} = (\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2, \dots, \boldsymbol{\alpha}_m)$, $\mathbf{B} = (\boldsymbol{\beta}_1, \boldsymbol{\beta}_2, \dots, \boldsymbol{\beta}_n)$, 那么

$$\text{rank } \mathbf{A} = \text{rank}(\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2, \dots, \boldsymbol{\alpha}_m) \leqslant \text{rank}(\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2, \dots, \boldsymbol{\alpha}_m, \boldsymbol{\beta}_1) \leqslant \dots \leqslant \text{rank}(\boldsymbol{\alpha}_1, \dots, \boldsymbol{\alpha}_m, \boldsymbol{\beta}_1, \dots, \boldsymbol{\beta}_n) = \text{rank}(\mathbf{A}, \mathbf{B})$$

又因为

$$\text{rank}(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \text{rank}(\boldsymbol{\alpha}_1, \dots, \boldsymbol{\alpha}_m, \boldsymbol{\beta}_1, \dots, \boldsymbol{\beta}_n) \leqslant \text{rank}(\boldsymbol{\alpha}_1, \dots, \boldsymbol{\alpha}_m, \boldsymbol{\beta}_1, \dots, \boldsymbol{\beta}_{n-1}) + 1 \leqslant \dots \leqslant \text{rank}(\boldsymbol{\alpha}_1, \dots, \boldsymbol{\alpha}_m) + n$$

综上 $\text{rank } \mathbf{A} \leqslant \text{rank}(\mathbf{A}, \mathbf{B}) \leqslant \text{rank } \mathbf{A} + n$ 成立.

定理 10.4.2. 对于 $m \times n$ 矩阵 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} , 有 $\text{rank}(\mathbf{A} + \mathbf{B}) \leq \text{rank}(\mathbf{A}, \mathbf{B})$.

证 不妨设 $\mathbf{A} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$, $\mathbf{B} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$, 则结论显然成立.

定理 10.4.3. 对于 $m \times n$ 矩阵 \mathbf{A} 与 $m \times s$ 矩阵 \mathbf{B} , 有 $\text{rank}(\mathbf{A}, \mathbf{B}) \leq \text{rank } \mathbf{A} + \text{rank } \mathbf{B}$.

证 提示: 用极大无关组可证明.

定理 10.4.4. 对于 n 阶方阵 \mathbf{A} , \mathbf{B} , 则 $\text{rank}(\mathbf{A} \pm \mathbf{B}) \leq \text{rank } \mathbf{A} + \text{rank } \mathbf{B}$.

定理 10.4.5. 对于 $m \times n$ 矩阵 \mathbf{A} 与 $n \times s$ 矩阵 \mathbf{B} , 有 $\text{rank}(\mathbf{AB}) \leq \min\{\text{rank } \mathbf{A}, \text{rank } \mathbf{B}\}$.

证 先设 $\mathbf{A} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1s} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{ns} \end{pmatrix}$, 并且无论是 $b_{11}\alpha_1 + \cdots + b_{n1}\alpha_n$ 还是 $b_{1s}\alpha_1 + \cdots + b_{ns}\alpha_n$, 均可由 $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ 线性表示, 于是

$$\text{rank}(\mathbf{AB}) = \text{rank}(b_{11}\alpha_1 + \cdots + b_{n1}\alpha_n, \dots, b_{1s}\alpha_1 + \cdots + b_{ns}\alpha_n) \leq \text{rank}(\alpha_1, \dots, \alpha_n) = \text{rank } \mathbf{A}$$

再设 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix}^\top$, 同理 $\text{rank}(\mathbf{AB}) \leq \text{rank } \mathbf{B}$, 则

$$\text{rank}(\mathbf{AB}) \leq \text{rank } \mathbf{A} \text{ 且 } \text{rank}(\mathbf{AB}) \leq \text{rank } \mathbf{B}.$$

定理 10.4.6. 若 \mathbf{A} 是 $m \times n$ 矩阵, \mathbf{B} 是 $n \times s$ 矩阵, 且 $\mathbf{AB} = \mathbf{O}$, 则 $\text{rank } \mathbf{A} + \text{rank } \mathbf{B} \leq n$.

定理 10.4.7. 对于 $m \times n$ 矩阵 \mathbf{A} 与 $s \times t$ 矩阵 \mathbf{B} , 有 $\text{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{O} \\ \mathbf{C} & \mathbf{B} \end{pmatrix} \geq \text{rank } \mathbf{A} + \text{rank } \mathbf{B}$.

例 10.4.2. 设 \mathbf{A} , \mathbf{B} 为 n 阶方阵, 证明:

$$\text{rank}(\mathbf{AB} - \mathbf{E}) \leq \text{rank}(\mathbf{A} - \mathbf{E}) + \text{rank}(\mathbf{B} - \mathbf{E})$$

这里 \mathbf{E} 为 n 阶单位矩阵.

证 因为 $\mathbf{AB} - \mathbf{E} = (\mathbf{A} - \mathbf{E})\mathbf{B} + (\mathbf{B} - \mathbf{E})$, 于是

$$\text{rank}(\mathbf{AB} - \mathbf{E}) \leq \text{rank}((\mathbf{A} - \mathbf{E})\mathbf{B}) + \text{rank}(\mathbf{B} - \mathbf{E}) \leq \text{rank}(\mathbf{A} - \mathbf{E}) + \text{rank}(\mathbf{B} - \mathbf{E}).$$

例 10.4.3. 设 \mathbf{A} , \mathbf{B} 为 n 阶方阵, 证明:

$$(1) \text{rank}(\mathbf{A} - \mathbf{B}) \geq \text{rank } \mathbf{A} - \text{rank } \mathbf{B};$$

$$(2) \text{若 } \mathbf{A} \text{ 是可逆矩阵, 则结论 (1) 中的等号成立当且仅当 } \mathbf{BA}^{-1}\mathbf{B} = \mathbf{B}.$$

证

$$(1) \text{由 } \mathbf{A} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}) + \mathbf{B}, \text{且 } \text{rank } \mathbf{A} \leq \text{rank}(\mathbf{A} - \mathbf{B}) + \text{rank } \mathbf{B}, \text{移项得 } \text{rank}(\mathbf{A} - \mathbf{B}) \geq \text{rank } \mathbf{A} - \text{rank } \mathbf{B};$$

(2) 利用分块矩阵的初等行变换, 得

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{B} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{B} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{行}} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{B} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{列}} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{O} & \mathbf{B} - \mathbf{BA}^{-1}\mathbf{B} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{列}} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{B} - \mathbf{BA}^{-1}\mathbf{B} \end{pmatrix}$$

因为初等行变化不会改变矩阵的秩, 所以

$$\text{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{B} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{B} \end{pmatrix} = \text{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{B} - \mathbf{BA}^{-1}\mathbf{B} \end{pmatrix}$$

即

$$\text{rank}(\mathbf{A} - \mathbf{B}) + \text{rank } \mathbf{B} = \text{rank } \mathbf{A} + \text{rank}(\mathbf{B} - \mathbf{BA}^{-1}\mathbf{B})$$

故 $\text{rank}(\mathbf{A} - \mathbf{B}) = \text{rank } \mathbf{A} - \text{rank } \mathbf{B}$ 当且仅当 $\text{rank}(\mathbf{B} - \mathbf{BA}^{-1}\mathbf{B}) = 0$, 即 $\mathbf{BA}^{-1}\mathbf{B} = \mathbf{B}$.

例 10.4.4. 设 \mathbf{A}, \mathbf{B} 都是数域 P 上的 n 阶方阵, 满足 $\mathbf{AB} = \mathbf{BA}$, 证明:

$$\operatorname{rank}(\mathbf{A} + \mathbf{B}) \leq \operatorname{rank} \mathbf{A} + \operatorname{rank} \mathbf{B} - \operatorname{rank}(\mathbf{AB}).$$

证 利用分块矩阵的初等行变换, 有

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{B} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{行}} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{O} & \mathbf{B} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{列}} \begin{pmatrix} \mathbf{A} + \mathbf{B} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{B} \end{pmatrix}$$

因为 $\mathbf{AB} = \mathbf{BA}$, 于是

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{O} \\ -\mathbf{B} & \mathbf{A} + \mathbf{B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{A} + \mathbf{B} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} + \mathbf{B} & \mathbf{B} \\ \mathbf{O} & \mathbf{AB} \end{pmatrix}$$

于是, 有

$$\operatorname{rank} \mathbf{A} + \operatorname{rank} \mathbf{B} = \operatorname{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{A} + \mathbf{B} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{B} \end{pmatrix} \geq \operatorname{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{A} + \mathbf{B} & \mathbf{B} \\ \mathbf{O} & \mathbf{AB} \end{pmatrix} \geq \operatorname{rank}(\mathbf{A} + \mathbf{B}) + \operatorname{rank}(\mathbf{AB})$$

即得证不等式.

10.4.2 秩的相关等式证明

定理 10.4.8. 对于 $m \times n$ 矩阵 \mathbf{A} 与 $s \times t$ 矩阵 \mathbf{B} , 有 $\operatorname{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{B} \end{pmatrix} = \operatorname{rank} \mathbf{A} + \operatorname{rank} \mathbf{B}$.

定理 10.4.9 (秩的第一降阶定理). 若 \mathbf{A} 是 r 阶可逆矩阵, 分块矩阵 $\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{pmatrix}$, 那么

$$\operatorname{rank} \mathbf{M} = r + \operatorname{rank}(\mathbf{D} - \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B}).$$

例 10.4.5. 设 \mathbf{A}, \mathbf{D} 分别为 m 阶与 n 阶可逆矩阵, \mathbf{B}, \mathbf{C} 分别为 $m \times n$ 与 $n \times m$ 矩阵, 证明:

$$\operatorname{rank} \mathbf{A} - \operatorname{rank}(\mathbf{A} - \mathbf{BD}^{-1}\mathbf{C}) = \operatorname{rank} \mathbf{D} - \operatorname{rank}(\mathbf{D} - \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B}).$$

证 利用分块矩阵的初等行变换, 得

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{D} - \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B} \end{pmatrix} &\xrightarrow{\text{行}} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{O} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} - \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{列}} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BD}^{-1}\mathbf{C} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{D} \end{pmatrix} &\xrightarrow{\text{行}} \begin{pmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BD}^{-1}\mathbf{C} & \mathbf{B} \\ \mathbf{O} & \mathbf{D} \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{列}} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

因为初等行变化不会改变矩阵的秩, 于是

$$\begin{aligned} \operatorname{rank} \mathbf{A} + \operatorname{rank}(\mathbf{D} - \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B}) &= \operatorname{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{D} - \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B} \end{pmatrix} = \operatorname{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{pmatrix} \\ \operatorname{rank}(\mathbf{A} - \mathbf{BD}^{-1}\mathbf{C}) + \operatorname{rank} \mathbf{D} &= \operatorname{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BD}^{-1}\mathbf{C} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{D} \end{pmatrix} = \operatorname{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

得证 $\operatorname{rank} \mathbf{A} - \operatorname{rank}(\mathbf{A} - \mathbf{BD}^{-1}\mathbf{C}) = \operatorname{rank} \mathbf{D} - \operatorname{rank}(\mathbf{D} - \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B})$.

推论 10.4.1. 特别地, 令 $\mathbf{A} = \lambda_0 \mathbf{E}_m$, $\mathbf{D} = \mathbf{E}_n$, 其中 λ_0 为任意非零常数, 则有

$$m - \operatorname{rank}(\lambda_0 \mathbf{E}_m - \mathbf{BC}) = n - \operatorname{rank}(\lambda_0 \mathbf{E}_n - \mathbf{CB}).$$

例 10.4.6. 设 \mathbf{A} 是 $m \times n$ 矩阵, \mathbf{B} 是 $n \times s$ 矩阵, 且 $\operatorname{rank}(\mathbf{AB}) = \operatorname{rank} \mathbf{B}$, 证明: 对任一 $s \times t$ 矩阵 \mathbf{C} , 有 $\operatorname{rank}(\mathbf{ABC}) = \operatorname{rank}(\mathbf{BC})$.

证 利用分块矩阵的初等行变换, 得

$$\begin{pmatrix} ABC & O \\ O & B \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{行}} \begin{pmatrix} ABC & AB \\ O & B \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{列}} \begin{pmatrix} O & AB \\ -BC & B \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{列}} \begin{pmatrix} AB & O \\ B & BC \end{pmatrix}$$

因为初等行变化不会改变矩阵的秩, 所以

$$\operatorname{rank} \begin{pmatrix} ABC & O \\ O & B \end{pmatrix} = \operatorname{rank}(ABC) + \operatorname{rank} B = \operatorname{rank} \begin{pmatrix} AB & O \\ B & BC \end{pmatrix} \geq \operatorname{rank}(AB) + \operatorname{rank}(BC)$$

又 $\operatorname{rank}(AB) = \operatorname{rank} B$, 所以 $\operatorname{rank}(ABC) \geq \operatorname{rank}(BC)$, 又 $\operatorname{rank}(ABC) \leq \operatorname{rank}(BC)$, 故

$$\operatorname{rank}(ABC) = \operatorname{rank}(BC).$$

10.4.3 秩的应用

例 10.4.7. 设 A, B 分别是实数域上的 3×4 和 4×3 矩阵, 且满足

$$AB = \begin{pmatrix} -9 & 2 & 2 \\ -20 & 5 & 4 \\ -35 & 7 & 8 \end{pmatrix}, BA = \begin{pmatrix} -14 & 2x-5 & 2 & 6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -15 & 3x-3 & 3 & 6 \\ -32 & 6x-7 & 4 & 14 \end{pmatrix}$$

求 x 的值.

由推论 10.4.1, 令 $\lambda_0 = 1$, 于是 $3 - \operatorname{rank}(E_3 - AB) = 4 - \operatorname{rank}(E_4 - BA)$, 那么

$$\begin{aligned} \operatorname{rank}(E_4 - BA) &= 4 - 3 + \operatorname{rank}(E_3 - AB) \\ \operatorname{rank} \begin{pmatrix} 15 & 5-2x & -2 & -6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 3-3x & -2 & -6 \\ 32 & 7-6x & -4 & -13 \end{pmatrix} &= 1 + \operatorname{rank} \begin{pmatrix} 10 & -2 & -2 \\ 20 & -4 & -4 \\ 35 & -7 & -7 \end{pmatrix} = 2 \end{aligned}$$

解得 $x = -2$.

例 10.4.8. 设 A 是 4 阶矩阵, 向量 α, β 是齐次方程组 $(A - E)x = \mathbf{0}$ 的基础解系, 向量 γ 是齐次方程组 $(A + E)x = \mathbf{0}$ 的基础解系, 求 $(A^2 - E)x = \mathbf{0}$ 的通解

A. $c_1\alpha + c_2\beta$ 其中 c_1, c_2 为任意常数

B. $c_1\alpha + c_2\gamma$ 其中 c_1, c_2 为任意常数

C. $c_1\beta + c_2\gamma$ 其中 c_1, c_2 为任意常数

D. $c_1\alpha + c_2\beta + c_3\gamma$ 其中 c_1, c_2, c_3 为任意常数

因为向量 α, β 是齐次方程组 $(A - E)x = \mathbf{0}$ 的基础解系, 所以

$$s = n - \operatorname{rank}(A - E) \Rightarrow 2 = 4 - \operatorname{rank}(A - E) \Rightarrow \operatorname{rank}(A - E) = 2$$

同理 $\operatorname{rank}(A + E) = 3$, 又因为

$$\operatorname{rank}(A^2 - E) = \operatorname{rank}[(A + E)(A - E)] \leq \min\{\operatorname{rank}(A + E), \operatorname{rank}(A - E)\} \Rightarrow \operatorname{rank}(A^2 - E) \leq 2$$

当 $\operatorname{rank}(A^2 - E) = 0$ 时, $A^2 - E = \mathbf{0} \Rightarrow (A + E)(A - E) = \mathbf{0} \Rightarrow \operatorname{rank}(A + E) + \operatorname{rank}(A - E) \leq 4$, 而 $\operatorname{rank}(A + E) = 3$, $\operatorname{rank}(A - E) = 2$, 与之矛盾; 当 $\operatorname{rank}(A^2 - E) = 2$ 时, 说明有 2 个线性无关解, $(A^2 - E)x = \mathbf{0} \Rightarrow (A + E)(A - E)x = \mathbf{0}$, 即 α, β, γ 是方程组的三个解, 又因为 α, β 是齐次方程组 $(A - E)x = \mathbf{0}$ 的基础解系, 说明 α, β 线性无关, 且 α, β 是特征值 1 对应的特征向量, γ 是 -1 对应的特征向量, 因此 γ 与 α 或 β 线性无关, 故方程组有 3 个线性无关解, 矛盾; 所以 $\operatorname{rank}(A^2 - E) = 1 \Rightarrow s' = n - \operatorname{rank}(A^2 - E) = 4 - 1 = 3$, 因此选 D.

10.5 矩阵的等价标准形

10.5.1 矩阵分解

例 10.5.1. 设 A 是 n 阶方阵, 证明: 存在一 n 阶可逆矩阵 B 及一个 n 阶等幂矩阵 C , 使得 $A = BC$.

证 设 $\text{rank } A = r$, 则存在 n 阶可逆矩阵 P 和 Q 使得,

$$A = P \begin{pmatrix} E_r & O \\ O & O \end{pmatrix} Q = (PQ)Q^{-1} \begin{pmatrix} E_r & O \\ O & O \end{pmatrix} Q$$

令 $B = PQ$, $C = Q^{-1} \begin{pmatrix} E_r & O \\ O & O \end{pmatrix} Q$, 并且

$$C^2 = Q^{-1} \begin{pmatrix} E_r & O \\ O & O \end{pmatrix} Q Q^{-1} \begin{pmatrix} E_r & O \\ O & O \end{pmatrix} Q = C$$

故得证.

例 10.5.2. 一个矩阵称为行(列)满秩矩阵, 如果它的行(列)向量组是线性无关的,

(1) 证明: 如果一个 $m \times n$ 矩阵 A 的秩为 r , 那么有 $m \times r$ 的列满秩矩阵 B 和 $r \times n$ 的行满秩矩阵 C , 使得 $A = BC$, 我们称 $A = BC$ 为矩阵 A 的满秩分解表达式;

(2) 利用(1)求矩阵 $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 1 & 1 & 10 \\ 3 & 6 & 1 & 4 & 2 & 36 \\ 2 & 4 & 0 & 2 & 2 & 27 \\ 6 & 12 & 1 & 7 & 5 & 73 \end{pmatrix}$ 的满秩分解表达式.

(1) 因为 $\text{rank } A = r$, 所以存在 m 阶可逆矩阵 P 和 n 阶可逆矩阵 Q , 使得

$$A = P \begin{pmatrix} E_r & O \\ O & O \end{pmatrix} Q = P \begin{pmatrix} E_r \\ O \end{pmatrix} (E_r, O) Q$$

令 $B = P \begin{pmatrix} E_r \\ O \end{pmatrix}$, $C = (E_r, O) Q$, 则 B 是 $m \times r$ 的列满秩矩阵, C 是 $r \times n$ 的行满秩矩阵, 且 $A = BC$.

(2) 用初等行变换和初等列变换将矩阵 A 化为等价标准形, 然后求逆即可, 具体地, 有

$$\begin{aligned} A &\xrightarrow{\substack{r_2-3r_1 \\ r_3-2r_1 \\ r_4-6r_1}} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 1 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 13 \end{pmatrix} \xrightarrow{\substack{r_4-r_2 \\ r_4-r_3 \\ r_3 \times \frac{1}{7}}} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 1 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ &\xrightarrow{\substack{c_2-2c_1 \\ c_4-c_1 \\ c_5-c_1 \\ c_6-10c_1}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\substack{c_4-c_3 \\ c_5+c_3 \\ c_6-6c_3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\substack{c_2 \leftrightarrow c_3 \\ c_3 \leftrightarrow c_6}} \begin{pmatrix} E_3 & O \\ O & O \end{pmatrix}_{4 \times 6} \end{aligned}$$

用矩阵表示为

$$L_4 L_3 L_2 L_1 A R_1 R_2 E_{23} E_{36} = \begin{pmatrix} E_3 & O \\ O & O \end{pmatrix}_{4 \times 6}$$

其中

$$L_1 = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ -3 & 1 & & \\ -2 & & 1 & \\ -6 & & & 1 \end{pmatrix}, L_2 = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & -1 & & 1 \end{pmatrix}, L_3 = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & -1 & 1 \end{pmatrix}, L_4 = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \frac{1}{7} & \\ & & & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 & -1 & -1 & -10 \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & -1 & 1 & -6 \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{pmatrix}$$

于是, 有

$$\mathbf{A} = \left(\mathbf{L}_1^{-1} \mathbf{L}_2^{-1} \mathbf{L}_3^{-1} \mathbf{L}_4^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{E}_3 \\ \mathbf{O} \end{pmatrix} \right) \left((\mathbf{E}_3, \mathbf{O}) \mathbf{E}_{36} \mathbf{E}_{23} \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{R}_1^{-1} \right) = \mathbf{BC}$$

那么

$$\mathbf{B} = \mathbf{L}_1^{-1} \mathbf{L}_2^{-1} \mathbf{L}_3^{-1} \mathbf{L}_4^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{E}_3 \\ \mathbf{O} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 7 \\ 6 & 1 & 7 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C} = (\mathbf{E}_3, \mathbf{O}) \mathbf{E}_{36} \mathbf{E}_{23} \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{R}_1^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 1 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

10.5.2 矩阵方程

例 10.5.3. 设矩阵 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$, 其伴随矩阵记作 \mathbf{A}^* , 求满足

$$\mathbf{A}^* \mathbf{X} \left(\frac{1}{2} \mathbf{A}^* \right)^* = 8\mathbf{A}^{-1} \mathbf{X} + 4\mathbf{E}$$

的矩阵 \mathbf{X} .

$$\det \mathbf{A} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{vmatrix} = 4, \text{ 且 } \mathbf{A}\mathbf{A}^* = |\mathbf{A}|\mathbf{E} = 4\mathbf{E}, \text{ 于是给矩阵方程同时左乘 } \mathbf{A}, \text{ 得}$$

$$\mathbf{A}\mathbf{A}^* \mathbf{X} \left(\frac{1}{2} \mathbf{A}^* \right)^* = 8\mathbf{A}\mathbf{A}^{-1} \mathbf{X} + 4\mathbf{AE} \Rightarrow 4\mathbf{EX} \left(\frac{1}{2} \mathbf{A}^* \right)^* = 8\mathbf{EX} + 4\mathbf{AE} \Rightarrow \mathbf{X} \left(\frac{1}{2} \mathbf{A}^* \right)^* = 2\mathbf{X} + \mathbf{A}$$

并且 $\left(\frac{1}{2} \mathbf{A}^* \right)^* = \left(\frac{1}{2} \right)^{3-1} (\mathbf{A}^*)^* = \frac{1}{4} |\mathbf{A}^*|^* = \frac{1}{4} |\mathbf{A}|^{3-2} \mathbf{A} = \mathbf{A}$, 以及 $\det(\mathbf{A} - 2\mathbf{E}) = -4 \neq 0$, 于是 $\mathbf{A} - 2\mathbf{E}$ 可逆, 而 $(\mathbf{A} - 2\mathbf{E})^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{pmatrix}^{-1} = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, 那么

$$\mathbf{X} = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

例 10.5.4. \mathbf{A}, \mathbf{B} 是数域 K 上的 n 阶已知方阵, $\det \mathbf{A} = \frac{1}{2}$, $\det \mathbf{B} = \frac{1}{3}$, 求解关于 \mathbf{X} 的矩阵方程

$$\mathbf{X} + \left((\mathbf{A}^\top \mathbf{B})^* \mathbf{A}^\top \right)^{-1} + \mathbf{B} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} = \mathbf{X} \left(\mathbf{B}^\top (\mathbf{AB}^\top)^{-1} \mathbf{A}^2 \right)^{-1} (\mathbf{A} + 2\mathbf{B}).$$

注意到 $(\mathbf{A}^\top \mathbf{B})^* = |\mathbf{A}^\top \mathbf{B}|(\mathbf{A}^\top \mathbf{B})^{-1} = |\mathbf{A}^\top \mathbf{B}| \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{A}^\top)^{-1}$, 那么

$$\left((\mathbf{A}^\top \mathbf{B})^* \mathbf{A}^\top \right)^{-1} = \left(|\mathbf{A}^\top \mathbf{B}| \mathbf{B}^{-1} \mathbf{E} \right)^{-1} = \frac{1}{|\mathbf{A}^\top \mathbf{B}|} \mathbf{B} = 6\mathbf{B}$$

并且 $\left(\mathbf{B}^\top (\mathbf{AB}^\top)^{-1} \mathbf{A}^2 \right)^{-1} = \left(\mathbf{B}^\top (\mathbf{B}^\top)^{-1} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A}^2 \right)^{-1} = \mathbf{A}^{-1}$, 于是

$$\mathbf{X} \left(\mathbf{B}^\top (\mathbf{AB}^\top)^{-1} \mathbf{A}^2 \right)^{-1} (\mathbf{A} + 2\mathbf{B}) = \mathbf{X} \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{A} + 2\mathbf{B}) = \mathbf{X} + 2\mathbf{X} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}$$

那么

$$\mathbf{X} = \frac{1}{2} (6\mathbf{B} + \mathbf{B} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}) (\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B})^{-1} = \frac{1}{2} (6\mathbf{B} + \mathbf{B} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}) (\mathbf{B}^{-1} \mathbf{A}) = 3\mathbf{A} + \frac{1}{2} \mathbf{B}$$

例 10.5.5 (2016 浙江大学). 设矩阵 $A = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ h & x & y \end{pmatrix}$ 的逆矩阵 $A^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & 1 & 0 \\ 0 & -3 & 1 \end{pmatrix}$, 矩阵 $B = \begin{pmatrix} a-2b & b-3 & -c \\ d-2e & e-3f & -f \\ h-2x & x-3y & -y \end{pmatrix}$, 求矩阵 X 使之满足

$$X + \left(B(A^\top B^2)^{-1} A^\top \right)^{-1} = X \left(A^2(B^\top A)^{-1} B^\top \right)^{-1} (A + B).$$

先证 B 是可逆矩阵, 为此, 对行列式 $|B|$ 依次将第 2 列减去第 3 列的 3 倍, 第 1 列加上第 2 列的 2 倍, 再按第 1 行拆项, 得

$$\begin{aligned} |B| &= \begin{vmatrix} a-2b & b-3 & -c \\ d-2e & e-3f & -f \\ h-2x & x-3y & -y \end{vmatrix} \frac{c_2-3c_3}{c_1+2c_2} \begin{vmatrix} a+6c-6 & b+3c-3 & -c \\ d & e & -f \\ h & x & -y \end{vmatrix} = -|A| + 3(c-1) \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 \\ d & e & -f \\ h & x & -y \end{vmatrix} \\ &= 1 - 3(c-1)(2A_{11} - A_{12}) \end{aligned}$$

其中 A_{11}, A_{12} 是矩阵 A 的第 1 行的前两个元素的代数余子式, 另一方面, 易知 $|A^{-1}| = -1$, 所以 $|A| = -1$, 于是, 有

$$A^* = |A|A^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & -1 & 0 \\ 0 & 3 & 1 \end{pmatrix}, \text{由此可知 } A_{11} = 1, A_{12} = 2, \text{于是 } |B| = 1, \text{表明 } B \text{ 是可逆矩阵, 因此}$$

$$\left(B(A^\top B^2)^{-1} A^\top \right)^{-1} = B, X \left(A^2(B^\top A)^{-1} B^\top \right)^{-1} = A^{-1}$$

故原方程可化简为 $X + B = XA^{-1}(A + B) \Rightarrow X(A^{-1}B) = B$, 所以

$$X = B(A^{-1}B)^{-1} = A.$$

例 10.5.6. 设矩阵 $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & 4 \\ 0 & 2 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$, 求解方程

$$X(E_n - B^{-1}A)^\top B^\top = E_n.$$

$$E_n = X(B(E_n - B^{-1}A))^\top = X(BE_n - BB^{-1}A)^\top = X(B - A)^\top \Rightarrow X = ((B - A)^\top)^{-1},$$

$$\begin{aligned} X &= \left(\left(\begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & 4 \\ 0 & 2 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right)^\top \right)^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 \\ 4 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \\ &= \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}^{-1} & \vdots & O \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 4 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}^{-1} & \vdots & \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

例 10.5.7. 设 $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 2 & 5 & 4 \\ 2 & 4 & 5 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, $C = \begin{pmatrix} 1 & 1 & & \\ & 1 & 1 & \\ & & 1 & 1 & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{pmatrix}$, 求 X 使 $X \begin{pmatrix} O & B \\ A & O \end{pmatrix} = C$.

易得 A, B 都可逆, 且 $\begin{pmatrix} O & B \\ A & O \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} O & A^{-1} \\ B^{-1} & O \end{pmatrix}$, 所以 $X = C \begin{pmatrix} O & A^{-1} \\ B^{-1} & O \end{pmatrix}$, 且

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 & C_2 \\ O & C_3 \end{pmatrix}$$

并且 $A^{-1} = \begin{pmatrix} 9 & -2 & -2 \\ -2 & 1 & 0 \\ -2 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, $B^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, 那么

$$X = \begin{pmatrix} C_2 B^{-1} & C_1 A^{-1} \\ C_3 B^{-1} & O \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & : & 7 & -1 & -2 \\ 0 & 0 & : & -4 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & : & -2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & : & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & : & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 8 \end{pmatrix}$$

例 10.5.8. 设 4 阶矩阵 A 的伴随矩阵 $A^* =$

同例题 10.2.6 的解法, 解得 $X = \begin{pmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & -1 \end{pmatrix}$, 由于

$$X^* A = X^* \frac{1}{|A|^{4-2}} (A^*)^* = \frac{1}{4} X^* (A^*)^* = \frac{1}{4} (A^* X)^*$$

$$\begin{aligned} X^* A &= \frac{1}{4} \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & -1 \end{pmatrix} \right)^* = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 0 \\ 12 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & -8 \end{pmatrix}^* \\ &= \begin{pmatrix} |6 & 0| & (6 & 0)^* & \vdots & O \\ 0 & -8 & (0 & 6)^* & \vdots & |6 & 0| \\ 0 & 0 & (12 & 0)^* & \vdots & (6 & 0)^* \\ -\left(\begin{array}{cc} 6 & 0 \\ 0 & -8 \end{array}\right)^* & \left(\begin{array}{cc} 12 & 0 \\ 0 & 6 \end{array}\right)^* & \vdots & |0 & 6| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -72 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -72 & 0 & 0 \\ 144 & 0 & -72 & 0 \\ 0 & -54 & 0 & 54 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

例 10.5.9. 设 4 阶矩阵 $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$, 求解 $\left[\left(\frac{1}{2} A \right)^* \right]^{-1} X A^{-1} = 2AX + 12E_4$.

因为 $|A| = \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 & 2 \\ -1 & 0 \end{vmatrix} = 2$, $\left[\left(\frac{1}{2} A \right)^* \right]^{-1} = \left[\left| \frac{1}{2} A \right| \left(\frac{1}{2} A \right)^{-1} \right]^{-1} = 8 \cdot \frac{1}{2} A = 4A$, 因此原方程变成

$$4AXA^{-1} = 2AX + 12E_4 \Rightarrow 2AXA^{-1} = AX + 6E_4 \Rightarrow X = 6A^{-1}(2A^{-1} - E_4)^{-1} = 6(2E_4 - A)^{-1}$$

$$\begin{aligned} X &= 6 \left(\begin{pmatrix} 2 & & & \\ & 2 & & \\ & & 2 & \\ & & & 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \right)^{-1} = 6 \begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}^{-1} \\ &= 6 \begin{pmatrix} \left(\begin{array}{cc} 1 & -2 \\ -1 & -1 \end{array} \right)^{-1} & O \\ O & \left(\begin{array}{cc} 2 & -2 \\ 1 & 2 \end{array} \right)^{-1} \end{pmatrix} = 6 \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} \begin{pmatrix} -1 & 2 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} & O \\ O & \frac{1}{6} \begin{pmatrix} 2 & 2 \\ -1 & 2 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$= \begin{pmatrix} -2 \begin{pmatrix} -1 & 2 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} & \vdots & O \\ \cdots & \ddots & \vdots \\ O & \vdots & \begin{pmatrix} 2 & 2 \\ -1 & 2 \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & -4 & 0 & 0 \\ -2 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & -1 & 2 \end{pmatrix}.$$

第 11 章

线性方程组

“给我五个系数，我将画出一头大象，
给我六个系数，大象将会摇动尾巴。”

——柯西

线性方程组具有广泛应用，科学技术和工程中的大量问题往往归结为求解线性方程组。特别是计算机的快速发展，使得求解含有成千上万个未知量的线性方程组成为可能，而这依赖于建立了统一的、程序化的求解线性方程组的有效算法。

线性方程组是线性代数的理论基础，是研究线性代数其他内容的有力工具，在线性代数中占有重要地位。

11.1 向量组的线性相关性

11.1.1 向量的概念

11.1.2 向量的线性组合

定义 11.1.1 (线性组合). 由 m 个 n 维向量 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 和 m 个常数 k_1, k_2, \dots, k_m 所构成的向量

$$k_1\alpha_1 + k_2\alpha_2 + \cdots + k_m\alpha_m$$

称为向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 的一个线性组合。

定义 11.1.2 (线性表示). 对于向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 和向量 β , 若存在 m 个常数 k_1, k_2, \dots, k_m , 使得

$$\beta = k_1\alpha_1 + k_2\alpha_2 + \cdots + k_m\alpha_m$$

则称向量 β 是向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 的线性组合, 或者说向量 β 可以由向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 线性表出, k_1, k_2, \dots, k_m 称为这个线性组合的系数。

定义 11.1.3 (向量组间的线性表示). 设有两个 n 维向量组 $\mathbf{A} : \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s$ 和 $\mathbf{B} : \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_t$, 若 \mathbf{B} 组中的每个向量 β_i ($i = 1, 2, \dots, t$) 都能由向量组 \mathbf{A} 中的向量 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s$ 线性表示, 则称向量组 \mathbf{B} 能由向量组 \mathbf{A} 线性表示, 对应矩阵方程 $\mathbf{AX} = \mathbf{B}$, 其中, $\mathbf{A} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s)$, $\mathbf{B} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_t)$.

定义 11.1.4 (线性相关、线性无关). 设 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 是 m 个向量, 对于方程

$$\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha_2 + \dots + \lambda_m\alpha_m = \mathbf{0}$$

若有其非零解 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m) \neq \mathbf{0}$, 则称 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 线性相关; 若其只有唯一解 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m) = \mathbf{0}$, 则称 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 线性无关.

定理 11.1.1 (向量组线性相关的若干结论). (1) 向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ ($m \geq 2$) 线性相关的充分必要条件是 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 中至少有一个向量可由其余 $m - 1$ 个向量线性表示;

- (2) 若向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 线性无关, 而向量组 $\beta, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 线性相关, 则 β 可由 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 线性表示, 且表示式是唯一的;
- (3) 对于 m 个 n 维向量 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$, 若 $m > n$, 则这 m 个向量必线性相关;
- (4) 若 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r$ 线性相关, 则 $\alpha_1, \dots, \alpha_r, \alpha_{r+1}, \dots, \alpha_m$ 也线性相关; (部分相关, 整体必相关.)
- (5) 若 r 维向量组线性无关, 则将它的每个向量添加 $n - r$ 个分量所成的 n 维向量组也线性无关. (整体无关, 部分必无关.)

例 11.1.1 (2014 数一). 设 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 均为 3 维向量, 则对任意常数 k, l , 向量组 $\alpha_1 + k\alpha_3, \alpha_2 + l\alpha_3$ 线性无关是向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 线性无关的

- A. 必要非充分条件
- B. 充分非必要条件
- C. 充分必要条件
- D. 既非充分也非必要条件

整体无关, 部分必无关; 部分相关, 整体必相关. 设 $\lambda_1(\alpha_1 + k\alpha_3) + \lambda_2(\alpha_2 + l\alpha_3) = \mathbf{0}$ 则

$$\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha_2 + (k\lambda_1 + l\lambda_2)\alpha_3 = \mathbf{0}$$

若 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 线性无关, 则 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$, 所以 $\alpha_1 + k\alpha_3, \alpha_2 + l\alpha_3$ 线性无关; 反之, 若 $\alpha_1 + k\alpha_3, \alpha_2 + l\alpha_3$ 线性无关, 则不一定有 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 线性无关, 例如: 设

$$\alpha_1 = (1, 0, 0)^\top, \alpha_2 = (0, 1, 0)^\top, \alpha_3 = (0, 0, 0)$$

显然, 对任意常数 k, l , 向量组 $\alpha_1 + k\alpha_3, \alpha_2 + l\alpha_3$ 线性无关, 但 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 线性相关, 因此是必要非充分条件, 选 A.

例 11.1.2. 设 $\mathbf{A}_{n \times n} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 的前 $n - 1$ 个向量线性相关, 后 $n - 1$ 个向量线性无关, 且 $\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n$, 证明: $\mathbf{Ax} = \beta$ 有无穷多解.

证法一 要证 $\mathbf{Ax} = \beta$ 有无穷多解, 即证 $\text{rank } \mathbf{A} = \text{rank}(\mathbf{A}, \beta) < n$, 因为 $\alpha_2, \dots, \alpha_n$ 线性无关, 所以 $\text{rank } \mathbf{A} \geq n - 1$, 又因为 $\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}$ 线性相关, 所以 $\text{rank } \mathbf{A} < n$, 于是

$$n - 1 \leq \text{rank } \mathbf{A} < n \Rightarrow \text{rank } \mathbf{A} = n - 1$$

又因为 $\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_n$, 所以

$$\text{rank}(\mathbf{A}, \beta) = \text{rank}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_n) \rightarrow \text{rank}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \mathbf{0}) = \text{rank } \mathbf{A} = n - 1$$

故得证 $\text{rank } \mathbf{A} = \text{rank}(\mathbf{A}, \beta) < n$, 因此 $\mathbf{Ax} = \beta$ 有无穷多解成立.

证法二 因为 $\underbrace{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-1}, \alpha_n}_{\substack{\text{线性无关} \\ \text{线性相关}}}$, 所以 $\alpha_2, \dots, \alpha_{n-1}$ 线性无关, 因此 α_1 可由 $\alpha_2, \dots, \alpha_{n-1}$ 线性表示, 即 $\alpha_1 = l_2\alpha_2 + l_3\alpha_3 + \cdots + l_{n-1}\alpha_{n-1} + 0 \cdot \alpha_n$, 将其代入 β 得

$$\beta = l_2\alpha_2 + l_3\alpha_3 + \cdots + l_{n-1}\alpha_{n-1} + 0 \cdot \alpha_n + (\alpha_2 + \cdots + \alpha_n) = (l_2 + 1)\alpha_2 + (l_3 + 1)\alpha_3 + \cdots + (l_{n-1} + 1)\alpha_{n-1} + \alpha_n$$

那么 $\mathbf{Ax} = \beta$ 的一个解为 $(0, l_2 + 1, l_3 + 1, \dots, l_{n-1} + 1, 1)^\top$, 又因为 $\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_n$, 所以 $\mathbf{Ax} = \beta$ 的另一解为 $(1, 1, \dots, 1)^\top$, 而这两个解不相关, 则 $\mathbf{Ax} = \beta$ 有无穷多解.

11.1.3 向量组的极大无关组

定义 11.1.5 (极大线性无关组). 设 \mathbf{A} 是一个 n 维向量组 (它可以包含无限多个向量), 如果在 \mathbf{A} 中取出 r 个向量 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r$ 满足条件:

- (1) 向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r$ 线性无关;
- (2) 对于 \mathbf{A} 中任意的向量 β , 向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r, \beta$ 线性相关.

则称向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r$ 为向量组 \mathbf{A} 的一个极大线性无关组, 简称极大无关组.

例 11.1.3. 求向量组

$$\beta_1 = (1, 2, 1, 3)^\top, \beta_2 = (1, 1, -1, 1)^\top, \beta_3 = (1, 3, 3, 5)^\top,$$

$$\beta_4 = (4, 5, -3, 6)^\top, \beta_5 = (-3, -5, -2, -7)^\top$$

的秩、极大线性无关组, 并将其余的向量用极大线性无关组表示出.

令 $\mathbf{B} = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5)$ 对列向量组作初等行变换, 有

$$\mathbf{B} \xrightarrow[r_2-2r_1]{r_3-r_1} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 4 & -3 \\ 0 & -1 & 1 & -3 & 1 \\ 0 & -2 & 2 & -7 & 1 \\ 0 & -2 & 2 & -6 & 2 \end{pmatrix} \xrightarrow[r_2 \times (-1)]{r_3 \times (-1)} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 & 1 & -2 \\ 0 & 1 & -1 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & -\bar{0} & \bar{1} & -\bar{1} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{0} & -\bar{0} \end{pmatrix} = (\beta'_1, \beta'_2, \beta'_3, \beta'_4, \beta'_5)$$

于是 $\text{rank}(\mathbf{B}) = 3$, 那么 $\beta'_1, \beta'_2, \beta'_3$ 为 \mathbf{B} 的一个极大无关组, 且

$$\begin{aligned} \beta'_3 &= 2\beta'_1 - \beta'_2 \\ \beta'_5 &= -3\beta'_1 - 4\beta'_2 + \beta'_4 \end{aligned}$$

例 11.1.4 (2006 数三). 设 4 维向量组

$$\alpha_1 = (1 + a, 1, 1, 1)^\top, \alpha_2 = (2, 2 + a, 2, 2)^\top,$$

$$\alpha_3 = (3, 3, 3 + a, 3)^\top, \alpha_4 = (4, 4, 4, 4 + a)^\top$$

问 a 为何值时, α_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 线性相关? 当 α_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 时, 求出一个极大线性无关组, 并将其余的向量用极大线性无关组表示出.

记 $\mathbf{A} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$, 那么其行列式

$$\left| \begin{array}{cccc} 1+a & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2+a & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3+a & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4+a \end{array} \right| \xrightarrow{j=2,3,4} \left| \begin{array}{cccc} 10+a & 2 & 3 & 4 \\ 10+a & 2+a & 3 & 4 \\ 10+a & 2 & 3+a & 4 \\ 10+a & 2 & 3 & 4+a \end{array} \right| \xrightarrow{i=2,3,4} (10+a) \left| \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a \end{array} \right| = (10+a)a^3$$

于是当 $a = 0$ 或 -10 时, α_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 线性相关, 当 $a = 0$ 时, α_1 为 α_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 的一个极大线性无关组, 且 $\alpha_2 = 2\alpha_1, \alpha_3 = 3\alpha_1, \alpha_4 = 4\alpha_1$; 当 $a = -10$ 时, 对 \mathbf{A} 实施初等行变换, 有

$$\left(\begin{array}{cccc} -9 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & -8 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & -7 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & -6 \end{array} \right) \xrightarrow{i=2,3,4} \left(\begin{array}{cccc} -9 & 2 & 3 & 4 \\ 10 & -10 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & -10 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & -10 \end{array} \right) \xrightarrow{r_i \times \frac{1}{10}, i=2,3,4} \left(\begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right) = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4)$$

由于 β_i ($i = 2, 3, 4$) 是 β_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 的一个极大线性无关组, 且 $\beta_1 = -\beta_2 - \beta_3 - \beta_4$, 故 α_i ($i = 2, 3, 4$) 是 α_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 的一个极大线性无关组, 且 $\alpha_1 = -\alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4$.

例 11.1.5. 已知向量组 $\alpha_1 = (1, 4, 0, 2)^\top, \alpha_2 = (2, 7, 1, 3)^\top, \alpha_3 = (0, 1, -1, a)^\top, \alpha_4 = (3, 10, b, 4)^\top$ 线性相关.

(1) 判断 α_4 能否由 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 线性表示? 如能就写出表达式;

(2) 求向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 的一个极大线性无关组.

$$(1) |\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4| = \left| \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 0 & 3 \\ 4 & 7 & 1 & 10 \\ 0 & 1 & -1 & b \\ 2 & 3 & a & 4 \end{array} \right| \xrightarrow{\substack{r_2-4r_1 \\ r_4-2r_1}} \left| \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & b-2 \\ 0 & 1 & -1 & b \\ 0 & 0 & a-1 & b-2 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{ccc} 0 & 0 & b-2 \\ 1 & -1 & b \\ 0 & a-1 & b-2 \end{array} \right| = (a-1)(b-2) = 0, \text{ 所以当 } a = 1 \text{ 或 } b = 2 \text{ 时, 向量组 } \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4 \text{ 线性相关.}$$

$$\text{当 } a = 1 \text{ 时, } (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \mid \alpha_4) = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & 0 & 3 \\ 4 & 7 & 1 & 10 \\ 0 & 1 & -1 & b \\ 2 & 3 & 1 & 4 \end{array} \right) \xrightarrow{\substack{r_2-4r_1 \\ r_4-2r_1 \\ r_4-r_2 \\ r_3+r_2 \\ r_2 \times (-1)}} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & -1 & 2 \\ 0 & 0 & -1 & b-2 \\ 0 & 0 & 0 & -b \end{array} \right), \text{ 当 } b \neq 2 \text{ 时, 增广矩阵秩为 } 3, \text{ 系数矩阵秩为 } 2, \text{ 因此 } \alpha_4 \text{ 不能由 } \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \text{ 线性表示; 当 } a = 1, b = 2 \text{ 时, } \alpha_4 \text{ 可以由 } \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \text{ 线性表示, }$$

$$\alpha_4 = (-1-2t)\alpha_1 + (2+t)\alpha_2 + t\alpha_3$$

$$\text{当 } b = 2 \text{ 时, } (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \mid \alpha_4) = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & 0 & 3 \\ 4 & 7 & 1 & 10 \\ 0 & 1 & -1 & 2 \\ 2 & 3 & a & 4 \end{array} \right) \xrightarrow{\substack{r_2-4r_1 \\ r_4-2r_1 \\ r_4-r_2 \\ r_3+r_2 \\ r_2 \times (-1) \\ r_3 \leftrightarrow r_4}} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & -1 & 2 \\ 0 & 0 & a-1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right), \text{ 当 } a \neq 1, b = 2 \text{ 时, 有 }$$

$\alpha_4 = -\alpha_1 + 2\alpha_2$, 当 $a = 1, b = 2$, 有 $\alpha_4 = (-1-2t)\alpha_1 + (2+t)\alpha_2 + t\alpha_3$, 其中 t 为任意常数.

$$(2) \text{ 当 } a = 1, b = 2 \text{ 时, } \text{rank}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = \text{rank} \left(\begin{array}{cccc} 1 & 2 & 0 & 3 \\ 4 & 7 & 1 & 10 \\ 0 & 1 & -1 & 2 \\ 2 & 3 & 1 & 4 \end{array} \right) = \text{rank} \left(\begin{array}{cccc} 1 & 2 & 0 & 3 \\ 0 & -1 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) = 2, \text{ 极大无关组为 } \alpha_1, \alpha_2; \text{ 当 } a = 1, b \neq 2 \text{ 时, } \text{rank}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = 3, \text{ 极大无关组为 } \alpha_1, \alpha_2, \alpha_4; \text{ 当 } a \neq 1, b = 2 \text{ 时, } \text{rank}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = 3, \text{ 极大无关组为 } \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3.$$

11.1.4 Cramer 法则的应用

定理 11.1.2 (Cramer 法则). 如果数域 K 上的含有 n 个未知量 n 个方程的线性方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \cdots \cdots \cdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

的系数行列式 $D \neq 0$, 那么此方程组有唯一解 $\left(\frac{D_1}{D}, \frac{D_2}{D}, \dots, \frac{D_n}{D}\right)$, 其中 D_j 是把 D 中第 j 列的元素换成方程组的常数项 b_1, b_2, \dots, b_n 而成的行列式 ($j = 1, 2, \dots, n$), 即

$$\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1,j-1} & b_1 & a_{1,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2,j-1} & b_2 & a_{2,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n,j-1} & b_n & a_{n,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$$

特别地, 当 $b_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 时, 如果系数行列式 $D \neq 0$, 那么方程组只有零解; 反之, 如果方程组有非零解, 那么必有 $D = 0$.

例 11.1.6 (2005 华中科技大学). 解线性方程组 $\begin{cases} x_1 + ax_2 + a^2x_3 = a^3 \\ x_1 + bx_2 + b^2x_3 = b^3 \\ x_1 + cx_2 + c^2x_3 = c^3 \end{cases}$ 其中 a, b, c 是互不相等的常数.

利用 Cramer 法则求解, 因为系数行列式

$$D = \begin{vmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & b & b^2 \\ 1 & c & c^2 \end{vmatrix} = (c-b)(c-a)(b-a) \neq 0$$

所以方程组有唯一解, 又因为

$$D_1 = \begin{vmatrix} a^3 & a & a^2 \\ b^3 & b & b^2 \\ b^3 & b & b^2 \end{vmatrix} = abcD, D_2 = \begin{vmatrix} 1 & a^3 & a^2 \\ 1 & b^3 & b^2 \\ 1 & c^3 & c^2 \end{vmatrix} = -(ab+ac+bc)D, D_3 = \begin{vmatrix} 1 & a & a^3 \\ 1 & b & b^3 \\ 1 & c & c^3 \end{vmatrix} = (a+b+c)D$$

因此 $x_1 = \frac{D_1}{D} = abc, x_2 = \frac{D_2}{D} = -ab-ac-bc, x_3 = \frac{D_3}{D} = a+b+c$.

11.2 向量组的秩

11.2.1 向量组的线性表示

定义 11.2.1 (向量组的秩). 向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s$ 的极大线性无关组所含向量个数称为向量组的秩, 记为

$$\text{rank}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k).$$

定理 11.2.1. 若向量组 α_i ($i = 1, 2, \dots, s$) 可以由向量组 β_j ($j = 1, 2, \dots, t$) 表示, 则

$$\text{rank}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s) \leqslant \text{rank}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_t).$$

证 由于 α_i 可由 β_j 线性表示, 不妨设

$$\alpha_i = \sum_{k=1}^t x_{ik} \beta_k$$

故

$$(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s) = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_t) \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1t} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{s1} & x_{s2} & \cdots & x_{st} \end{pmatrix}$$

由于矩阵乘积的秩小于等于每一个，则

$$\text{rank}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s) \leq \text{rank} \min \left\{ (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_t), \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1t} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{s1} & x_{s2} & \cdots & x_{st} \end{pmatrix} \right\}$$

即 $\text{rank}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s) \leq \text{rank}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_t)$.

例 11.2.1. 设 n 维向量组 $(I) : \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ ($k < n$) 线性无关，则 n 维向量组 $(II) : \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 也线性无关的充要条件为

- A. $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 可由 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ 线性表示
- B. $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ 可由 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 线性表示
- C. 向量组 (I) 与向量组 (II) 等价
- D. 矩阵 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$ 与矩阵 $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$ 等价

对于 A 选项，因为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 可由 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ 线性表示，所以 $\text{rank}(II) \leq \text{rank}(I)$ ，而向量组 (I) 线性无关，所以 $\text{rank}(I) = k$ ，即 $\text{rank}(II) \leq k$ ，由于无法保证 $\text{rank}(II) = k$ ，故不能得出 (II) 线性无关；

对于 B 选项，因为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ 可由 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 线性表示，所以 $\text{rank}(I) \leq \text{rank}(II)$ ，同样地，

$$k = \text{rank}(I) \leq \text{rank}(II) \leq k \Rightarrow \text{rank}(II) = k$$

因此 (II) 线性无关，充分条件成立，但不是必要条件，如 $(I) : \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ 与 $(II) : \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ 均线性无关，但 (I) 不能由 (II) 线性表示；

对于 C 选项，由 (I) 与 (II) 等价知 (I) 与 (II) 可相互线性表示，则 $\text{rank}(I) = \text{rank}(II) = k$ ，故 (II) 线性无关，充分条件成立，同 B 选项知必须条件不成立；

因为矩阵 $A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$ 与矩阵 $B = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$ 等价，则 $\text{rank } A = \text{rank } B = k$ ，又 $(I) : \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ ($k < n$) 线性无关，即 $\text{rank } A = \text{rank } B = k$ ，故 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 线性无关，故选 D.

例 11.2.2. 已知 n 维向量组

$$(I) : \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s, (II) : \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_t$$

且 $\text{rank}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s) = \text{rank}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_t) = r$ ，则

- A. 当 $s = r$ 时，向量组 (I) 与 (II) 等价
- B. 当 $s = t = r$ 时，向量组 (I) 与 (II) 等价
- C. 当 $\text{rank}(\alpha_1, \dots, \alpha_s, \beta_1, \dots, \beta_t) = r$ 时，向量组 (I) 与 (II) 等价
- D. 当 $\text{rank}(\alpha_1, \dots, \alpha_s, \beta_1, \dots, \beta_t) = 2r$ 时，向量组 (I) 与 (II) 等价

记向量组 $(III) : \alpha_1, \dots, \alpha_s, \beta_1, \dots, \beta_t$ ，取 I 和 II 的一个极大无关组 $(I_0) : \alpha_{i_1}, \alpha_{i_2}, \dots, \alpha_{i_r}$ 与 $(II_0) : \beta_{j_1}, \beta_{j_2}, \dots, \beta_{j_r}$ ，那么向量组 (I) 与 (I_0) 等价，向量组 (II) 与 (II_0) 的等价，如果 $\text{rank}(III) = r$ ，那么向量组 (I_0) 与 (II_0) 都是 (III) 的一个极大无关组，这表明向量组 (I_0) 与 (II_0) 等价，因此，向量组 (I) 与 (II) 等价。

另外，考虑向量组

$$(I) : \alpha_1 = (1, 0, 0, 0)^\top, \alpha_2 = (0, 1, 0, 0)^\top, (II) : \beta_1 = (0, 0, 1, 0)^\top, \beta_2 = (0, 0, 0, 1)^\top$$

则 $\text{rank}(\alpha_1, \alpha_2) = \text{rank}(\beta_1, \beta_2) = 2$ ， $\text{rank}(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) = 4$ ，但选项 A、B、D 均不成立。

11.2.2 向量组相互表示

例 11.2.3 (2000 数二). 已知向量组 $\beta_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$, $\beta_2 = \begin{pmatrix} a \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\beta_3 = \begin{pmatrix} b \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ 与向量组 $\alpha_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ -3 \end{pmatrix}$,

$\alpha_2 = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\alpha_3 = \begin{pmatrix} 9 \\ 6 \\ -7 \end{pmatrix}$ 具有相同的秩, 且 β_3 可由 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 线性表示, 求 a, b 的值.

易知 α_1, α_2 线性无关, $\alpha_3 = 3\alpha_1 + 2\alpha_2$, 即 α_3 可由 α_1, α_2 线性表示, 所以向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 的秩为 2, 且 α_1, α_2 是它的一个极大无关组, 由于向量组 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 与 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 具有相同的秩, 故 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 线性相关, 从而行列式

$$|\beta_1, \beta_2, \beta_3| = \begin{vmatrix} 0 & a & b \\ 1 & 2 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 0 \Rightarrow a = 3b$$

又 β_3 可由 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 线性表示, 而 α_3 可由 α_1, α_2 线性表示, 所以 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_3$ 线性相关, 于是

$$|\alpha_1, \alpha_2, \beta_3| = \begin{vmatrix} 1 & 3 & b \\ 2 & 0 & 1 \\ -3 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 0 \Rightarrow b = 5 \Rightarrow a = 15.$$

例 11.2.4 (2016 南京航空航天大学). 设由向量组

$$(I) : \alpha_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ a \end{pmatrix}, \alpha_2 = \begin{pmatrix} -2 \\ a \\ 4 \end{pmatrix}, \alpha_3 = \begin{pmatrix} -2 \\ a \\ a \end{pmatrix}, (II) : \beta_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ a \end{pmatrix}, \beta_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ 1 \end{pmatrix}, \beta_3 = \begin{pmatrix} a \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

(1) 求 a 的值, 使得向量组 (I) 线性相关;

(2) 求 a 的值, 使得向量组 (I) 不能由向量组 (II) 线性表示;

(3) 在题 (1) 和 (2) 同时成立的条件下, 将向量 $\gamma = (1, -2, -5)^\top$ 用 $\beta_1, \beta_2, \alpha_3$ 线性表示.

(1) 令 $A = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$, 则行列式 $\det A = 0$ 等价于向量组 (I) 线性相关, 则

$$\begin{vmatrix} 1 & -2 & -2 \\ 1 & a & a \\ a & 4 & a \end{vmatrix} = a^2 - 2a - 8 = 0 \Rightarrow a = 4 \text{ 或 } -2.$$

(2) 令 $B = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$, 由于向量组 (I) 不能由 (II) 线性表示, 说明向量组 (II) 线性相关, 如若不然, 则任一 α_i , 可由向量组 (II) 线性表示, 矛盾, 因此, $\det B = 0$, 则

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & a \\ 1 & a & 1 \\ a & 1 & 1 \end{vmatrix} = (a-1)^2(a+2) = 0 \Rightarrow a = 1 \text{ 或 } a = -2$$

当 $a = 1$ 时, α_3 显然不能由 β_j ($j = 1, 2, 3$) 线性表示, 符合题意; 当 $a = -2$ 时, 将 $(B : A)$ 化简为行阶梯形, 有

$$(B : A) = \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 1 & -2 & 1 & -2 & -2 \\ 1 & -2 & 1 & 1 & -2 & -2 \\ -2 & 1 & 1 & -2 & 4 & -2 \end{array} \right) \xrightarrow[r_3 \times (-\frac{1}{6})]{r_3 + r_2} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 1 & -2 & 1 & -2 & -2 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \xrightarrow[r_2 \times (-\frac{1}{3})]{r_1 - r_2} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & -1 & 1 & -2 & -2 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

由此可见, α_3 不能由 β_i ($i = 1, 2, 3$) 线性表示, 所以 $a = -2$ 也符合题意.

(3) 若 (1) 和 (2) 同时成立, 则 $a = -2$, 此时, 把 $(\beta_1, \beta_2, \alpha_3, \gamma)$ 化为行最简形, 有

$$(\beta_1, \beta_2, \alpha_3 : \gamma) = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & -2 & -2 \\ -2 & 1 & -2 & -5 \end{array} \right) \rightarrow \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right)$$

因为初等行变换不改变列向量之间的线性关系, 所以 $\gamma = 2\beta_1 + \beta_2 + \alpha_3$.

11.3 齐次线性方程组

11.3.1 齐次方程组的一般解

定理 11.3.1. 齐次方程组 $\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{0}$ 有非零解的充分必要条件为 $\text{rank } \mathbf{A} < n$, 此时它的通解为

$$\mathbf{x} = k_1 \boldsymbol{\xi}_1 + k_2 \boldsymbol{\xi}_2 + \cdots + k_{n-r} \boldsymbol{\xi}_{n-r}$$

其中 $r = \text{rank } \mathbf{A}$, $k_i \in K$ 为任意常数 ($i = 1, 2, \dots, n-1$), $\boldsymbol{\xi}_1, \boldsymbol{\xi}_2, \dots, \boldsymbol{\xi}_{n-r}$ 为方程组的一个基础解系.

例 11.3.1. 讨论当 a, b 取何值时, 线性方程组

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 1 \\ 3x_1 + 2x_2 + x_3 + x_4 - 3x_5 = a \\ x_2 + 2x_3 + 2x_4 + 6x_5 = 3 \\ 5x_1 + 4x_2 + 3x_3 + 3x_4 - x_5 = b \end{array} \right.$$

有解? 无解? 并求出有解时的一般解.

对方程组的增广矩阵施行初等行变换, 化为简化的行阶梯形矩阵:

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 : 1 \\ 3 & 2 & 1 & 1 & -3 : a \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 6 : 3 \\ 5 & 4 & 3 & 3 & -1 : b \end{array} \right) \xrightarrow{\begin{array}{l} r_2 \leftrightarrow r_3 \\ r_3 - 3r_1 \\ r_4 - 5r_1 \\ r_1 - r_2 \end{array}} \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & -1 & -1 & -5 : -2 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 6 : 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 : a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 : b-2 \end{array} \right)$$

(1) 当 $a \neq 0$ 或 $b \neq 2$ 时, 方程组无解;

(2) 当 $a = 0$ 且 $b = 2$ 时, 方程组有解, 此时, 易知方程组的一般解为

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + k_1 \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + k_2 \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + k_3 \begin{pmatrix} 5 \\ -6 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

其中 k_1, k_2, k_3 为任意常数.

例 11.3.2. 求 λ 的值, 使齐次线性方程组

$$\left\{ \begin{array}{l} (\lambda+3)x_1 + x_2 + 2x_3 = 0 \\ \lambda x_1 + (\lambda-1)x_2 + x_3 = 0 \\ 3(\lambda+1)x_1 + \lambda x_2 + (\lambda+3)x_3 = 0 \end{array} \right.$$

有非零解, 并求出其一般解.

方程组的系数行列式为

$$D = \begin{vmatrix} \lambda+3 & 1 & 2 \\ \lambda & \lambda-1 & 1 \\ 3\lambda+3 & \lambda & \lambda+3 \end{vmatrix} = \lambda^2(\lambda-1)$$

所以 $\lambda = 0$ 或 $\lambda = 1$ 时齐次方程组有非零解, 进一步, 当 $\lambda = 0$ 时, 对方程组的系数矩阵施行初等行变换, 得 $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$,

此时, 方程的一般解为 $\mathbf{x} = k(-1, 1, 1)$; 当 $\lambda = 1$ 时, 系数矩阵可化为 $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, 于是, 可求得方程的一般解为 $\mathbf{x} = k(-1, 2, 1)$, 其中 k 为任意常数.

例 11.3.3. 设向量 $\alpha = (1, 2, 1)^\top$, $\beta = \left(1, \frac{1}{2}, 0\right)^\top$, $\gamma = (0, 0, 8)^\top$, 记

$$\mathbf{A} = \alpha\beta^\top, \quad \mathbf{B} = \beta^\top\alpha$$

求线性方程组 $2\mathbf{B}^2\mathbf{A}^2\mathbf{x} = \mathbf{A}^4\mathbf{x} + \mathbf{B}^4\mathbf{x} + \gamma$.

由题意可知,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1, \frac{1}{2}, 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{1}{2} & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1, \frac{1}{2}, 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} = 2$$

于是

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^2 &= (\alpha\beta^\top)(\alpha\beta^\top) = \alpha(\beta^\top\alpha)\beta^\top = (\beta^\top\alpha)\alpha\beta^\top = 2\mathbf{A} \\ \mathbf{A}^4 &= (\mathbf{A}^2)^2 = (2\mathbf{A})^2 = 4\mathbf{A}^2 = 8\mathbf{A} \end{aligned}$$

代入方程组, 得

$$16\mathbf{A}\mathbf{x} = 8\mathbf{A}\mathbf{x} + 16\mathbf{x} + \gamma \Rightarrow (\mathbf{A} - 2\mathbf{E}_3)\mathbf{x} = \frac{1}{8}\gamma \Rightarrow \begin{pmatrix} -1 & \frac{1}{2} & 0 \\ 2 & -1 & 0 \\ 1 & \frac{1}{2} & -2 \end{pmatrix} \mathbf{x} = (0, 0, 1)^\top$$

则有增广矩阵 $\mathbf{M} = \begin{pmatrix} -1 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 2 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & \frac{1}{2} & -2 & 1 \end{pmatrix}$, 并对 \mathbf{M} 实行初等行变换, 有

$$\begin{pmatrix} -1 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 2 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & \frac{1}{2} & -2 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow[r_1 \times (-1)]{r_2 - 2r_1, r_3 - r_1} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}$$

所以线性方程组的通解为

$$(x_1, x_2, x_3)^\top = k(1, 2, 1)^\top + \left(\frac{1}{2}, 1, 0\right)^\top, \quad k \in \mathbb{R}.$$

11.3.2 齐次方程组的基础解系

例 11.3.4 (2005 南开大学). 设齐次线性方程组

$$\begin{cases} x_2 + ax_3 + bx_4 = 0 \\ -x_1 + cx_3 + dx_4 = 0 \\ ax_1 + cx_2 - ex_4 = 0 \\ bx_1 + dx_2 - ex_3 = 0 \end{cases}$$

的一般解以 x_3, x_4 为未知量,

(1) 求 a, b, c, d, e 满足的条件;

(2) 求齐次线性方程组的基础解系.

(1) 对方程组的系数矩阵施行初等行变换, 得

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & a & b \\ -1 & 0 & c & d \\ a & c & 0 & -e \\ b & d & -e & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & -c & -d \\ 0 & 1 & a & b \\ 0 & 0 & bc - e - ad & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ad - e - bc \end{pmatrix}$$

显然, 欲使方程组的一般解以 x_3, x_4 为自由未知量, 必需 $\begin{cases} bc - ad - e = 0 \\ ad - bc - e = 0 \end{cases}$, 即 $\begin{cases} ad = bc \\ e = 0 \end{cases}$.

(2) 当 a, b, c, d, e 满足 (1) 的条件时, 根据上述初等变换结果可得方程组的基础解系为

$$\xi_1 = (c, -a, 1, 0)^\top, \xi_2 = (d, -b, 0, 1)^\top.$$

例 11.3.5 (2005 西安电子科技大学). 设四元齐次线性方程组为

$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 - x_3 = 0 \\ x_1 + 2x_2 + x_3 - x_4 = 0 \end{cases} \quad (I)$$

已知另一四元齐次线性方程组 (II) 的基础解系为

$$\alpha_1 = (2, -1, a+2, 1)^\top, \alpha_2 = (-1, 2, 4, a+8)^\top$$

(1) 求方程组 (I) 的基础解系;

(2) 问当 a 为何值时, 方程组 (I) 与 (II) 有非零公共解? 在有非零公共解时, 求出全部非零公共解.

(1) 方程组 (I) 的系数矩阵为 $\begin{pmatrix} 2 & 3 & -1 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & -1 \end{pmatrix}$, 可用初等行变换化为 $\begin{pmatrix} 1 & 0 & -5 & 3 \\ 0 & 1 & 3 & -2 \end{pmatrix}$, 故 (I) 的基础解系为 $\beta_1 = (5, -3, 1, 0)^\top, \beta_2 = (-3, 2, 0, 1)^\top$.

(2) 显然, 方程组 (I) 和方程组 (II) 有非零公共解等价于

$$k_1\beta_1 + k_2\beta_2 = k_3\alpha_1 + k_4\alpha_2$$

其中 k_1 与 k_2 不同时为 0, 这归结于关于 $k_i, i = 1, 2, 3, 4$ 的齐次线性方程组

$$k_1\beta_1 + k_2\beta_2 - k_3\alpha_1 - k_4\alpha_2 = 0 \quad (III)$$

有非零解, 且 k_1, k_2 不同时为零, 对 (III) 的系数矩阵施行初等行变换, 得

$$A = \begin{pmatrix} 5 & -3 & -2 & 1 \\ -3 & 2 & 1 & -2 \\ 1 & 0 & -a-2 & -4 \\ 0 & 1 & -1 & -a-8 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & -a-2 & -4 \\ 0 & 1 & -1 & -a-8 \\ 0 & 0 & a+1 & -a-1 \\ 0 & 0 & 0 & a+1 \end{pmatrix}$$

可见, 当 $a \neq -1$ 时, $\text{rank } A = 4$, 方程组 (III) 仅有零解; 当 $a = -1$ 时, $\text{rank } A = 2$ 方程组 (III) 有非零解, 其通解为

$$k = c_1(1, 1, 1, 0) + c_2(4, 7, 0, 1)$$

注意到 $\begin{cases} k_1 = c_1 + 4c_2 \\ k_2 = c_1 + 7c_2 \end{cases}$ 所以 k_1, k_2 同时为零当且仅当 c_1, c_2 同时为零, 综上所述, 当且仅当 $a = -1$ 时, 方程组 (I) 和方程组 (II) 有非零公共解, 且全部非零公共解为 $k_1 + \beta_1 + k_2\beta_2$, 其中 k_1, k_2 取不同时为零的任意常数.

11.4 非齐次线性方程组

11.4.1 方程组与行列式

例 11.4.1. 已知线性方程组 $\begin{cases} ax_1 + x_3 = 1 \\ x_1 + ax_2 + x_3 = 0 \\ x_1 + 2x_2 + ax_3 = 0 \\ ax_1 + bx_2 = 2 \end{cases}$ 有解, 其中 a, b 为常数, 若 $\begin{vmatrix} a & 0 & 1 \\ 1 & a & 1 \\ 1 & 2 & a \end{vmatrix} = 4$,

$$\text{求 } \begin{vmatrix} 1 & a & 1 \\ 1 & 2 & a \\ a & b & 0 \end{vmatrix}.$$

设 \mathbf{x} 的系数矩阵为 \mathbf{A} , $(1, 0, 0, 2)^\top = \mathbf{b}$, 因为方程组有解, 则 $\text{rank}(\mathbf{A}, \mathbf{b}) = \text{rank}(\mathbf{A})$, 由于 $\begin{vmatrix} a & 0 & 1 \\ 1 & a & 1 \\ 1 & 2 & a \end{vmatrix} = 4 \neq 0$, 所以 $\text{rank } \mathbf{A} \geq 3$, 又因为 $\mathbf{A}_{4 \times 3}$, 所以 $\text{rank } \mathbf{A} \leq 3$, 于是

$$\text{rank } \mathbf{A} = 3 \Rightarrow \text{rank}(\mathbf{A}, \mathbf{b}) = 3 \Rightarrow \det(\mathbf{A}, \mathbf{b}) = 0$$

对行列式 $\det(\mathbf{A}, \mathbf{b})$ 按最后一列展开, 得

$$\det(\mathbf{A}, \mathbf{b}) = -\begin{vmatrix} 1 & a & 1 \\ 1 & 2 & a \\ a & b & 0 \end{vmatrix} + 2 \begin{vmatrix} a & 0 & 1 \\ 1 & a & 1 \\ 1 & 2 & a \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{vmatrix} 1 & a & 1 \\ 1 & 2 & a \\ a & b & 0 \end{vmatrix} = 8.$$

11.4.2 线性相关与线性无关

线性无关

$$\text{例 11.4.2 (2009 数一). 设 } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & -4 & -2 \end{pmatrix}, \boldsymbol{\xi}_1 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix},$$

(1) 求满足 $\mathbf{A}\boldsymbol{\xi}_2 = \boldsymbol{\xi}_1$, $\mathbf{A}^2\boldsymbol{\xi}_3 = \boldsymbol{\xi}_1$ 的所有向量 $\boldsymbol{\xi}_2$, $\boldsymbol{\xi}_3$;

(2) 对 (1) 中的任意向量 $\boldsymbol{\xi}_2$, $\boldsymbol{\xi}_3$, 证明: $\boldsymbol{\xi}_1, \boldsymbol{\xi}_2, \boldsymbol{\xi}_3$ 线性无关.

(1) 对矩阵 $(\mathbf{A}, \boldsymbol{\xi}_1)$ 施行初等行变换, 得

$$(\mathbf{A}, \boldsymbol{\xi}_1) = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & : & -1 \\ -1 & 1 & 1 & : & 1 \\ 0 & -4 & -2 & : & -2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{1}{2} & : & -\frac{1}{2} \\ 0 & 1 & \frac{1}{2} & : & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & : & 0 \end{pmatrix}$$

由此可解得 $\boldsymbol{\xi}_2 = \left(-\frac{1}{2} + \frac{k}{2}, \frac{1}{2} - \frac{k}{2}, k\right)^\top$, 其中 k 为任意常数, 再对矩阵 $(\mathbf{A}^2, \boldsymbol{\xi}_1)$ 施行初等行变换, 得

$$(\mathbf{A}^2, \boldsymbol{\xi}_1) = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 0 & : & -1 \\ -2 & -2 & 0 & : & 1 \\ 4 & 4 & 0 & : & -2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & : & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & : & 0 \\ 0 & 0 & 0 & : & 0 \end{pmatrix}$$

故可解得 $\boldsymbol{\xi}_3 = \left(-\frac{1}{2} - a, b\right)^\top$, 其中 a, b 为任意常数.

(2) 由 (1) 的结果, 有

$$|\boldsymbol{\xi}_1, \boldsymbol{\xi}_2, \boldsymbol{\xi}_3| = \begin{vmatrix} -1 & \frac{k-1}{2} & -\frac{1}{2}-a \\ 1 & \frac{1-k}{2} & a \\ -2 & k & b \end{vmatrix} \xrightarrow{r_1+r_2} \begin{vmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{2} \\ 1 & \frac{1-k}{2} & a \\ -2 & k & b \end{vmatrix} = -\frac{1}{2} \neq 0$$

所以 $\boldsymbol{\xi}_1, \boldsymbol{\xi}_2, \boldsymbol{\xi}_3$ 线性无关.

11.4.3 非齐次线性方程组解的讨论

例 11.4.3 (2016 南京大学). 讨论当 a, b 为何值时, 线性方程组

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 1 \\ 3x_1 + 2x_2 + x_3 + x_4 - 3x_5 = a \\ x_2 + 2x_3 + 2x_4 + 6x_5 = 3 \\ 5x_1 + 4x_2 + 3x_3 + 3x_4 - x_5 = b \end{array} \right.$$

有解? 无解? 并求出有解时的一般解.

对方程组的增广矩阵施行初等行变换, 化为简化的行阶梯形矩阵:

$$(A : B) \xrightarrow[r_1 - r_3]{r_2 - 3r_1 + r_3, r_4 - 5r_1 + r_3} \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & -1 & -1 & -5 & -2 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 6 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b - 2 \end{array} \right)$$

(1) 当 $a \neq 0$ 或 $b \neq 2$ 时, 方程组无解;

(2) 当 $a = 0$ 且 $b = 2$ 时, 方程组有解, 此时, 方程组的一般解为

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + k_1 \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + k_2 \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + k_3 \begin{pmatrix} 5 \\ -6 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

其中 k_1, k_2, k_3 为任意常数.

11.5 方程组的同解与公共解

11.5.1 方程组的同解

定理 11.5.1 (同解与秩的等价形式). 若 $\mathbf{Ax} = \mathbf{0}$ 与 $\mathbf{Bx} = \mathbf{0}$ 同解, 它的充要条件为

$$\text{rank } \mathbf{A} = \text{rank } \mathbf{B} = \text{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix}.$$

定理 11.5.2. 若 $\mathbf{Ax} = \mathbf{0}$ 的解都是 $\mathbf{Bx} = \mathbf{0}$ 的解, 且 $\text{rank } \mathbf{A} = \text{rank } \mathbf{B}$, 则 $\mathbf{Ax} = \mathbf{0}$ 与 $\mathbf{Bx} = \mathbf{0}$ 同解.

例 11.5.1 (2015 华南理工大学). 已知齐次线性方程组

$$(I) : \begin{cases} x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 0 \\ 2x_1 + 3x_2 + 5x_3 = 0 \\ x_1 + x_2 + ax_3 = 0 \end{cases} \quad (II) : \begin{cases} x_1 + bx_2 + cx_3 = 0 \\ 2x_1 + b^2x_2 + (c+1)x_3 = 0 \end{cases}$$

同解, 求 a, b, c .

法一: 注意到齐次方程组 (II) 的未知量个数大于方程的个数, 所以 (II) 必有非零解, 由题意设 (I) 与 (II) 同解, 因此 (I) 也有非零解, 对 (I) 的系数矩阵 \mathbf{A} 做初等行变换, 得

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 5 \\ 1 & 1 & a \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & a-2 \end{pmatrix}$$

因为 $\text{rank } \mathbf{A} < 3$, 所以 $a = 2$, 可求得方程组 (I) 的一个基础解系为 $\xi = (1, 1, -1)^\top$, 将 ξ 代入 (II) 可求得 $\begin{cases} b = 0 \\ c = 1 \end{cases}$
或 $\begin{cases} b = 1 \\ c = 2 \end{cases}$, 当 $b = 0, c = 1$ 时, (II) 的系数矩阵 $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{pmatrix}$, $\text{rank } \mathbf{B} < \text{rank } \mathbf{A}$, 可见方程组 (II) 与 (I) 不同解; 当 $b = 1, c = 2$ 时, (II) 的系数矩阵 $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$, 所以 (II) 与 (I) 同解, 综上所述, 当且仅当 $a = 2, b = 1, c = 2$ 时, 方程组 (I) 与方程组 (II) 同解.

法二: 因为 (I) 与 (II) 同解, 所以 $\text{rank } \mathbf{A} = \text{rank } \mathbf{B} = \text{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix}$, 其中 \mathbf{A}, \mathbf{B} 为方程组 (I) 和 (II) 的系数矩阵, 因为 $\text{rank } \mathbf{B} \leq 2$, 所以 $\text{rank } \mathbf{A} \leq 2 \Rightarrow \det \mathbf{A} = 0 \Rightarrow a = 2$, 当 $a = 2$ 时, $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 5 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, 那么

$$\text{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & b & c \\ 2 & b^2 & c+1 \end{pmatrix} = \text{rank} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & b-1 & c-2 \\ 0 & b^2-2 & c-3 \end{pmatrix} = 2 \Rightarrow \begin{cases} b-1 = c-2 \\ b^2-2 = c-3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b=0 \\ c=1 \end{cases} \text{ 或 } \begin{cases} b=1 \\ c=2 \end{cases}$$

当 $b = 0, c = 1$ 时, $\text{rank } \mathbf{B} = \text{rank} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{pmatrix} = 1 \neq 2$, 故舍去; 当 $b = 1, c = 2$ 时, $\text{rank } \mathbf{B} = \text{rank} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} = 2$, 因此 $a = 2, b = 1, c = 2$.

11.5.2 方程组的公共解

定理 11.5.3 (公共解的交集). 设 $\mathbf{A}_{m \times n}, \mathbf{B}_{s \times n}$ 满足 $\mathbf{A}_{m \times n} \mathbf{x} = \mathbf{0}$ 与 $\mathbf{B}_{s \times n} \mathbf{x} = \mathbf{0}$ 有公共解, 其公共解也满足

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_{m \times n} \\ \mathbf{B}_{s \times n} \end{pmatrix} \mathbf{x} = \mathbf{0}.$$

例 11.5.2. 求 $\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 = 1 \\ 3x_2 + 2x_4 = 2 \end{cases}$ 与 $\begin{cases} x_1 - x_2 + x_3 = 3 \\ 2x_1 + 3x_2 + 2x_3 + 2x_4 = 6 \end{cases}$ 的公共解.

对方程组的增广矩阵施行初等行变换将其转变为最简行阶梯形, 有

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 3 & 0 & 2 & 2 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 3 \\ 2 & 3 & 2 & 2 & 6 \end{array} \right) \xrightarrow{\begin{array}{l} r_3 - r_1 \\ r_3 + \frac{2}{3}r_2 \\ r_4 - \frac{2}{3}r_2 \end{array}} \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 3 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4}{3} & \frac{10}{3} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4}{3} & \frac{10}{3} \end{array} \right) \xrightarrow{\begin{array}{l} r_4 - r_3 \\ r_3 \times \frac{3}{4} \\ r_2 \times \frac{1}{3} \\ r_1 - r_2 \end{array}} \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 1 & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{2}{3} & \frac{2}{3} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{5}{3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \xrightarrow{\begin{array}{l} r_2 - \frac{2}{3}r_3 \\ r_1 + \frac{2}{3}r_3 \\ r_3 \end{array}} \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{5}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

即 $\begin{cases} x_1 + x_3 = 2 \\ x_2 = -1 \\ x_4 = \frac{5}{2} \end{cases}$, 令 $x_3 = \xi$ (没有下划线), 则公共解为 $\left(2 - \xi, -1, \xi, \frac{5}{2} \right)^\top$.

例 11.5.3. 已知两个四元齐次线性方程组 (I), (II) 其中 (I) 的一个基础解系为

$$(1, -2, 1, 3)^\top, (3, -2, -1, 3)^\top, (II) \begin{cases} x_1 - x_2 + x_3 = 0 \\ 2x_1 + 3x_2 + ax_3 + 2x_4 = 0 \end{cases}$$

若 (I) 与 (II) 有非零公共解, 求所有公共解.

由题意可知,

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = k_1 \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} + k_2 \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \\ -1 \\ 3 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} k_1 + 3k_2 = x_1 \\ -2k_1 - 2k_2 = x_2 \\ k_1 - k_2 = x_3 \\ 3k_1 + 3k_2 = x_4 \end{cases}$$

那么有矩阵

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 3 & : & 1 \\ -2 & -2 & : & 1 \\ 1 & -1 & : & 1 \\ 3 & 3 & : & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{\begin{array}{l} r_2+2r_1 \\ r_3-r_1 \\ r_4-3r_1 \end{array}} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 3 & : & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & : & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & : & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & : & 0 & \frac{3}{2} & 1 \end{array} \right)$$

由上式三四行可知方程组 (III) $\begin{cases} x_1 + \frac{3}{2}x_2 + x_3 = 0 \\ + x_4 = 0 \end{cases}$ 与方程组 (I) 同解, 又因为 (I) 与 (II) 有非零公共解, 即 (III) 与 (II) 有非零公共解, 那么

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \\ 2 & 3 & a & 2 \end{pmatrix} \xrightarrow{\begin{array}{l} r_3-r_1 \\ r_4-2r_1 \\ r_2 \times \frac{2}{3} \\ r_3+2r_2 \\ r_4-r_2 \end{array}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{2}{3} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4}{3} \\ 0 & 0 & a-2 & \frac{4}{3} \end{pmatrix}$$

因为矩阵 A 有非零解, 所以 $\text{rank } A < 4$, 即 $a-2=0$, 解得 $a=2$, 所以矩阵 $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{2}{3} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4}{3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, 那么易得公共解.

第 12 章

线性空间

12.1 线性空间与子空间

12.2 子空间的和与交

12.3 维数公式与直和分解

12.4 同构映射与对偶空间

第 13 章

线性变换

“我们的知识只是一种影像，而不是事物本身。”

——施密特

线性变换是指将一个向量空间中的向量映射到另一个向量空间中的过程，同时保持向量的线性性质。线性变换可以用矩阵来表示，通过矩阵乘法将输入向量转换为输出向量。

13.1 线性变换及其矩阵

13.1.1 线性变换

例 13.1.1. 在线性空间 $P^{2 \times 2}$ 中定义线性变换 A_1, A_2, A_3 为

$$A_1(X) = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} X, A_2(X) = X \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, A_3(X) = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} X \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} (X \in P^{2 \times 2})$$

求 A_1, A_2, A_3 在基 $E_{11}, E_{12}, E_{21}, E_{22}$ 下的矩阵。

因为

$$A_1(E_{11}) = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 0 \\ c & 0 \end{pmatrix} = aE_{11} + cE_{21}$$

$$A_1(E_{12}) = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & a \\ 0 & c \end{pmatrix} = aE_{12} + cE_{22}$$

$$A_1(E_{21}) = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b & 0 \\ d & 0 \end{pmatrix} = bE_{11} + dE_{21}$$

$$A_1(E_{22}) = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & b \\ 0 & d \end{pmatrix} = bE_{12} + dE_{22}$$

所以 A_1 在基 $E_{11}, E_{12}, E_{21}, E_{22}$ 下的矩阵为 $\begin{pmatrix} a & 0 & b & 0 \\ 0 & a & 0 & b \\ c & 0 & d & 0 \\ 0 & c & 0 & d \end{pmatrix}$ ，同理可得 A_2, A_3 在基下的矩阵为 $\begin{pmatrix} a & c & 0 & 0 \\ b & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & c \\ 0 & 0 & b & d \end{pmatrix}$ 以

及 $\begin{pmatrix} a^2 & ac & ab & bc \\ ab & ad & b^2 & bd \\ ac & c^2 & ad & cd \\ bc & cd & bd & d^2 \end{pmatrix}$ 。

13.1.2 过渡矩阵及其性质

例 13.1.2 (2009 数一). 设 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 是三维空间 \mathbb{R}^3 的一组基, 则由基 $\alpha_1, \frac{1}{2}\alpha_2, \frac{1}{3}\alpha_3$ 到基 $\alpha_1 + \alpha_2, \alpha_2 + \alpha_3, \alpha_3 + \alpha_1$ 的过渡矩阵为

$$\text{A. } \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 3 \end{pmatrix} \quad \text{B. } \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 3 \end{pmatrix} \quad \text{C. } \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & -\frac{1}{6} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{6} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{4} & \frac{1}{6} \end{pmatrix} \quad \text{D. } \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & -\frac{1}{4} \\ -\frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \end{pmatrix}$$

$$\text{由 } \left(\alpha_1, \frac{1}{2}\alpha_2, \frac{1}{3}\alpha_3 \right) = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \begin{pmatrix} 1 & & \\ & \frac{1}{2} & \\ & & \frac{1}{3} \end{pmatrix} \Rightarrow (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \left(\alpha_1, \frac{1}{2}\alpha_2, \frac{1}{3}\alpha_3 \right) \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 2 & \\ & & 3 \end{pmatrix}, \text{ 因此}$$

$$\begin{aligned} (\alpha_1 + \alpha_2, \alpha_2 + \alpha_3, \alpha_3 + \alpha_1) &= (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \left(\alpha_1, \frac{1}{2}\alpha_2, \frac{1}{3}\alpha_3 \right) \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 2 & \\ & & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \left(\alpha_1, \frac{1}{2}\alpha_2, \frac{1}{3}\alpha_3 \right) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 3 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

因此选 A.

例 13.1.3. 设线性空间 P^3 的线性变换 A 定义如下:

$$A(a_1, a_2, a_3) = (2a_1 - a_2, a_2 - a_3, a_2 + a_3)$$

(1) 求 A 在基 $\varepsilon_1 = (1, 0, 0), \varepsilon_2 = (0, 1, 0), \varepsilon_3 = (0, 0, 1)$ 下的矩阵 A ;

(2) 求 A 在基 $\eta_1 = (1, 1, 0), \eta_2 = (0, 1, 1), \eta_3 = (0, 0, 1)$ 下的矩阵 B ;

(3) 求由基 $\varepsilon_{1,2,3}$ 到 $\eta_{1,2,3}$ 的过渡矩阵 X , 并验证 $B = X^{-1}AX$.

(1) 因为

$$A\varepsilon_1 = (2, 0, 0) = 2\varepsilon_1, A\varepsilon_2 = (-1, 1, 1) = -\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, A\varepsilon_3 = (0, -1, 1) = -\varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

$$\text{所以 } A \text{ 在基 } \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \text{ 下的矩阵为 } A = \begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

(2) 因为

$$A\eta_1 = (1, 1, 1) = \eta_1 + \eta_3, A\eta_2 = (-1, 0, 2) = -\eta_1 + \eta_2 + \eta_3, A\eta_3 = (0, -1, 1) = -\eta_2 + 2\eta_3$$

$$\text{所以 } A \text{ 在基 } \eta_1, \eta_2, \eta_3 \text{ 下的矩阵为 } B = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}.$$

(3) 因为 $\eta_j = \sum_{i=1}^3 k_{ij} \varepsilon_i, j = 1, 2, 3$, 于是

$$\eta_1 = k_{11}\varepsilon_1 + k_{21}\varepsilon_2 + k_{31}\varepsilon_3 \Rightarrow (k_{11}, k_{21}, k_{31}) = (1, 1, 0)$$

$$\eta_2 = k_{12}\varepsilon_1 + k_{22}\varepsilon_2 + k_{32}\varepsilon_3 \Rightarrow (k_{12}, k_{22}, k_{32}) = (0, 1, 1)$$

$$\eta_3 = k_{13}\varepsilon_1 + k_{23}\varepsilon_2 + k_{33}\varepsilon_3 \Rightarrow (k_{13}, k_{23}, k_{33}) = (0, 0, 1)$$

$$\text{则 } X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \text{ 且 } \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

例 13.1.4. 在 P^4 中, 求由 $\varepsilon_{1,2,3,4}$ 到 $\eta_{1,2,3,4}$ 的过渡矩阵, 并求向量 $\xi = (2, 1, 2, 1)$ 对于基 $\eta_{1,2,3,4}$ 的坐标, 其中

$$\varepsilon_1 = (1, 0, 0, 0), \varepsilon_2 = (0, 1, 0, 0), \varepsilon_3 = (0, 0, 1, 0), \varepsilon_4 = (0, 0, 0, 1)$$

$$\eta_1 = (2, 1, 0, 1), \eta_2 = (0, 1, 2, 2), \eta_3 = (-2, 1, 2, 1), \eta_4 = (1, 3, 1, 2).$$

因为 $\eta_j = \sum_{i=1}^4 k_{ij} \varepsilon_i$, 故由 $\varepsilon_{1,2,3,4}$ 到 $\eta_{1,2,3,4}$ 的过渡矩阵为 $A = \begin{pmatrix} 2 & 0 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 3 \\ 0 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 2 \end{pmatrix}$, 因为 ξ 对于基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ 的坐标

为 $(2, 1, 2, 1)$, 所以 ξ 对于基 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ 的坐标为

$$A^{-1} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{5}{2} & 1 & \frac{9}{2} & -5 \\ -1 & -1 & -2 & 3 \\ \frac{3}{2} & 1 & \frac{7}{2} & -4 \\ -1 & 0 & -2 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 \\ -4 \\ 7 \\ -4 \end{pmatrix}$$

即 ξ 对于基 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ 的坐标为 $(10, -4, 7, -4)$.

例 13.1.5 (2003 南京航空航天大学). 已知 \mathbb{R}^3 的线性变换 σ 对于基

$$\varepsilon_1 = (-1, 0, 2)^\top, \varepsilon_2 = (0, 1, 1)^\top, \varepsilon_3 = (3, -1, -6)^\top$$

的像为 $\sigma(\varepsilon_1) = (-1, 0, 1)^\top, \sigma(\varepsilon_2) = (0, -1, 2)^\top, \sigma(\varepsilon_3) = (-1, -1, 3)^\top$,

(1) 求 σ 在基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 下的矩阵;

(2) 设 $x = (1, 1, 1)^\top$, 求 $\sigma(x)$;

(3) 已知 $\sigma(x)$ 在基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 下的坐标向量为 $(2, -4, -2)^\top$, 求 x ;

(4) 证明: $\varepsilon_1, \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ 是 \mathbb{R}^3 的基, 并求 σ 在该基下的矩阵.

(1) 考虑 \mathbb{R}^3 的自由基 $e_1 = (1, 0, 0)^\top, e_2 = (0, 1, 0)^\top, e_3 = (0, 0, 1)^\top$, 由基 e_1, e_2, e_3 到 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 的过渡矩阵为

$$P = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & -1 \\ 2 & 1 & -6 \end{pmatrix}$$

即 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) = (e_1, e_2, e_3)P$, 且向量组 $\sigma(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ 在基 e_1, e_2, e_3 下的矩阵表示为

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

即 $\sigma(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) = (e_1, e_2, e_3)A$, 于是, 有

$$\sigma(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) = (e_1, e_2, e_3)A = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)P^{-1}A$$

因此, σ 在基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 下的矩阵为

$$B = P^{-1}A = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & -1 \\ 2 & 1 & -6 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 & -3 & 3 \\ 2 & 0 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 & 9 & 7 \\ -1 & 2 & 1 \\ -1 & 3 & 2 \end{pmatrix}.$$

$$(2) \sigma(x) = \sigma(e_1, e_2, e_3)x = \sigma(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)P^{-1}x = (e_1, e_2, e_3)AP^{-1}x = (-7, -5, 17)^\top.$$

(3) 记 $\mathbf{y} = (2, -4, -2)^\top$, 则 $\sigma(\mathbf{x}) = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)\mathbf{y}$, 因为

$$\sigma(\mathbf{x}) = \sigma(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)\mathbf{P}^{-1}\mathbf{x} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{x}$$

所以 $\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{x} = \mathbf{y}$, 其中 $\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1} = \begin{pmatrix} 22 & -1 & 10 \\ 1 & 2 & 0 \\ 5 & 1 & 2 \end{pmatrix}$, 解非齐次线性方程组 $\mathbf{B}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{x} = \mathbf{y}$, 得 $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} -8 \\ 2 \\ 18 \end{pmatrix} + k\begin{pmatrix} 4 \\ -2 \\ -9 \end{pmatrix}$

其中 k 为任意常数.

(4) 记 $\alpha_1 = \varepsilon_1$, $\alpha_2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, $\alpha_3 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$, 易证, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 线性无关, 所以是 \mathbb{R}^3 的基, 显然, 由基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 到基 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 的过渡矩阵为

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

因此, σ 在基 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 下的矩阵为

$$Q^{-1}\mathbf{B}Q = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -2 & 9 & 7 \\ -1 & 2 & 1 \\ -1 & 3 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 6 & 12 \\ 0 & -1 & -2 \\ -1 & 2 & 4 \end{pmatrix}.$$

13.2 矩阵的特征值与特征向量

13.2.1 矩阵的特征值

定理 13.2.1 (特征多项式展开定理). 设 \mathbf{A} 是 n 阶矩阵, 则 \mathbf{A} 的特征多项式为

$$f(\lambda) = |\lambda\mathbf{E} - \mathbf{A}| = \lambda^n - a_1\lambda^{n-1} + \cdots + (-1)^k a_k \lambda^{n-k} + \cdots + (-1)^n a_n$$

其中 a_k 是 \mathbf{A} 的所有 k 阶主子式之和, 即

$$a_k = \sum_{1 \leqslant j_1 < \cdots < j_k \leqslant n} \begin{vmatrix} a_{j_1 j_1} & \cdots & a_{j_1 j_k} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{j_k j_1} & \cdots & a_{j_k j_k} \end{vmatrix}$$

特别地 $a_1 = \text{tr } \mathbf{A}$, $a_n = \det \mathbf{A}$. 对于常见的 3 阶矩阵有

$$f(\lambda) = \lambda^3 - \text{tr } \mathbf{A} \cdot \lambda^2 + \left(\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \right) \lambda - \det \mathbf{A}.$$

图 13.2.1 是 a_2 的形象化表达.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

图 13.2.1

定理 13.2.2 (特征值的积与和). 设 n 阶方阵 A 的特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 则

$$\det A = \prod_{i=1}^n \lambda_i, \quad \operatorname{tr} A = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

例 13.2.1. 设 A 是 3 阶矩阵, A 的特征值为 $1, 2, -1$, 如果 $B = A^2 - 2A + 3E$, 求 $|B|$.

易求得 B 的特征值分别是 $2, 3, 6$, 那么 $\det B = 2 \times 3 \times 6 = 36$.

定理 13.2.3 (逆矩阵的特征值). 矩阵可逆当且仅当其特征值都不等于零, 若 λ 是可逆矩阵 A 的特征值, 则 $\frac{1}{\lambda}$ 是逆矩阵 A^{-1} 的特征值.

定理 13.2.4 (秩一矩阵的特征值). 若 n 阶方阵 A 满足 $\operatorname{rank} A = 1$, 那么矩阵 A 的特征值为 $\operatorname{tr} A$ 及 $n-1$ 重 0 根.

例 13.2.2. 已知 A 是 3 阶矩阵, E 是 3 阶单位矩阵, 如果 $A, A - 2E, 3A + 2E$ 均不可逆, 求 $|A + E|$.

易知矩阵 A 的特征值分别为 $0, 2, -\frac{2}{3}$, 那么 $\det(A + E) = 1 \times 3 \times \frac{1}{3} = 1$.

定理 13.2.5 (伴随矩阵的特征值 A). 若 A 为 n 阶可逆矩阵, 且 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 是 A 的全部特征值, 则 $\frac{|A|}{\lambda_i}$ 是 A^* 的全部特征值; 若 A 为 n 阶不可逆矩阵, 则 A^* 有 $n-1$ 个特征值为 0, 另一个特征值为 $\operatorname{tr} A^*$.

定理 13.2.6 (伴随矩阵的特征值 B). 设 n 阶方阵 A 的特征值为 $\lambda_j (j = 1, 2, \dots, n)$, 则 A^* 的 n 个特征值为 λ_i^* , 则

$$\lambda_i^* = \prod_{\substack{1 \leq j \leq n \\ j \neq i}} \lambda_j \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

例 13.2.3. 设 A 为 3 阶矩阵, 特征值为 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 2$, 对应的线性无关的特征向量为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, 令 $P = (\alpha_1 - \alpha_3, \alpha_2 + \alpha_3, \alpha_3)$, 则 $P^{-1}A^*P$ 等于

A. $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	B. $\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$	C. $\begin{pmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	D. $\begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$
--	---	---	---

由 $P = (\alpha_1 - \alpha_3, \alpha_2 + \alpha_3, \alpha_3)$, 得 $P = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)E_{31}(-1)E_{32}(1) := BE_{31}(-1)E_{32}(1)$, 那么

$$\begin{aligned} P^{-1}A^*P &= (BE_{31}(-1)E_{32}(1))^{-1}A^*BE_{31}(-1)E_{32}(1) = E_{32}(-1)E_{31}(1)\operatorname{diag}(2, 2, 1)E_{31}(-1)E_{32}(1) \\ &= E_{32}(-1)E_{31}(1)E_1(2)E_2(2)E_{31}(-1)E_{32}(1) = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

因此选 D.

例 13.2.4. 已知矩阵 $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & a \\ 1 & 3 & 5 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$, 只有两个线性无关的特征向量, 求矩阵 A 的特征值以及 a .

由 $|\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 1 & 1 & -a \\ -1 & \lambda - 3 & -5 \\ 0 & 0 & \lambda - 2 \end{vmatrix} = (\lambda - 1)(\lambda - 3)(\lambda - 2) + (\lambda - 2) = (\lambda - 2)^3 = 0$, 于是特征值为 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 2$, 因为 $n - \text{rank}(2E - A) = 2$, 于是 $\text{rank}(2E - A) = 1$, 进而解得 $a = -5$.

定理 13.2.7 (特征值不等式). 若 A 的特征值按从小到大排列, 即 $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n$, 则

$$\lambda_1 x^\top x \leq x^\top Ax \leq \lambda_n x^\top x.$$

证 存在正交矩阵 Q , 令 $x = Qy$, 使得

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = x^\top Ax = y^\top Q^\top AQy = \lambda_1 y_1^2 + \lambda_2 y_2^2 + \dots + \lambda_n y_n^2$$

不妨设 $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n$, 有

$$\lambda_1 \sum_{k=1}^n y_k^2 \leq \sum_{k=1}^n \lambda_k y_k^2 \leq \lambda_n \sum_{k=1}^n y_k^2$$

即

$$\lambda_1 x^\top x \leq x^\top Ax \leq \lambda_n x^\top x.$$

定理 13.2.8 (行均和定理). 若矩阵 A 的每行元素之和均为 k , 则 A 有一特征值为 k , 所对应特征向量为 $(1, 1, \dots, 1)^\top$.

特征值在求解迭代方程中的应用

例 13.2.5. 给定 3 个数列 $\{x_n\}, \{y_n\}, \{z_n\}$ 满足 $x_1 = -2, y_1 = 1, z_1 = -1$, 且当 $n \geq 1$ 有

$$x_{n+1} = 3x_n - 6y_n - z_n, \quad y_{n+1} = -x_n + 2y_n + z_n, \quad z_{n+1} = x_n + 3y_n - z_n$$

求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n + y_n + z_n}{3^n + 5^n}$.

由 $\begin{cases} x_{n+1} = 3x_n - 6y_n - z_n \\ y_{n+1} = -x_n + 2y_n + z_n \\ z_{n+1} = x_n + 3y_n - z_n \end{cases} \Rightarrow \begin{pmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \\ z_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & -6 & -1 \\ -1 & 2 & 1 \\ 1 & 3 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} := A \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix}$, 于是特征方程为

$$\lambda^3 - 4\lambda^2 - 7\lambda + 10 = (\lambda - 1)(\lambda - 5)(\lambda + 2) = 0 \Rightarrow \lambda_1 = 1, \lambda_2 = 5, \lambda_3 = -2$$

于是 $x_n + y_n + z_n = a \cdot 1^n + b \cdot 5^n + c \cdot (-2)^n$, 且

$$\begin{cases} x_1 + y_1 + z_1 = -2 + 1 - 1 = -2 = a + 5b - 2c \\ x_2 + y_2 + z_2 = -11 + 3 + 3 = -6 = a + 25b + 4c \\ x_3 + y_3 + z_3 = -53 + 19 - 4 = -38 = a + 125b - 8c \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = 0 \\ b = -\frac{2}{7} \\ c = \frac{2}{7} \end{cases}$$

于是 $x_n + y_n + z_n = -\frac{2}{7} \cdot 5^n + \frac{2}{7}(-1)^n \cdot 2^n$, 那么 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{-\frac{2}{7} \cdot 5^n + \frac{2}{7}(-1)^n \cdot 2^n}{3^n + 5^n} = -\frac{2}{7}$.

13.2.2 矩阵的特征向量

例 13.2.6. 设矩阵 $A = \begin{pmatrix} 3 & 2 & 2 \\ 2 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 3 \end{pmatrix}$, $P = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, $B = P^{-1}A^*P$, 求 $B + 2E$ 的特征值与特征向量.

设 A 的特征值为 λ , 对应的特征向量为 ξ , 即 $A\xi = \lambda\xi$, 由于 $|A - 7E| \neq 0$, 所以 $\lambda \neq 7$, 于是有

$$A^* \xi = \frac{|A|}{\lambda} \xi, (B + 2E)P^{-1}\xi = \left(\frac{|A|}{\lambda} + 2 \right) P^{-1}\xi$$

即 $\frac{|A|}{\lambda} + 2$ 是 $B + 2E$ 的特征值, $P^{-1}\xi$ 为对应的特征向量, 易求得 A 的特征值为 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 7$, 属于 $\lambda_{1,2} = 1$ 的特征向量为

$$\xi_1 = (-1, 1, 0)^\top, \xi_2 = (-1, 0, 1)^\top$$

属于 λ_3 的特征向量为 $\xi_3 = (1, 1, 1)^\top$, 因此, $B + 2E$ 的三个特征向量为 $9, 9, 3$, 属于特征值 9 的两个线性无关的特征向量为

$$P^{-1}\xi_1 = (1, -1, 0)^\top, P^{-1}\xi_2 = (-1, -1, 1)^\top$$

属于特征值 3 的特征向量为 $P^{-1}\xi_3 = (0, 1, 1)^\top$.

例 13.2.7. 设 A 是线性空间 P^3 的线性变换, 已知

$$A(1, 0, 0) = (5, 6, -3), A(0, 1, 0) = (-1, 0, 1), A(0, 0, 1) = (1, 2, 1)$$

(1) 求 A 的全部特征值和特征向量;

(2) 问: 能否找到 P^3 的一组基, 使 A 在这组基下的矩阵为对角矩阵? 说明理由.

(1) A 在基 $(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)$ 下的矩阵为 $\begin{pmatrix} 5 & -1 & 1 \\ 6 & 0 & 2 \\ -3 & 1 & 1 \end{pmatrix}$, 那么 A 的特征多项式为

$$f(\lambda) = |\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 5 & 1 & -1 \\ -6 & \lambda & -2 \\ -3 & -1 & \lambda - 1 \end{vmatrix} = (\lambda - 2)^3$$

所以 A 的特征值为 2 , 对 $\lambda = 2$ 求特征向量, 解齐次方程组

$$\begin{cases} -3x_1 + x_2 - x_3 = 0 \\ -6x_1 + 2x_2 - 2x_3 = 0 \\ 3x_1 - x_2 + x_3 = 0 \end{cases}$$

求得基础解系为: $(1, 3, 0), (0, 1, 1)$, 所以 A 的全部特征向量为 $k_1(1, 3, 0) + k_2(0, 1, 1)$, 其中 k_1, k_2 为数域 P 中不全为零的任意数, 这些特征向量都属于特征值 2 .

(2) 因为 A 只有 2 个线性无关的特征向量, 而 P^3 是 3 维线性空间, 所以找不到一组基, 使 A 在这组基下的矩阵为对角矩阵.

例 13.2.8. 设 A 是线性空间 P^3 的线性变换, 已知

$$A(1, 0, 0) = (8, -6, 3), A(1, 1, 0) = (14, -10, 6), A(1, 1, 1) = (8, -4, 5)$$

求 A 的全部特征值和特征向量, 并求 P^3 的一组基使 A 在这组基下的矩阵为对角矩阵.

因为

$$A(1, 0, 0) = (8, -6, 3) = 14(1, 0, 0) - 9(1, 1, 0) + 3(1, 1, 1)$$

$$A(1, 1, 0) = (14, -10, 6) = 24(1, 0, 0) - 16(1, 1, 0) + 6(1, 1, 1)$$

$$A(1, 1, 1) = (8, -4, 5) = 12(1, 0, 0) - 9(1, 1, 0) + 5(1, 1, 1)$$

所以 A 在基 $(1, 0, 0), (1, 1, 0), (1, 1, 1)$ 下的矩阵为 $A = \begin{pmatrix} 14 & 24 & 12 \\ -9 & -16 & -9 \\ 3 & 6 & 5 \end{pmatrix}$, A 的特征多项式为

$$f(\lambda) = |\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 14 & -24 & -12 \\ 9 & \lambda + 16 & 9 \\ -3 & -6 & \lambda - 5 \end{vmatrix} \xrightarrow[r_2+3r_3]{r_1-4r_3} \begin{vmatrix} \lambda - 2 & 0 & -4\lambda + 8 \\ 0 & \lambda - 2 & 3\lambda - 6 \\ -3 & -6 & \lambda - 5 \end{vmatrix} = (\lambda - 2)^2(\lambda + 1)$$

对 $\lambda = -1$ 解齐次方程组

$$\begin{cases} -15x_1 - 24x_2 - 12x_3 = 0 \\ 9x_1 + 15x_2 + 9x_3 = 0 \\ -3x_1 - 6x_2 - 6x_3 = 0 \end{cases}$$

得基础解系: $(4, -3, 1)$, 对应特征向量为 $4(1, 0, 0) - 3(1, 1, 0) + (1, 1, 1) = (2, -2, 1)$, 所以属于特征值 -1 的全部特征向量为 $k(2, -2, 1)$, 其中 k 为数域 P 中任一非零数;

对 $\lambda = 2$ 解齐次方程组

$$\begin{cases} -12x_1 - 24x_2 - 12x_3 = 0 \\ 9x_1 + 18x_2 + 9x_3 = 0 \\ -3x_1 - 6x_2 - 3x_3 = 0 \end{cases}$$

得基础解系 $(-1, 0, 1), (0, -1, 2)$, 对应于特征向量分别为

$$-(1, 0, 0) + (1, 1, 1) = (0, 1, 1) \text{ 及 } -(1, 1, 0) + 2(1, 1, 1) = (1, 1, 2)$$

所以属于特征值 2 的全部特征向量为 $k_1(0, 1, 1) + k_2(1, 1, 2)$, 其中 k_1, k_2 为数域 P 不全为 0 的任意性, 于是以

$$(2, -2, 1), (0, 1, 1), (1, 1, 2)$$

为基, 则 A 在这组基下的矩阵为对角矩阵 $\text{diag}(-1, 2, 2)$.

例 13.2.9. 设 A 是 3 阶矩阵, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 是 A 的 3 个不同特征值, 对应的特征向量分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, 令 $\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$,

(1) 证明: $\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ 不是 A 的特征向量;

(2) 证明: $\beta, A\beta, A^2\beta$ 线性无关;

(3) 若 $A^3\beta = 2A\beta$, 求 A 的特征值;

(4) 在 (3) 的基础上证明: $A\beta$ 和 $A^2\beta$ 是方程组 $(A^2 - 2E)x = 0$ 的基础解系.

(1) 反证法: 假设 λ 是 A 的特征值, 且对应的特征向量为 β , 那么 $A\beta = \lambda\beta$, 即

$$\begin{aligned} A(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) &= \lambda(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \\ \Rightarrow A\alpha_1 + A\alpha_2 + A\alpha_3 &= \lambda\alpha_1 + \lambda\alpha_2 + \lambda\alpha_3 \\ \Rightarrow \lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha_2 + \lambda_3\alpha_3 &= \lambda\alpha_1 + \lambda\alpha_2 + \lambda\alpha_3 \end{aligned}$$

即 $\Rightarrow (\lambda_1 - \lambda)\alpha_1 + (\lambda_2 - \lambda)\alpha_2 + (\lambda_3 - \lambda)\alpha_3 = 0$, 即 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$, 但这与题意矛盾, 故假设不成立, 即 $\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ 不是 A 的特征向量.

(2) 要证: $\beta, A\beta, A^2\beta$ 线性无关, 即证: $k_1\beta + k_2A\beta + k_3A^2\beta = 0$, 其中 $k_1 + k_2 + k_3 = 0$, 为此, 则有

$$k_1(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + k_2(\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha_2 + \lambda_3\alpha_3) + k_3(\lambda_1^2\alpha_1 + \lambda_2^2\alpha_2 + \lambda_3^2\alpha_3) = 0$$

为使等式成立, 则有

$$\begin{cases} k_1 + k_2\lambda_1 + k_3\lambda_1^2 = 0 \\ k_1 + k_2\lambda_2 + k_3\lambda_2^2 = 0 \\ k_1 + k_2\lambda_3 + k_3\lambda_3^2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{vmatrix} 1 & \lambda_1 & \lambda_1^2 \\ 1 & \lambda_2 & \lambda_2^2 \\ 1 & \lambda_3 & \lambda_3^2 \end{vmatrix}$$

该行列式为 Vandermonde 行列式, 则其值为 $(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2) \neq 0$, 故 $k_1 + k_2 + k_3 = 0$, 因此 $\beta, A\beta, A^2\beta$ 线性无关.

(3) 设矩阵 $B \sim A$, 且 $\exists P$ 使得 $P^{-1}AP = B$, 即 $AP = PB$, 不妨取 $P = (\beta, A\beta, A^2\beta)$, 因此

$$AP = (A\beta, A^2\beta, A^3\beta) \xrightarrow{A^3\beta=2A\beta} (A\beta, A^2\beta, 2A\beta) = (\beta, A\beta, A^2\beta) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

因此 $B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$, 则特征值方程为 $|\lambda E - B| = \begin{vmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ -1 & \lambda & -2 \\ 0 & -1 & \lambda \end{vmatrix} = \lambda \begin{vmatrix} \lambda & -2 \\ -1 & \lambda \end{vmatrix} = \lambda(\lambda^2 - 2) = 0$, 因此特征值为 $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = \sqrt{2}, \lambda_3 = -\sqrt{2}$.

(4) 为证: $A\beta$ 和 $A^2\beta$ 是方程组 $(A^2 - 2E)x = \mathbf{0}$ 的基础解系, 需分别证:

(i) $A\beta$ 和 $A^2\beta$ 是方程组 $(A^2 - 2E)x = \mathbf{0}$ 的解;

当 $x = A\beta$ 时, 有 $(A^2 - 2E)A\beta = A^3\beta - 2A\beta \xrightarrow{A^3\beta=2A\beta} \mathbf{0}$ 成立;

当 $x = A^2\beta$ 时, 有 $(A^2 - 2E)A^2\beta = A^4\beta - 2A^2\beta = A(A^3\beta - 2A\beta) \xrightarrow{A^3\beta=2A\beta} \mathbf{0}$ 成立;

(ii) $A\beta$ 和 $A^2\beta$ 线性无关;

由 (2) 可知 $\beta, A\beta, A^2\beta$ 线性无关 (整体无关, 部分必无关; 部分相关, 整体必相关), 故 $A\beta$ 和 $A^2\beta$ 线性无关;

(iii) $S = n - \text{rank}(A^2 - 2E)$, 其中 $S = 2$.

因为 $P^{-1}AP = \Lambda_1$, 即 A 能相似对角化, 故 $P^{-1}(A^2 - 2E)P$ 亦能相似对角化为矩阵 Λ_2 , 又因为 $(A^2 - 2E)$ 的特征值为 $2, 0, 0$, 那么 $\text{rank}(A^2 - 2E) = 1$, 且 $n = 3$, 故 $S = n - \text{rank}(A^2 - 2E)$ 成立,

综上所述, $A\beta$ 和 $A^2\beta$ 是方程组 $(A^2 - 2E)x = \mathbf{0}$ 的基础解系.

13.2.3 公共特征向量

定理 13.2.9 (方阵的公共特征向量). 若 n 阶方阵 A, B 满足 $AB = BA$, 则 A 与 B 一定有公共的特征向量.

13.2.4 Schmidt 正交化

定理 13.2.10 (Schmidt 正交化). 设向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 线性无关, 则必存在正交组 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, 使得 β_i 可由向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 线性表出, 其表出公式如下:

$$\beta_1 = \alpha_1,$$

$$\beta_2 = \alpha_2 - \frac{[\alpha_2, \beta_1]}{[\beta_1, \beta_1]} \beta_1$$

⋮

$$\beta_n = \alpha_n - \frac{[\alpha_n, \beta_1]}{[\beta_1, \beta_1]} \beta_1 - \frac{[\alpha_n, \beta_2]}{[\beta_2, \beta_2]} \beta_2 - \cdots - \frac{[\alpha_n, \beta_{n-1}]}{[\beta_{n-1}, \beta_{n-1}]} \beta_{n-1}$$

若再把正交向量组 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 单位化, 即令

$$e_1 = \frac{\beta_1}{\|\beta_1\|}, e_2 = \frac{\beta_2}{\|\beta_2\|}, \dots, e_n = \frac{\beta_n}{\|\beta_n\|},$$

则 e_1, e_2, \dots, e_n 是标准正交向量组.

例 13.2.10 (2021 数一). 已知 $\alpha = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\alpha_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\alpha = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$, 记 $\beta_1 = \alpha_1$, $\beta_2 = \alpha_2 - k\beta_1$, $\beta_3 = \alpha_3 - l_1\beta_1 - l_2\beta_2$, 若 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 两两正交, 则 l_1, l_2 依次为

A. $\frac{5}{2}, \frac{1}{2}$

B. $-\frac{5}{2}, \frac{1}{2}$

C. $\frac{5}{2}, -\frac{1}{2}$

D. $-\frac{5}{2}, -\frac{1}{2}$

法一: 因为 β_1 与 β_2 相互正交, 即

$$(1, 0, 1) \cdot (1 - k, 2, 1 - k) = 0 \Rightarrow k = 1 \Rightarrow \beta_2 = \alpha_2 - \beta_1$$

同理 β_1 与 β_3 相互正交, β_2 与 β_3 相互正交, 则

$$\begin{cases} (1, 0, 1) \cdot (3 - l_1, 1 - 2l_2, 2 - l_1) = 0 \\ (0, 2, 0) \cdot (3 - l_1, 1 - 2l_2, 2 - l_1) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} l_1 = \frac{5}{2} \\ l_2 = \frac{1}{2} \end{cases}$$

法二: $\beta_2 = \alpha_2 - \frac{[\alpha_2, \beta_1]}{[\beta_1, \beta_1]} \beta_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}, \beta_3 = \alpha_3 - \frac{[\alpha_3, \beta_2]}{[\beta_2, \beta_2]} \beta_2 - \frac{[\alpha_3, \beta_1]}{[\beta_1, \beta_1]} \beta_1$, 因此 $l_1 = \frac{[\alpha_3, \beta_1]}{[\beta_1, \beta_1]} = \frac{5}{2}, l_2 = \frac{[\alpha_3, \beta_2]}{[\beta_2, \beta_2]} = \frac{1}{2}$, 故选 A.

13.3 矩阵相似与可对角化

13.3.1 矩阵的相似

定义 13.3.1 (矩阵的相似). 设 A, B 是 n 阶矩阵, 如果存在 n 阶可逆矩阵 P , 使得

$$P^{-1}AP = B$$

则称矩阵 A 与 B 相似, 记为 $A \sim B$.

定理 13.3.1 (矩阵相似的必要条件). 若 A 与 B 是相似的, 则由相似矩阵的性质可得:

$$(1) \det A = \det B. \quad (2) \operatorname{rank}(A) = \operatorname{rank} B. \quad (3) \operatorname{tr} A = \operatorname{tr} B. \quad (4) |\lambda E - A| = |\lambda E - B|.$$

$$(5) kA \sim kB, A^m \sim B^m, f(A) \sim f(B), A^\top \sim B^\top, A^{-1} \sim B^{-1}, A^* \sim B^*.$$

例 13.3.1. 已知矩阵 $A \sim B$, 其中 $B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 3 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, 则 $|A + E|$.

因为 $A \sim B$, 则 $|A + E| = |B + E| = -6$.

例 13.3.2. 已知矩阵 $A = \begin{pmatrix} -2 & -2 & 1 \\ 2 & x & -2 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$ 与 $B = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & y \end{pmatrix}$ 相似, 求 x 与 y .

因为 A 与 B 相似, 故具有相同的迹和相同的行列式, 故 $\begin{cases} x - 4 = 1 + y \\ 4x - 8 = -2y \end{cases} \Rightarrow x = 3, y = -2$.

例 13.3.3. 设 $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & -3 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & -3 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 2 & 1 & -5 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & -4 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 \\ 0 & 1 & -2 \\ 5 & 1 & -2 \end{pmatrix}, \Lambda = \operatorname{diag}(1, 1, -3)$, 则在 A, B, C, D 中与 Λ 相似的矩阵有

- A. A, C B. A, D C. B, C D. A, D

矩阵相似有四个必要条件，分别为：秩相等，迹相等，行列式相等和特征多项式相等，于是对于矩阵 D 因为 $\text{tr} D \neq \text{tr} \Lambda$ ，故排除选项 B, D ，又因为矩阵相似对角矩阵等价于它的每一个特征值的重数与其对应的线性无关的特征向量个数相等，对于矩阵 B ，它的特征值显然是 $1, 1, -3$ 与 Λ 相同，但是对于 $\lambda = 1$ (二重)，

$$n - \text{rank}(\lambda E - B) = 3 - 2 = 1 \neq 2 (\text{特征值重数})$$

因此矩阵 B 关于特征值 1 仅一个线性无关的特征向量，矩阵 B 不能相似对角化为 Λ ，排除选项 C ，故选 A .

例 13.3.4 (2013 数一). 矩阵 $A = \begin{pmatrix} 1 & a & 1 \\ a & b & a \\ 1 & a & 1 \end{pmatrix}$ 与 $B = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ 相似的充要条件为

- A. $a = 0, b = 2$ B. $a = 0, b$ 为任意常数 C. $a = 0, b = 0$ D. $a = 2, b$ 为任意常数

因为矩阵 A 是实对称矩阵，矩阵 B 是对角矩阵，则 A 与 B 相似的充要条件是 A 的特征值为 $2, b, 0$ ，因为 2 是 A 的特征值，那么

$$|2E - A| = 0 \Rightarrow a = 0$$

当 $a = 0$ 时， $|\lambda E - A| = \lambda(\lambda - 2)(\lambda - b)$ 那么 A 的特征值为 $2, b, 0$ ，所以 b 为任意常数即可，选 B .

例 13.3.5 (2009 兰州大学). 已知矩阵 $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 2 & a & 2 \\ 2 & 2 & 1 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & b \end{pmatrix}$ ，问 a, b 取何值时 A 与 B 相似？并求可逆矩阵 P 使得 $P^{-1}AP = B$.

法一：由于 A 与 B 相似，则它们的特征多项式相同，所以 $|\lambda E - A| = |\lambda E - B|$ ，即

$$\begin{vmatrix} \lambda - 1 & -2 & -2 \\ -2 & \lambda - a & -2 \\ -2 & -2 & \lambda - 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \lambda + 1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda + 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda - b \end{vmatrix}$$

得 $(\lambda + 1)(\lambda^2 - (3 + a)\lambda + 3a - 8) = (\lambda + 1)^2(\lambda - b)$ ，比较两边的系数，得 $a = 1, b = 5$ ，那么

$$f(\lambda) = \begin{vmatrix} \lambda - 1 & -2 & -2 \\ -2 & \lambda - 1 & -2 \\ -2 & -2 & \lambda - 1 \end{vmatrix} \xrightarrow{\frac{r_2 - r_3}{r_1 - r_3}} (\lambda + 1)^2 \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ -2 & -2 & \lambda - 1 \end{vmatrix} = (\lambda + 1)^2(\lambda - 5)$$

那么 A 的特征值为 -1 (二重) 和 5 ，则对应的特征向量依次为

$$\xi_1 = (-1, -1, 0)^\top, \xi_2 = (-1, 0, -1)^\top, \xi_3 = (1, 1, 1)^\top$$

从而可得可逆矩阵 $P = (\xi_1, \xi_2, \xi_3) = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ ，容易验证有 $P^{-1}AP = B$ ，故 P 即使所求.

法二：因为 A 与 B 相似，所以具有相同的迹和相同的行列式，即 $\text{tr} A = \text{tr} B$, $\det A = \det B$ ，故

$$2 + a = -2 + b, -3a + 8 = b$$

解得 $a = 1, b = 5$.

例 13.3.6 (2017 数一). 已知矩阵 $A = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, $C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$ ，则¹

¹假如三阶矩阵 A 的特征值为 a, b, b ，那么有

$$A \text{ 可相似对角化} \Leftrightarrow \text{rank}(bE - A) = \text{阶数} - b \text{ 的重数}$$

即只需要判断 $\text{rank}(A - bE) = ?$ 阶数 $-b$ 的重数.

- | | |
|--|---|
| A. \mathbf{A} 与 \mathbf{C} 相似, \mathbf{B} 与 \mathbf{C} 相似 | B. \mathbf{A} 与 \mathbf{C} 相似, \mathbf{B} 与 \mathbf{C} 不相似 |
| C. \mathbf{A} 与 \mathbf{C} 不相似, \mathbf{B} 与 \mathbf{C} 相似 | D. \mathbf{A} 与 \mathbf{C} 不相似, \mathbf{B} 与 \mathbf{C} 不相似 |

因为 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 都是上三角矩阵, 所以特征值都为 $2, 2, 1$, 那么

$$\text{rank}(2\mathbf{E} - \mathbf{A}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = 1 = 3 - 2$$

于是 \mathbf{A} 与 \mathbf{C} 相似; 同理

$$\text{rank}(2\mathbf{E} - \mathbf{B}) = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = 2 \neq 3 - 2$$

所以 \mathbf{B} 与 \mathbf{C} 不相似, 选 B.

13.3.2 矩阵的合同

例 13.3.7. 对于二次型 $f = \mathbf{x}^\top \mathbf{A} \mathbf{x}$ 经非奇异线性变换 $\mathbf{x} = \mathbf{C} \mathbf{y}$ 化为 $f = \mathbf{y}^\top \mathbf{B} \mathbf{y}$, 则 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 必定是

- | | | | |
|-------|-------|-------|-------------|
| A. 相等 | B. 相似 | C. 合同 | D. 具有相同的特征值 |
|-------|-------|-------|-------------|

令 $\mathbf{x} = \mathbf{C} \mathbf{y}$, 则

$$f = \mathbf{x}^\top \mathbf{A} \mathbf{x} = (\mathbf{C} \mathbf{y})^\top \mathbf{A} (\mathbf{C} \mathbf{y}) = (\mathbf{y}^\top \mathbf{C}^\top) \mathbf{A} (\mathbf{C} \mathbf{y}) = \mathbf{y}^\top (\mathbf{C}^\top \mathbf{A} \mathbf{C}) \mathbf{y} = \mathbf{y}^\top \mathbf{B} \mathbf{y}$$

因此 $\mathbf{B} = \mathbf{C}^\top \mathbf{A} \mathbf{C}$, 那么 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 合同.

例 13.3.8. 设矩阵 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -3 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 \\ 0 & 2 & 2 \end{pmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 3 & 0 \\ 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k \end{pmatrix}$, 若 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 合同但不相似, 则常数 k 的取值范围是多少.

若 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 合同但不相似, 说明 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 的正负特征值个数分别相同, 但是 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 的特征值不全相同, 则

$$\begin{aligned} |\lambda \mathbf{E} - \mathbf{A}| &= \begin{vmatrix} \lambda + 3 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda + 1 & -2 \\ 0 & -2 & \lambda - 2 \end{vmatrix} = (\lambda + 3)(\lambda^2 - \lambda - 6) \\ |\lambda \mathbf{E} - \mathbf{B}| &= \begin{vmatrix} \lambda & -3 & 0 \\ -3 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda - k \end{vmatrix} = (\lambda - k)(\lambda^2 - 9) \end{aligned}$$

那么 \mathbf{A} 的特征值为 $\lambda_1 = -3, \lambda_2 = -2, \lambda_3 = 3$, \mathbf{B} 的特征值为 $\lambda_1 = -3, \lambda_2 = k, \lambda_3 = 3$, 所以 $k < 0$ 且 $k \neq -2$.

13.3.3 可对角化

定理 13.3.2. 若存在不相等的实数 a, b , 使得 $(\mathbf{A} - a\mathbf{E})(\mathbf{A} - b\mathbf{E}) = \mathbf{O}$, 则矩阵 \mathbf{A} 一定能相似对角化.

证 因为 $(\mathbf{A} - a\mathbf{E})(\mathbf{A} - b\mathbf{E}) = \mathbf{O}$, 所以

$$n = \text{rank}((b - a)\mathbf{E}) = \text{rank}[(\mathbf{A} - a\mathbf{E}) - (\mathbf{A} - b\mathbf{E})] \leqslant \text{rank}(\mathbf{A} - a\mathbf{E}) + \text{rank}(\mathbf{A} - b\mathbf{E}) \leqslant n$$

故 $\text{rank}(\mathbf{A} - a\mathbf{E}) + \text{rank}(\mathbf{A} - b\mathbf{E}) = n$, 因此 \mathbf{A} 的属于特征值 a 的特征向量个数有 $n - \text{rank}(\mathbf{A} - a\mathbf{E})$; 属于特征值 b 的特征向量个数有 $n - \text{rank}(\mathbf{A} - b\mathbf{E})$, 共有

$$2n - [\text{rank}(\mathbf{A} - a\mathbf{E}) + \text{rank}(\mathbf{A} - b\mathbf{E})] = n$$

又因为 \mathbf{A} 有 n 个线性无关的特征向量等价于 \mathbf{A} 一定能相似对角化.

例 13.3.9 (2004 数一). 设矩阵 $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 \\ -1 & 4 & -3 \\ 1 & a & 5 \end{pmatrix}$ 的特征方程有一个二重根, 求 a 的值, 并讨论 A 是否可相似对角化.

$$|\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 1 & -2 & 3 \\ 1 & \lambda - 4 & 3 \\ -1 & -a & \lambda - 5 \end{vmatrix} \xrightarrow{\text{r}_1 - r_2, \text{r}_2 + r_3} \begin{vmatrix} \lambda - 2 & 2 - \lambda & 0 \\ 0 & \lambda - 4 - a & \lambda - 2 \\ -1 & -a & \lambda - 5 \end{vmatrix} = (\lambda - 2)[(\lambda - 5)(\lambda - 4 - a) + (\lambda - 2)(1 + a)], \text{ 当 } \lambda = 2 \text{ 是方程的二重根时, 则有 } (2 - 5)(2 - 4 - a) = 0 \Rightarrow a = -2, \text{ 于是 } A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 \\ -1 & 4 & -3 \\ 1 & -2 & 5 \end{pmatrix}, \text{ 此时, }$$

$$\text{rank}(2E - A) = \text{rank} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 3 \\ 1 & -2 & 3 \\ -1 & 2 & -3 \end{pmatrix} = \text{rank} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -3 \end{pmatrix} = 1 = 3 - 2$$

因此可以相似对角化; 当 2 不是方程的二重根时, $[(\lambda - 5)(\lambda - 4 - a) + (\lambda - 2)(1 + a)]$ 为完全平方数, 解得 $a = -\frac{2}{3}$, 此时 4

是该方程的二重根, 于是 $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 \\ -1 & 4 & -3 \\ 1 & -\frac{2}{3} & 5 \end{pmatrix}$, $\text{rank}(4E - A) \neq 1$, 于是 $a = -\frac{2}{3}$ 时, A 不能相似对角化.

例 13.3.10. 设矩阵 $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$

(1) 已知 A 的一个特征值为 3, 求 y ;

(2) 求矩阵 P , 使得 $AP^\top(AP)$ 为对角矩阵.

(1) 因为

$$|\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda & -1 & 0 & 0 \\ -1 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda - y & -1 \\ 0 & 0 & -1 & \lambda - 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \lambda & -1 \\ -1 & \lambda \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \lambda - y & -1 \\ -1 & \lambda - 2 \end{vmatrix} = (\lambda^2 - 1)[(\lambda - y)(\lambda - 2) - 1] = 0$$

将 $\lambda = 3$ 代入得, $y = 2$.

(2) 由 (1) 可知 $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$, 那么 $A^\top = A$, 得 $(AP)^\top(AP) = P^\top A^2 P$, 而 $A^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 4 \\ 0 & 0 & 4 & 5 \end{pmatrix}$, 由

$|\lambda E - A^2| = 0$ 解得 $\lambda_1 = 1$ (三重), $\lambda_2 = 9$, 对应 $\lambda_1 = 1$ 的特征向量为

$$\alpha_1 = (1, 0, 0, 0)^\top, \alpha_2 = (0, 1, 0, 0)^\top, \alpha_3 = (0, 0, -1, 1)^\top$$

标准正交化得

$$\beta_1 = (1, 0, 0, 0)^\top, \beta_2 = (0, 1, 0, 0)^\top, \beta_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(0, 0, -1, 1)^\top$$

对应于 $\lambda_2 = 9$ 的特征向量为 $\alpha_4 = (0, 0, 1, 1)^\top$, 经过单位化后, $\beta_4 = \frac{1}{\sqrt{2}}(0, 0, 1, 1)^\top$, 于是

$$P = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, (AP)^\top(AP) = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 9 \end{pmatrix}.$$

例 13.3.11. 设矩阵 $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ x & 4 & y \\ -3 & -3 & 5 \end{pmatrix}$ 有 3 个线性无关的特征向量, 且 $\lambda = 2$ 是 A 的二重特征值.

(1) 求 x, y 的值;

(2) 求可逆矩阵 P , 使得 $P^{-1}AP$ 为对角矩阵.

(1) 根据题设, A 有 3 个线性无关的特征向量, 所以 A 可对角化, A 的任一特征值的几何重数与代数重数相等, 对于特征值 $\lambda = 2$ (二重), A 有两个线性无关的特征向量, 由此可知 $\text{rank}(2E - A) = 1$, 利用初等行变化, 得

$$2E - A = \begin{pmatrix} 2 & & \\ & 2 & \\ & & 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ x & 4 & y \\ -3 & -3 & 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -x & -2 & -y \\ 3 & 3 & -3 \end{pmatrix} \xrightarrow{\frac{r_2+r_1 \cdot x}{r_3-3r_1}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & x-2 & -y-x \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

因此, 有 $x = 2, y = -2$.

(2) 由 (1) 可知, $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 2 & 4 & -2 \\ -3 & -3 & 5 \end{pmatrix}$, 那么矩阵 A 的特征多项式为

$$f(\lambda) = |\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 1 & 1 & -1 \\ -2 & \lambda - 4 & 2 \\ 3 & 3 & \lambda - 5 \end{vmatrix} \xrightarrow{\frac{r_2+2r_1}{r_3-3r_1}} \begin{vmatrix} \lambda - 1 & 1 & -1 \\ 2\lambda - 4 & \lambda - 2 & 0 \\ 6 - 3\lambda & 0 & \lambda - 2 \end{vmatrix} = (\lambda - 2)(\lambda - 6)$$

解得 $\lambda_1 = \lambda_2 = 2, \lambda_3 = 6$, 对于特征值 $\lambda_{1,2} = 2$, 解齐次方程组 $(2E - A)x = 0$, 对应的特征向量为 $\alpha_1 = (1, -1, 0)^\top, \alpha_2 = (1, 0, 1)^\top$, 对于特征值 $\lambda_3 = 6$, 解齐次方程组 $(6E - A)x = 0$, 对应的特征向量为 $\alpha_3 = (1, -2, 3)^\top$,

令 $P = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & -2 \\ 0 & 1 & 3 \end{pmatrix}$, 则 $P^{-1}AP = \begin{pmatrix} 2 & & \\ & 2 & \\ & & 6 \end{pmatrix}$ 为对角矩阵.

13.4 方阵的幂

定义 13.4.1 (方阵的幂). 对 n 阶方阵 A , 定义 $A^k = \underbrace{A \cdot A \cdots \cdot A}_{k \text{ 个}}$, 称为 A 的 k 次幂.

例 13.4.1. 设 $A = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{pmatrix}$, 求 A^9 .

$$A^2 = \left(\begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{pmatrix} \right)^2 = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} 6 & -3 & -3 \\ -3 & 6 & -3 \\ -3 & -3 & 6 \end{pmatrix} = A, \text{ 因此 } A^9 = A(A^2)^4 = AA^4 = A(A^2)^2 = A^2 = A.$$

13.4.1 利用方阵的迹求解

定理 13.4.1 (秩一矩阵的幂). 当 A 为方阵且秩 $\text{rank } A = 1$, 则 $A^n = [\text{tr}(A)]^{n-1} A$.

例 13.4.2. 设 $A = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ 2a & 2b & 2c & 2d \\ 3a & 3b & 3c & 3d \\ 4a & 4b & 4c & 4d \end{pmatrix}$ (a, b, c, d 不全为 0, 求解 A^n).

显然 $\text{rank } \mathbf{A} = 1$, 则

$$\mathbf{A}^n = [\text{tr}(\mathbf{A})]^{n-1} \mathbf{A} = (a + 2b + 3c + 4d)^{n-1} \mathbf{A}.$$

例 13.4.3. 设 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, 已知矩阵 \mathbf{B} 与矩阵 \mathbf{A} 相似, 求 $\text{rank}(\mathbf{B} - 2\mathbf{E}) + \text{rank}(\mathbf{B} - \mathbf{E})$, 及 $(\mathbf{A} - \mathbf{E})^n$, n 为大于 1 的正整数.

因为 $\mathbf{B} \sim \mathbf{A}$, 所以

$$\begin{aligned} \text{rank}(\mathbf{B} - 2\mathbf{E}) + \text{rank}(\mathbf{B} - \mathbf{E}) &= \text{rank}(\mathbf{A} - 2\mathbf{E}) + \text{rank}(\mathbf{A} - \mathbf{E}) = \text{rank} \begin{pmatrix} -2 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -2 \end{pmatrix} + \text{rank} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \\ &= 3 + 1 = 4 \end{aligned}$$

因为 $\text{rank}(\mathbf{A} - \mathbf{E}) = 1$, 所以 $(\mathbf{A} - \mathbf{E})^n = [\text{tr}(\mathbf{A} - \mathbf{E})]^{n-1} (\mathbf{A} - \mathbf{E}) = (-2)^{n-1} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}$.

13.4.2 利用幂零矩阵求解

例 13.4.4. 设 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, 求解 \mathbf{A}^n .

因为 $\mathbf{A}^4 = \mathbf{O}$, 并且

$$\mathbf{A}^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}^3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

13.4.3 利用二项式展开求解

例 13.4.5. 设 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, 求 \mathbf{A}^n .

由 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \mathbf{E} + \mathbf{B}$, 而 $\mathbf{B}^2 = \begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \mathbf{0}$, 所以当 $k \geq 2$ 时, 有 $\mathbf{B}^k = \mathbf{0}$, 而单位矩阵 \mathbf{E} 与任意矩阵可换, 由二项式定理, 得

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^n &= (\mathbf{E} + \mathbf{B})^n = \sum_{k=0}^n C_n^k \mathbf{E}^{n-k} \mathbf{B}^k = \mathbf{E}^n + C_n^1 \mathbf{E}^{n-1} \mathbf{B} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + n \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 3n \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

例 13.4.6 (2002 复旦大学). 证明:

$$\begin{pmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}^{100} = \begin{pmatrix} 51 & -50 \\ 50 & -49 \end{pmatrix}.$$

证 注意到

$$\begin{pmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} (1, -1) = \mathbf{E} + \boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{\beta}^\top$$

其中 \mathbf{E} 是二阶单位矩阵, $\boldsymbol{\alpha} = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)^\top$, $\boldsymbol{\beta} = (1, -1)^\top$, 并且 $\boldsymbol{\beta} \boldsymbol{\alpha}^\top = 0$, 所以

$$(\boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{\beta}^\top)^2 = (\boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{\beta}^\top)(\boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{\beta}^\top) = \boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\beta}^\top \boldsymbol{\alpha}) \boldsymbol{\beta}^\top = \mathbf{O}$$

于是

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}^{100} &= (\mathbf{E} + \boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{\beta}^\top)^{100} = \sum_{k=0}^{100} C_{100}^k (\boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{\beta}^\top)^k = \mathbf{E} + 100 \boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{\beta}^\top \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + 100 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} (1, -1) = \begin{pmatrix} 51 & -50 \\ 50 & -49 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

13.4.4 Cayley-Hamilton 定理

定理 13.4.2 (Cayley-Hamilton). 设 n 阶方阵 \mathbf{A} 的特征多项式为 $\varphi(\lambda) = \lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + \cdots + a_1\lambda + a_0$, 则

$$\varphi(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^n + a_{n-1}\mathbf{A}^{n-1} + \cdots + a_1\mathbf{A} + a_0\mathbf{E}_n = \mathbf{O}.$$

13.4.5 矩阵幂转化

例 13.4.7. 设 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & -1 \\ 0 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & 9 \end{pmatrix}$, 求一个矩阵 \mathbf{B} 使得 $\mathbf{B}^2 = \mathbf{A}$.

因为 \mathbf{A} 是一上三角矩阵, 那么 \mathbf{A} 的特征值分别为 $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 4$, $\lambda_3 = 9$, 所以 \mathbf{A} 一定能相似对角化, 因此存在一可逆实矩阵 \mathbf{P} , 使得 $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P} = \text{diag}(1, 4, 9)$, 易得 λ_1 对应的特征向量为 $\xi_1 = (1, 0, 0)^\top$; λ_2 对应的特征向量为 $\xi_2 = (1, 1, 0)^\top$; λ_3 对应的特征向量为 $\xi_3 = (1, 4, 4)^\top$, 则取 $\mathbf{P} = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$, 于是

$$\mathbf{A} = \mathbf{P} \text{diag}(1, 4, 9) \mathbf{P}^{-1} = \mathbf{P} \text{diag}((\pm 1)^2, (\pm 2)^2, (\pm 3)^2) \mathbf{P}^{-1} = \mathbf{P} \Lambda \mathbf{P}^{-1} \mathbf{P} \Lambda \mathbf{P}^{-1} \Rightarrow \mathbf{B} = \mathbf{P} \Lambda \mathbf{P}^{-1}$$

$$\text{因此 } \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 2 & \\ & & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -1 & \frac{3}{4} \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -\frac{1}{2} \\ 0 & 2 & \frac{1}{3} \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}.$$

第 14 章

二次型

“数学是一种无限的创造力，它能够解释和预测自然界的现像。”

——欧拉

二次型在数学和应用领域中有广泛的应用和重要性。它可以用于描述几何对象的性质、最优化问题的求解、物理学中的能量和动能等物理量、统计学中的数据分析和建模，以及工程和控制系统中的应用等。通过对二次型进行矩阵分析和特征值分解等方法，可以得到二次型的特性和解决各种问题。

14.1 正定性与半正定性

14.1.1 正定性

定理 14.1.1 (Hurwitz 定理). 对称矩阵 A 为正定的充分必要条件: A 的各阶主子式 (顺序主子式) 都为正, 即

$$a_{11} > 0, \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} > 0, \dots, \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} > 0.$$

对称矩阵 A 为负定的充分必要条件: 奇数阶主子式为负, 偶数阶主子式为正, 即

$$(-1)^r \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1r} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{r1} & \cdots & a_{rr} \end{vmatrix} > 0 (r = 1, 2, \dots, n).$$

定理 14.1.2 (实对称方阵的等价命题). 设 $S = (s_{ij})$ 是 n 阶实对称方阵, 则下述命题等价:

- (1) 方阵 S 是正定的;

- (2) 方阵 S 的每一个特征值均为正的;
- (3) 存在正定对称方阵 S_1 , 使得 $S = S_1^2$;
- (4) 存在可逆方阵 P , 使得 $S = P^\top P$;
- (5) 方阵 S 的每个主子式均为正的;
- (6) 方阵 S 的顺序主子式均为正的.

例 14.1.1. 判断二次型 $f(x_1, x_2, x_3) = 5x_1^2 + 6x_2^2 + 4x_3^2 - 4x_1x_2 - 4x_2x_3$ 是否正定.

因为 $\begin{array}{c} \cdots \\ x_1 \\ \cdots \\ x_2 \\ \cdots \\ x_3 \end{array} \begin{array}{c} \cdots \\ 5 \\ \cdots \\ -2 \\ \cdots \\ 0 \end{array} \begin{array}{c} \cdots \\ -2 \\ \cdots \\ 6 \\ \cdots \\ -2 \end{array} \begin{array}{c} \cdots \\ 0 \\ \cdots \\ 4 \end{array}$, 所以 f 的矩阵 $A = \begin{pmatrix} 5 & -2 & 0 \\ -2 & 6 & -2 \\ 0 & -2 & 4 \end{pmatrix}$, 故 A 的顺序主子式分别为

$$|5| = 5 > 0, \begin{vmatrix} 5 & -2 \\ -2 & 6 \end{vmatrix} = 26 > 0, \begin{vmatrix} 5 & -2 & 0 \\ -2 & 6 & -2 \\ 0 & -2 & 4 \end{vmatrix} = 84 > 0$$

所以这个二次型是正定的.

例 14.1.2. t 满足什么条件时, 下列二次型是正定的:

- (1) $f = x_1^2 + x_2^2 + 5x_3^2 + 2tx_1x_2 - 2x_1x_3 + 4x_2x_3$;
- (2) $f = x_1^2 + 4x_2^2 + x_3^2 + 2tx_1x_2 + 10x_1x_3 + 6x_2x_3$.

(1) 因为 $\begin{array}{c} \cdots \\ x_1 \\ \cdots \\ x_2 \\ \cdots \\ x_3 \end{array} \begin{array}{c} \cdots \\ 1 \\ \cdots \\ t \\ \cdots \\ -1 \end{array} \begin{array}{c} \cdots \\ t \\ \cdots \\ 1 \\ \cdots \\ 2 \end{array} \begin{array}{c} \cdots \\ -1 \\ \cdots \\ 2 \\ \cdots \\ 5 \end{array}$, 所以 f 的矩阵 $A_1 = \begin{pmatrix} 1 & t & -1 \\ t & 1 & 2 \\ -1 & 2 & 5 \end{pmatrix}$, 故 A 的顺序主子式分别为

$$|1| = 1 > 0, \begin{vmatrix} 1 & t \\ t & 1 \end{vmatrix} = 1 - t^2 > 0, \begin{vmatrix} 1 & t & -1 \\ t & 1 & 2 \\ -1 & 2 & 5 \end{vmatrix} = -t(5t + 4) > 0$$

所以当 $-\frac{4}{5} < t < 0$ 时, $f(x_1, x_2, x_3)$ 是正定的.

(2) f 的矩阵 $A_2 = \begin{pmatrix} 1 & t & 5 \\ t & 4 & 3 \\ 5 & 3 & 1 \end{pmatrix}$, 那么 A 的顺序主子式分别为

$$|1| = 1 > 0, \begin{vmatrix} 1 & t \\ t & 4 \end{vmatrix} = 4 - t^2 > 0, \begin{vmatrix} 1 & t & 5 \\ t & 4 & 3 \\ 5 & 3 & 1 \end{vmatrix} = -t^2 + 30t - 105 > 0$$

因为 $4 - t^2$ 与 $-t^2 + 30t - 105$ 不能同时大于零, 所以无论 t 取什么值, 这个二次型都不能是正定的.

例 14.1.3. 判断二次型 $f = -5x^2 - 6y^2 - 4z^2 + 4xy + 4xz$ 的正定性.

因为 $\begin{array}{c} \cdots \\ x \\ \cdots \\ y \\ \cdots \\ z \end{array} \begin{array}{c} \cdots \\ -5 \\ \cdots \\ 2 \\ \cdots \\ 2 \end{array} \begin{array}{c} \cdots \\ 2 \\ \cdots \\ -6 \\ \cdots \\ 0 \end{array} \begin{array}{c} \cdots \\ 2 \\ \cdots \\ 0 \\ \cdots \\ -4 \end{array}$, 所以 f 的矩阵 $A = \begin{pmatrix} -5 & 2 & 2 \\ 2 & -6 & 0 \\ 2 & 0 & -4 \end{pmatrix}$, 故 A 的顺序主子式分别为

$$|-5| = -5 < 0, \begin{vmatrix} -5 & 2 \\ 2 & -6 \end{vmatrix} = 26 > 0, \begin{vmatrix} -5 & 2 & 2 \\ 2 & -6 & 0 \\ 2 & 0 & -4 \end{vmatrix} = -80 < 0$$

即 f 是负定的.

定理 14.1.3 (特征值与正定性). 若一矩阵 A 是正定的, 则其所有特征值 $\lambda_i > 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$).

例 14.1.4. 设 A 是 3 阶正定矩阵, 证明 $|A + 2E| > 8$.

证 由 A 是正定的, 则 $\lambda_{1,2,3} > 0$, 那么 $|A + 2E| = (\lambda_1 + 2)(\lambda_2 + 2)(\lambda_3 + 2) \geq 8$.

例 14.1.5 (2000 清华大学). 设 n 阶实方阵 ($n \geq 2$)

$$A = \begin{pmatrix} b+8 & 3 & 3 & \cdots & 3 \\ 3 & b & 1 & \cdots & 1 \\ 3 & 1 & b & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 1 \\ 3 & 1 & \cdots & 1 & b \end{pmatrix}$$

试求 b 的取值范围, 使 A 为正定矩阵.

设 k 维列向量 $\alpha = (3, 1, \dots, 1)^\top$, 则 A 的 k 阶顺序主子式为

$$\begin{aligned} |A_k| &= \left| \begin{pmatrix} b-1 & & & \\ & b-1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & b-1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} (3, 1, \dots, 1)^\top \right| = |(b-1)E_k + \alpha\alpha^\top| \\ &= (b-1)^{k-1}|(b-1)E_1 + \alpha^\top\alpha| = (b-1)^{k-1}(b+k+7) \end{aligned}$$

因为 A 的正定的充分必要条件是

$$|A_k| > 0 \Leftrightarrow b > 1 \text{ 且 } b > -(k+7), k = 1, 2, \dots, n$$

所以, 当 $b > 1$ 时 A 是正定矩阵.

$$A = \begin{pmatrix} a & 1 & -1 \\ 1 & a & -1 \\ -1 & -1 & a \end{pmatrix},$$

(1) 求正交矩阵 P , 使得 $P^\top AP$ 为对角矩阵;

(2) 求正定矩阵 C , 使得 $C^2 = (a+3)E - A$.

$$(1) \text{ 法一: } |\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda - a & -1 & 1 \\ -1 & \lambda - a & 1 \\ 1 & 1 & \lambda - a \end{vmatrix} \xrightarrow{\frac{r_1+r_3}{r_2+r_3}} \begin{vmatrix} \lambda - a + 1 & 0 & \lambda - a + 1 \\ 0 & \lambda - a + 1 & \lambda - a + 1 \\ 1 & 1 & \lambda - a \end{vmatrix} = (\lambda - a + 1)^2(\lambda - a - 2) = 0,$$

因此特征值为 $\lambda_1 = a + 2$, $\lambda_{2,3} = a - 1$ (二重), 则 λ_1 对应的特征向量为 $\xi_1 = (-1, -1, 1)^\top$, $\lambda_{2,3}$ 对应的特征向量分别为 $\xi_2 = (-1, 1, 0)^\top$, $\xi_3 = (1, 0, 1)^\top$, 下作特征向量的正交单位化,

$$\alpha_1 = \xi_1, \alpha_2 = \xi_2 - \frac{[\alpha_1, \xi_2]}{[\alpha_1, \alpha_1]}\alpha_1 = \xi_2, \alpha_3 = \xi_3 - \frac{[\alpha_1, \xi_3]}{[\alpha_1, \alpha_1]}\alpha_1 - \frac{[\alpha_2, \xi_3]}{[\alpha_2, \alpha_2]}\alpha_2 = (1, 1, 2)^\top$$

单位化

$$e_1 = \frac{1}{\|\alpha_1\|}\alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}\begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}, e_2 = \frac{1}{\|\alpha_2\|}\alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, e_3 = \frac{1}{\|\alpha_3\|}\alpha_3 = \frac{1}{\sqrt{6}}\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

得正交矩阵 $P = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}$, 使得 $P^\top AP = \begin{pmatrix} a+2 & & \\ & a-1 & \\ & & a-1 \end{pmatrix}$.

法二: 因为 $A = \begin{pmatrix} a & 1 & -1 \\ 1 & a & -1 \\ -1 & -1 & a \end{pmatrix}$, 于是

$$f(\lambda) = \lambda^3 - \text{tr } A\lambda^2 + \sum_{1 \leq j_1 < j_2 \leq 3} A \begin{vmatrix} a_{j_1 j_1} & a_{j_1 j_2} \\ a_{j_2 j_1} & a_{j_2 j_2} \end{vmatrix} - \det A = \lambda^3 - 3a\lambda^2 + 3(a^2 - 1)\lambda - (a-1)^2(a+2) = 0$$

$$\text{即得特征值 } \lambda_1 = a+2, \lambda_{2,3} = a-1 \text{ (二重), 当 } \lambda = \lambda_1 \text{ 时, } \lambda_1 E - A = \begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_3 - r_1 - r_2} \begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

那么 r_1 可由 r_2 与 $(3, -3, 0)$ 线性表示, 则

$$(2, -1, 1) \times (3, -3, 0) = (3, 3, -3) \Rightarrow (1, 1, -1) \Rightarrow \xi_1 = (1, 1, -1)^\top$$

$$\text{当 } \lambda = \lambda_{2,3} \text{ 时, } \lambda_{2,3} E - A = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \xrightarrow[r_2 + r_3]{r_1 + r_3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \text{ 那么}$$

$$r_1 \cdot (1, 1, 2) = 0, r_1 \times (1, 1, 2) = (-3, 3, 0) \Rightarrow (-1, 1, 0)$$

$$\text{则取 } \xi_2 = (-1, 1, 0)^\top, \xi_3 = (1, 1, 2)^\top, \text{ 因此 } \xi_{1,2,3} \text{ 已经两两相互正交, 则正交矩阵 } P = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}, \text{ 使}$$

$$\text{得 } P^\top AP = \begin{pmatrix} a+2 & & \\ & a-1 & \\ & & a-1 \end{pmatrix}.$$

$$(2) \text{ 因为 } P^\top AP = \begin{pmatrix} a+2 & & \\ & a-1 & \\ & & a-1 \end{pmatrix}, \text{ 所以 } P^\top [(a+3)E - A]P = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 4 & \\ & & 4 \end{pmatrix}, \text{ 即}$$

$$(a+3)E - A = P \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 4 & \\ & & 4 \end{pmatrix} P^\top = P \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 2 & \\ & & 2 \end{pmatrix} P^\top \cdot P \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 2 & \\ & & 2 \end{pmatrix} P^\top$$

$$C = P \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 2 & \\ & & 2 \end{pmatrix} P^\top \Rightarrow \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 2 & \\ & & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}^\top = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 5 & -1 & 1 \\ -1 & 5 & 1 \\ 1 & 1 & 5 \end{pmatrix}.$$

14.1.2 半正定性

定理 14.1.4 (对称方阵的等价命题). 设 S 是 n 阶对称方阵, 则下述命题等价:

- (1) 方阵 S 是半正定的;
- (2) 方阵 S 的所有特征值均为非负的;
- (3) 存在 n 阶半正定对称方阵 S_1 , $\text{rank } S_1 = \text{rank } S$, 使得 $S = S_1^2$;
- (4) 存在 n 阶方阵 P , $\text{rank } P = \text{rank } S$, 使得 $S = P^\top P$;

(5) 方阵 S 的所有主子式均为非负的;

(6) 方阵 S 的所有 k 阶主子式之和均为非负的, $k = 1, 2, \dots, n$.

定理 14.1.5. 若 A 是 n 阶正定矩阵, B 是 n 阶非零半正定矩阵, 则 $A + B$ 是正定矩阵, 且

$$\det(A + B) > \det A + \det B.$$

例 14.1.7 (2005 武汉大学). 已知实二次型 $f = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + 9x_4^2 + 2a(x_1x_2 + x_2x_3 + x_3x_1)$, 问当 a 取何值时, f 是正定的、半正定的以及不定的二次型?

二次型 f 的矩阵为 $A = \begin{pmatrix} 1 & a & a & 0 \\ a & 1 & a & 0 \\ a & a & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9 \end{pmatrix}$, 得 A 的顺序主子式分别为

$$\Delta_1 = 1, \Delta_2 = (1-a)(1+a), \Delta_3 = (1-a)^2(1+2a), \Delta_4 = 9\Delta_3$$

由此可见,

(1) 当 $-\frac{1}{2} < a < 1$ 时, f 为正定二次型;

(2) 当 $a = -\frac{1}{2}$ 或 $a = 1$, f 为半正定二次型;

(3) 当 $a < -\frac{1}{2}$ 或 $a > 1$ 时, f 为不定二次型.

例 14.1.8 (2014 南京大学). 设 A, B 均为 n 阶实对称矩阵, B 正定, 且 $A - B$ 半正定, 证明:

(1) 若 λ 是 $|A - \lambda B| = 0$ 的根, 则 $\lambda \geq 1$;

(2) $\det A \geq \det B$.

证

(1) 因为 A, B 均为 n 阶实对称矩阵, 所以存在可逆实矩阵 P , 使得 $P^\top BP = E$, $P^\top AP$ 仍为实对称矩阵, 故又存在正交矩阵 Q 使得,

$$Q^\top (P^\top AP) Q = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$$

其中 λ_k , ($k = 1, 2, \dots, n$) 为 $P^\top AP$ 的特征值, 又因为

$$|\lambda E - P^\top AP| = |\lambda P^\top BP - P^\top AP| = |P^2| |\lambda B - A| = |B| |P^2| |\lambda E - AB^{-1}| = 0$$

因为 B 是正定的, $\det P^2 > 0$, 所以 $|B| |P^2| > 0$, 所以 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 是 AB^{-1} 的全部特征值, 也是 $|A - \lambda B|$ 的所有根, 又因为 $P^\top (A - B)P$ 是实对称矩阵, 其特征值为 $\lambda_1 - 1, \lambda_2 - 1, \dots, \lambda_n - 1$, 所以 $A - B$ 半正定当且仅当 $P^\top (A - B)P$ 半正定, 这又等价为 $\lambda_k - 1 \geq 0$, ($k = 1, 2, \dots, n$), 即 $|A - \lambda B| = 0$ 的任一根 $\lambda \geq 1$.

(2) 由 (1) 可知 $\det(AB^{-1}) = \prod_{i=1}^r \lambda_i \geq 1$, 所以 $\det A \geq \det B$.

例 14.1.9 (1994 华中师范大学). 设 $A_{m \times n}$, $B_{s \times n}$ 均为行满秩实矩阵, $Q = AB^\top (BB^\top)^{-1} BA^\top$, 证明:

(1) $AA^\top - Q$ 是半正定的;

(2) $0 \leq \det Q \leq \det(AB^\top)$.

证

(1) 由题意知: $\text{rank } \mathbf{A} = m$, $\text{rank } \mathbf{B} = s$, 且 $\text{rank} (\mathbf{AA}^\top) = m$, $\text{rank} (\mathbf{BB}^\top) = s$, 所以 \mathbf{AA}^\top , \mathbf{BB}^\top 均为可逆矩阵, 并且分块矩阵 $\begin{pmatrix} \mathbf{AA}^\top & \mathbf{AB}^\top \\ \mathbf{BA}^\top & \mathbf{BB}^\top \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix}^\top$ 是半正定的, 且与 $\begin{pmatrix} \mathbf{AA}^\top - \mathbf{Q} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{BB}^\top \end{pmatrix}$ 合同, 因此 $\mathbf{AA}^\top - \mathbf{Q}$ 是半正定的.

(2) 易知 \mathbf{AA}^\top 是正定的, \mathbf{Q} 是半正定的, 所以存在可逆矩阵 P , 使得

$$\mathbf{P}^\top (\mathbf{AA}^\top) \mathbf{P} = \mathbf{E}, \quad \mathbf{P}^\top \mathbf{Q} \mathbf{P} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n), \quad (\lambda_k \geq 0)$$

又因为 $\mathbf{AA}^\top - \mathbf{Q}$ 是半正定的, 所以 $1 - \lambda_k \geq 0$ 即 $0 \leq \lambda_k \leq 1$, 其中 $k = 1, 2, \dots, n$,

$$\det(\mathbf{P}^\top \mathbf{Q} \mathbf{P}) = |\mathbf{P}^2| |\mathbf{Q}| = \prod_{i=1}^r \lambda_i \leq 1 = |\mathbf{P}^2| |\mathbf{AA}^\top| \Rightarrow 0 \leq \det \mathbf{Q} \leq \det(\mathbf{AA}^\top).$$

推论 14.1.1 (实对称半正定矩阵的单调性). 设 \mathbf{A} , \mathbf{B} , $\mathbf{A} - \mathbf{B}$ 均为 n 阶实对称半正定矩阵, 即 $\mathbf{A} \geq \mathbf{B} \geq 0$, 则 $\det \mathbf{A} \geq \det \mathbf{B} \geq 0$.

14.2 二次型

14.2.1 二次型的矩阵表示

定义 14.2.1 (二次型). 含有 n 个变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的二次齐次多项式

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_{11}x_1^2 + 2a_{12}x_1x_2 + \dots + 2a_{1n}x_1x_n + a_{22}x_2^2 + 2a_{23}x_2x_3 + \dots + 2a_{2n}x_2x_n + \dots + a_{nn}x_n^2$$

称为 n 元二次型, 简称二次型.

常见的三元二次型:

$$f(x_1, x_2, x_3) = ax_1^2 + bx_2^2 + cx_3^2 + dx_1x_2 + ex_3x_2 + fx_1x_3$$

几何意义: 三元二次型的几何图形是空间曲面.

定义 14.2.2 (二次型的矩阵表达). 在二次型表达式中取 $a_{ij} = a_{ji}$, 则

$$2a_{ij}x_i x_j = a_{ij}x_i x_j + a_{ji}x_j x_i$$

于是上述二次型可以写为

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}x_i x_j = (x_1, x_2, \dots, x_n) \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \mathbf{x}^\top \mathbf{A} \mathbf{x}$$

或

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = a \sum_{i=1}^n x_i^2 + 2b \sum_{1 \leq j < k \leq n} x_j x_k = (x_1, x_2, \dots, x_n) \begin{pmatrix} a & b & \cdots & b \\ b & a & \cdots & b \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b & b & \cdots & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \mathbf{x}^\top \mathbf{A} \mathbf{x}$$

其中 \mathbf{A} 是对称矩阵, 称为二次型 f 的矩阵, 矩阵 \mathbf{A} 的秩称为二次型 f 的秩.

例 14.2.1. 二次型

$$f(x_1, x_2, x_3) = x_1^2 + ax_2^2 + x_3^2 + 2x_1x_2 + 2ax_1x_3 + 2x_2x_3$$

的秩为 2, 求 a .

二次型 f 矩阵为 $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & a \\ 1 & a & 1 \\ a & 1 & 1 \end{pmatrix}$, 由题意 $\text{rank } A = 2 \Rightarrow \det A = 0 \Rightarrow a = -2$.

14.2.2 惯性指数与惯性定理

惯性定理

定理 14.2.1. 正(负)惯性指数等于标准形中正(负)平方项的个数, 等于标准形中 +1 (-1) 的个数, 也等于对应矩阵的正(负)特征值的个数.

定理 14.2.2 (惯性定理). 任意 n 元二次型 $\mathbf{x}^\top A \mathbf{x}$ 都可通过非退化线性替换化为规范形

$$z_1^2 + z_2^2 + \cdots + z_p^2 - z_{p+1}^2 - \cdots - z_{p+q}^2$$

其中 p 为正惯性指数, q 为负惯性指数, $p+q$ 为二次型的秩, 且 p, q 由二次型唯一确定, 即规范形是唯一的.

例 14.2.2. 二次型 $f(x_1, x_2, x_3) = \mathbf{x}^\top A \mathbf{x}$, 其中 $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{7}{2} & 1 \end{pmatrix}$, 求 f 的正惯性系数.

实对称矩阵 $A_0 = \frac{1}{2}(A + A^\top) = \frac{1}{2}\left(\begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{7}{2} & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & \frac{7}{2} \\ 2 & \frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$, 设 A_0 的特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 则

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = \text{tr } A_0 = 4 \\ \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = \det A_0 = -1 \end{cases} \quad \text{由 } \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 < 0 \text{ 知, 三个特征值中有且仅有一个特征值为负, 则 } f \text{ 的正惯性系数为 } 2.$$

例 14.2.3. 求二次型

$$f(x_1, x_2, x_3) = (x_1 + x_2)^2 + (x_2 - x_3)^2 + (x_1 + x_3)^2$$

的正惯性指数 p .

二次型 f 的矩阵为 $\begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ 1 & -1 & 2 \end{pmatrix}$, 那么特征方程为

$$|\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 2 & -1 & -1 \\ -1 & \lambda - 2 & 1 \\ -1 & 1 & \lambda - 2 \end{vmatrix} = \lambda(\lambda - 3)^2$$

故特征值为 3, 3, 0, 因此正惯性指数 $p = 2$.

定理 14.2.3. 若 $f(x_1, x_2, x_3) = (a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3)^2 + (b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3)^2 + (c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3)^2$, 令

$$\boldsymbol{\alpha} = (a_1, a_2, a_3)^\top, \boldsymbol{\beta} = (b_1, b_2, b_3)^\top, \boldsymbol{\gamma} = (c_1, c_2, c_3)^\top$$

则 f 的正惯性指数 $p = \text{rank}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma})$, 负惯性指数 $q = 0$.

例 14.2.4. 二次型 $f(x_1, x_2, x_3) = (x_1 + x_2 + x_3)^2 + (x_2 - x_3)^2 + (x_1 + 2x_3)^2$ 的正惯性指数与负惯性指数依次为

- A. 1, 0 B. 2, 0 C. 3, 0 D. 2, 1

令 $\boldsymbol{\alpha} = (1, 1, 1)^\top, \boldsymbol{\beta} = (0, 1, -1)^\top, \boldsymbol{\gamma} = (1, 0, 2)^\top$, 易知 $\text{rank}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}) = 2$, 则正惯性指数 $p = 2$, 负惯性指数 $q = 0$, 选 B.

例 14.2.5. (2012 数一) 二次型 $f(x_1, x_2, x_3) = x_1^2 + 3x_2^2 + x_3^2 + 2x_1x_2 + 2x_1x_3 + 2x_2x_3$, 求 f 的正惯性指数.

二次型的矩阵 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$, 于是

$$|\lambda\mathbf{E} - \mathbf{A}| = \frac{r_1 - r_3}{r_2 - r_3} \begin{vmatrix} \lambda & 0 & -\lambda \\ 0 & \lambda - 2 & -\lambda \\ -1 & -1 & \lambda - 1 \end{vmatrix} = \lambda(\lambda - 1)(\lambda - 4)$$

故 \mathbf{A} 的特征值为: 0, 1, 4, 所以正惯性指数为 2.

例 14.2.6. (2016 数二) 设二次型 $f(x_1, x_2, x_3) = a(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) + 2x_1x_2 + 2x_2x_3 + 2x_1x_3$ 的正、负惯性指数分别为 1, 2, 求 a 的取值范围.

二次型的矩阵 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a & 1 & 1 \\ 1 & a & 1 \\ 1 & 1 & a \end{pmatrix}$, 则 $|\lambda\mathbf{E} - \mathbf{A}| = (\lambda - a - 2)(\lambda - a + 1)^2 = 0$, 得特征值 $a + 2, a - 1$ (二重), 则 $a + 2 > 0, a - 1 < 0$, 故得 $-2 < a < 1$.

符号差

定义 14.2.3 (符号差). 正惯性指数 p 与负惯性指数 q 的差称为符号差 s , 即 $s = p - q$.

例 14.2.7. 设 \mathbf{A} 是 n 阶实对称矩阵, 秩为 r , 符号差为 s , 则必有

- | | |
|---------------------|----------------------|
| A. r 是奇数, s 是偶数 | B. s 是奇数, r 是偶数 |
| C. r, s 均为偶数 | D. r, s 或均为奇数或均为偶数 |

$r = p + q, s = p - q$, 那么 $r + s = 2p$, 从而 r, s 或均为奇数或均为偶数.

例 14.2.8. 求二次型

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = (n-1) \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2 \sum_{1 \leq j < k \leq n} x_j x_k$$

的符号差.

设此二次型的矩阵为 A , 则

$$A = \begin{pmatrix} n-1 & -1 & -1 & \cdots & -1 \\ -1 & n-1 & -1 & \cdots & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & -1 & -1 & \cdots & n-1 \end{pmatrix}$$

且 $|\lambda E - A| = \lambda(\lambda - n)^{n-1}$ (参考例题 9.1.16(2) 的解法), 所以 A 的特征值为 $\lambda_1 = \lambda_2 = \cdots = \lambda_{n-1} = n, \lambda_n = 0$, 故符号差 $s = n - 1$.

14.2.3 二次型化为标准形

运用偏导函数求标准形

运用偏导函数的思想将二次型化为标准形有以下两种情况:

- (1) 如果 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 中含有某变量的平方项, 即 a_{ii} ($i = 1, \dots, n$) 中至少有一个不为零, 不妨设 $a_{11} \neq 0$, 记 $f_1 = \frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial x_1}$, 令

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{a_{11}} f_1^2 + g$$

求得 g , 此时 g 中已不含 x_1 , 再记 $g_1 = \frac{1}{2} \frac{\partial g}{\partial x_2}$, 并令

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{a_{11}} f_1^2 + \frac{1}{a_{22}} g_1^2 + h$$

此时 h 中已不含 x_1 与 x_2 , 按这种方法继续运算, 可将二次型化为标准形;

- (2) 如果 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 中不含有任一变量的平方项, 即 $a_{ii} = 0$ ($i = 1, \dots, n$), 但至少有一个 $a_{1j} \neq 0$ ($j > 1$) 不为零 (a_{ij} 是 x_{ij} 项的系数), 不妨设 $a_{12} \neq 0$, 记 $f_1 = \frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial x_1}, f_2 = \frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial x_2}$, 令

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{a_{12}} [(f_1 + f_2)^2 - (f_1 - f_2)^2] + \varphi$$

求得 φ , 此时 φ 中已不含 x_1 与 x_2 , 观察 φ 的结构, 如果 φ 中含有变量的平方项, 则按情况一中的方法进行, 否则按情况二中的方法进行, 直至二次型化为标准形.

例 14.2.9. 将二次型 $f(x_1, x_2, x_3) = x_1^2 + 2x_2^2 - 4x_3^2 + 2x_1x_2 - 2x_2x_3$ 化为标准形.

记 $f_1 = \frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial x_1} = x_1 + x_2$, 令

$$f = \frac{1}{a_{11}} f_1^2 + g = (x_1 + x_2)^2 + g$$

求得 $g = x_2^2 - 4x_3^2 - 2x_2x_3$, 记 $g_1 = \frac{1}{2} \frac{\partial g}{\partial x_2} = x_2 - x_3$, 令

$$g = \frac{1}{a_{22}} g_1^2 + h$$

求得 $h = -5x_3^2$, 那么

$$f(x_1, x_2, x_3) = (x_1 + x_2)^2 + (x_2 - x_3)^2 - 5x_3^2$$

作可逆线性变换

$$\begin{cases} y_1 &= x_1 + x_2 \\ y_2 &= x_2 - x_3 \\ y_3 &= x_3 \end{cases}$$

则有 $f(y_1, y_2, y_3) = y_1^2 + y_2^2 - 5y_3^2$.

例 14.2.10. 将二次型 $f(x_1, x_2, x_3) = -4x_1x_2 + 2x_1x_3 + 2x_2x_3$ 化为标准形.

二次型中不含有任一变量的平方项, 记 $f_1 = \frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial x_1}$, $f_2 = \frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial x_2}$, 则有

$$f_1 = \frac{1}{2}(-4x_2 + 2x_3) = -2x_2 + x_3, \quad f_2 = \frac{1}{2}(-4x_1 + 2x_3) = -2x_1 + x_3$$

令

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{a_{12}} [(f_1 + f_2)^2 - (f_1 - f_2)^2] + \varphi = -\frac{1}{4} [(-2x_1 - 2x_2 + 2x_3)^2 - (2x_1 - 2x_2)^2] + \varphi \\ &= (x_1 - x_2)^2 - (x_1 + x_2 - x_3)^2 + \varphi = (2x_1 - x_3)(-2x_2 + x_3) + \varphi = -4x_1x_2 + 2x_1x_3 + 2x_2x_3 - x_3^2 + \varphi \end{aligned}$$

即 $\varphi = x_3^2$, 所以

$$f(x_1, x_2, x_3) = -(x_1 + x_2 - x_3)^2 + (x_1 - x_2)^2 + x_3^2$$

作可逆线性变换 $\begin{cases} y_1 = x_1 + x_2 - x_3 \\ y_2 = x_1 - x_2 \\ y_3 = x_3 \end{cases}$, 则有 $f(y_1, y_2, y_3) = -y_1^2 + y_2^2 + y_3^2$.

例 14.2.11. 二次型

$$f(x_1, x_2, x_3) = (x_1 + x_2)^2 + (x_1 + x_3)^2 - 4(x_2 - x_3)^2$$

的标准形为

A. $y_1^2 + y_2^2$

B. $y_1^2 - y_2^2$

C. $y_1^2 + y_2^2 - 4y_3^2$

D. $y_1^2 + y_2^2 - y_3^2$

将 f 完全展开, 得

$$f = 2x_1^2 - 3x_2^2 - 3x_3^2 + 2x_1x_2 + 2x_1x_3 + 8x_2x_3$$

那么

$$f_1 = \frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial x_1} = \frac{1}{2}(4x_1 + 2x_2 + 2x_3) = 2x_1 + x_2 + x_3$$

则

$$f = \frac{1}{a_{11}} f_1^2 + g = 2x_1^2 + \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}x_3^2 + 2x_1x_2 + 2x_1x_3 + x_2x_3 + g$$

对比可得 $g = -\frac{7}{2}x_2^2 - \frac{7}{2}x_3^2 + 7x_2x_3$, 再令

$$g_1 = \frac{1}{2} \frac{\partial g}{\partial x_2} = \frac{1}{2}(-7x_2 + 7x_3) = -\frac{7}{2}x_2 + \frac{7}{2}x_3$$

又 $g = \frac{1}{a_{22}} g_1^2 + h$, 可解出 $h = 0$, 因此可排除 C, D 选项,

$$f = \frac{1}{\sqrt{2}^2} (2x_1 + x_2 + x_3)^2 - \sqrt{\frac{7}{2}} (x_2 - x_3)^2$$

作可逆线性变换 $\begin{cases} y_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(2x_1 + x_2 + x_3) \\ y_2 = \sqrt{\frac{7}{2}}(x_2 - x_3) \\ y_3 = x_3 \end{cases}$, 因此 $f(y_1, y_2, y_3) = y_1^2 - y_2^2$ 选 B.

合同变换法的改进——行初等变换法

对矩阵 \mathbf{A} 作一系列初等行变换化为上三角形矩阵, 相同的列变换就将它化成了对角矩阵 \mathbf{A} (上三角形矩阵的对角元就是 \mathbf{A} 的对角元), 所用行变换同时将单位矩阵化成了 \mathbf{C}^\top , 即

$$(\mathbf{A}, \mathbf{I}) \xrightarrow{\text{行初等变换}} \left(\begin{pmatrix} d_1 & & * \\ & \ddots & \\ & & d_n \end{pmatrix}, \mathbf{C}^\top \right)$$

则 $C^\top AC = \begin{pmatrix} d_1 & & \\ & \ddots & \\ & & d_n \end{pmatrix}$.

例 14.2.12. 用行初等变换法将矩阵 $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & -4 \end{pmatrix}$ 化为标准形.

$(A, I) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -4 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_2-r_1} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -4 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_3+r_2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -5 & -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ 由此可得 $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -5 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, $C = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, 且 $C^\top AC = A$.

标准形确定惯性指数

例 14.2.13. 运用标准形求例题 14.2.3 的惯性指数 p 和 q .

$$f(x_1, x_2, x_3) = 2x_1^2 + 2x_2^2 + 2x_3^2 + 2x_1x_2 + 2x_1x_3 - 2x_2x_3, \text{ 令 } f_1 = \frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial x_1}, \text{ 则}$$

$$f_1 = \frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial x_1} = \frac{1}{2}(4x_1 + 2x_2 + 2x_3) = 2x_1 + x_2 + x_3$$

$$\text{记 } f = \frac{1}{a_{11}} f_1^2 + g, \text{ 对比可得 } g = \frac{3}{2}x_2^2 + \frac{3}{2}x_3^2 - 3x_2x_3 = \frac{3}{2}(x_2 - x_3)^2, \text{ 于是}$$

$$f = \frac{1}{2}(2x_1 + x_2 + x_3)^2 + \frac{3}{2}(x_2 - x_3)^2$$

于是正惯性指数 $p = 2$, 负惯性指数 $q = 0$.

例 14.2.14. 设 $f(x_1, x_2, x_3) = ax_1^2 + (a-1)x_2^2 + (a+2)x_3^2$ 的标准形是 $y_1^2 - y_2^2 - y_3^2$, 求 a 的取值范围.

由题意可知 $p = 1, q = 2$, 于是 $a-1 < a < 0 < a+2 \Rightarrow -2 < a < 0$.

可逆变换

例 14.2.15. 化二次型 $f = 2x_2^2 + 2x_1x_3$ 为标准形, 并写出所用坐标变换.

$$f = 2x_2^2 + \frac{1}{2}(x_1 + x_3)^2 - \frac{1}{2}(x_1 - x_3)^2, \text{ 令 } \begin{cases} z_1 = \sqrt{2}x_2 \\ z_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(x_1 + x_3) \\ z_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(x_1 - x_3) \end{cases} \text{ 则 } x = Cz, \text{ 其中 } C = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}.$$

例 14.2.16. 将二次型

$$f(x_1, x_2, x_3) = x_1^2 + 3x_2^2 + 3x_3^2 + 2x_1x_2 - 4x_1x_3$$

化为标准形, 并写出所用坐标变换.

f 的标准形为

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, x_3) &= (x_1 + x_2 - 2x_3)^2 + 2(x_2 + x_3)^2 - 3x_3^2 \\ \text{故令 } \begin{cases} z_1 = x_1 + x_2 - 2x_3 \\ z_2 = x_2 + x_3 \\ z_3 = x_3 \end{cases} \text{ 即坐标变换 } \begin{cases} x_1 = z_1 - z_2 + 3z_3 \\ x_2 = z_2 - z_3 \\ x_3 = z_3 \end{cases}, \text{ 或 } \mathbf{x} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 3 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{z}, \text{ 则有} \\ f &= z_1^2 + 2z_2^2 - 3z_3^2. \end{aligned}$$

例 14.2.17. 已知二次型

$$f(x_1, x_2, x_3) = x_1^2 + 2x_2^2 + 2x_3^2 + 2x_1x_2 - 2x_1x_3, g(y_1, y_2, y_3) = y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + 2y_2y_3$$

求可逆变换 $\mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{y}$ 将 f 化为 g .

f 的标准形为

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, x_3) &= (x_1 + x_2 - x_3)^2 + (x_2 + x_3)^2 \\ \text{故令 } \begin{cases} z_1 = x_1 + x_2 - x_3 \\ z_2 = x_2 + x_3 \\ z_3 = x_3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_1 = z_1 - z_2 + 2z_3 \\ x_2 = z_2 - z_3 \\ x_3 = z_3 \end{cases}, \text{ 则 } \mathbf{x} = \mathbf{P}_1\mathbf{z}, \text{ 其中 } \mathbf{P}_1 = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 2 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \text{同理 } g(x_1, x_2, x_3) = y_1^2 + (y_2 + y_3)^2, \text{ 令 } \begin{cases} z_1 = y_1 \\ z_2 = y_2 + y_3 \\ z_3 = y_3 \end{cases} \text{ 即 } \mathbf{z} = \mathbf{P}_2\mathbf{y}, \text{ 其中 } \mathbf{P}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ 于是} \\ \mathbf{x} = \mathbf{P}_1\mathbf{P}_2\mathbf{y} &= \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{y} \end{aligned}$$

$$\text{故 } \mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

14.2.4 正交矩阵与正交变换

定义 14.2.4 (正交矩阵). 设 \mathbf{A} 为 n 阶实对称矩阵, 则存在正交矩阵 \mathbf{Q} , 使得

$$\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^\top \mathbf{A} \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_n \end{pmatrix}$$

其中 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 是 \mathbf{A} 的特征值, 矩阵 \mathbf{Q} 的列向量是对应的正交规范化的特征向量.

定理 14.2.4 (正交变换与相似). 若二次型 $\mathbf{x}^\top \mathbf{A} \mathbf{x}$ 经正交变换 $\mathbf{x} = \mathbf{Q}\mathbf{y}$ 有 $\mathbf{x}^\top \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{y}^\top \mathbf{B} \mathbf{y}$, 则 $\mathbf{A} \sim \mathbf{B}$.

定理 14.2.5 (正交矩阵的行列式). 若方阵 \mathbf{A} 是正交矩阵, 那么等价为实方阵 \mathbf{A} 的行列式等于 ± 1 , 并且当 $|\mathbf{A}| = 1$ 时, \mathbf{A} 的每一个元素等于该元素的代数余子式, 即 $a_{ij} = A_{ij}$; 当 $|\mathbf{A}| = -1$ 时, \mathbf{A} 的每一个元素等于该元素的代数余子式乘以 -1 , 即 $a_{ij} = -A_{ij}$.

证 充分性: 设 \mathbf{A} 是正交矩阵, 则 $\mathbf{A}\mathbf{A}^\top = \mathbf{E}$, 所以 $|\mathbf{A}|^2 = 1$, 即 $|\mathbf{A}| = \pm 1$, 若 $|\mathbf{A}| = 1$, 则 $\mathbf{A}^* = |\mathbf{A}|\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^\top$, 比较等式两边对应的元素, 得 $a_{ij} = A_{ij}$ ($1 \leq i, j \leq n$); 同理当 $|\mathbf{A}| = -1$, 可证 $a_{ij} = -A_{ij}$,

必要性: 当 $|\mathbf{A}| = 1$ 时, 由 $a_{ij} = A_{ij}$ ($1 \leq i, j \leq n$), 有 $\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{|\mathbf{A}|} \mathbf{A}^* = \mathbf{A}^\top$; 当 $|\mathbf{A}| = -1$ 时, 由 $a_{ij} = -A_{ij}$ ($1 \leq i, j \leq n$), 有 $\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{|\mathbf{A}|} = -(-\mathbf{A})^\top = \mathbf{A}^\top$, 所以 \mathbf{A} 是正交矩阵.

例 14.2.18. 求例题 14.2.17 中, 是否存在正交变换 $x = Qy$ 将 f 化为 g .

二次型 f 对应的矩阵为 $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 2 \end{pmatrix}$, 其特征方程为

$$|\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 1 & -1 & 1 \\ -1 & \lambda - 2 & 0 \\ 1 & 0 & \lambda - 2 \end{vmatrix} = \lambda(\lambda - 2)(\lambda - 3) = 0$$

则 $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 2, \lambda_3 = 3$, 同理可得 g 的特征值为 $0, 1, 2$, 因为特征值不全相等, 故 $A \not\sim B$, 因此不存在正交矩阵 Q 使得在正交变换 $x = Qy$ 下将 f 化为 g .

例 14.2.19. 已知二次型 $f(x_1, x_2, x_3) = 2x_1^2 + ax_3^2 + 2x_2x_3$ 经正交变换 $x = Py$ 可化为标准形 $y_1^2 + by_2^2 - y_3^2$, 求 $a + b$.

由题意 $A = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & a \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & b & \\ & & -1 \end{pmatrix}$, 且 $A \sim B$, 则

$$\begin{cases} \text{tr } A = \text{tr } B \\ \det A = \det B \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2 + a = b \\ -2 = -b \end{cases} \Rightarrow a + b = 2.$$

例 14.2.20. 设 α, β 均为 3 维单位列向量, $\alpha^\top \beta = \frac{1}{2}$, $A = \alpha\beta^\top + \beta\alpha^\top$, 求正交变换下, 二次型 $x^\top Ax$ 的标准形.

先证明 A 是实对称矩阵,

$$A^\top = (\alpha\beta^\top + \beta\alpha^\top)^\top = (\alpha\beta^\top)^\top + (\beta\alpha^\top)^\top = \beta\alpha^\top + \alpha\beta^\top = A$$

对 A 右乘 α 和 β 得

$$\begin{cases} A\alpha = \alpha\beta^\top\alpha + \beta\alpha^\top\alpha \\ A\beta = \alpha\beta^\top\beta + \beta\alpha^\top\beta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A(\alpha + \beta) = \frac{3}{2}(\alpha + \beta) \\ A(\alpha - \beta) = -\frac{1}{2}(\alpha - \beta) \end{cases}$$

因为 $\alpha^\top \beta = \frac{1}{2} \Rightarrow \beta^\top \alpha = \frac{1}{2}$, 且 $\alpha^\top \alpha = \beta^\top \beta = 1$, 则得特征值 $\lambda_1 = \frac{3}{2}, \lambda_2 = -\frac{1}{2}$, 设 $\alpha = (a_1, a_2, a_3)^\top, \beta = (b_1, b_2, b_3)^\top$, 那么

$$\text{tr } A = 2a_1b_1 + 2a_2b_2 + 2a_3b_3 = 2\alpha^\top \beta = 1 \Rightarrow \lambda_3 = \text{tr } A - \lambda_1 - \lambda_2 = 0$$

于是 $x^\top Ax$ 的标准形为 $\frac{3}{2}y_1^2 - \frac{1}{2}y_2^2$.

例 14.2.21. 已知 $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$, 求正交矩阵 P , 使 $P^\top AP$ 成为对角矩阵.

特征多项式 $f(\lambda)$ 为:

$$\begin{aligned} f(\lambda) &= |\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda & -1 & -1 & 1 \\ -1 & \lambda & 1 & -1 \\ -1 & 1 & \lambda & -1 \\ 1 & -1 & -1 & \lambda \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \lambda - 1 & 0 & 0 & 1 - \lambda \\ 0 & \lambda - 1 & 0 & \lambda - 1 \\ 0 & 0 & \lambda - 1 & \lambda - 1 \\ 1 & -1 & -1 & \lambda \end{vmatrix} \\ &= \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < i_3 \leq 4} A \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & i_3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} \left[(-1)^{i_1+i_2+i_3+1+2+3} A \begin{pmatrix} i_4 \\ 4 \end{pmatrix} \right] \\ &= \lambda \begin{vmatrix} \lambda - 1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda - 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \end{vmatrix} - (\lambda - 1) \begin{vmatrix} \lambda - 1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda - 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \end{vmatrix} + (\lambda - 1) \begin{vmatrix} \lambda - 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda - 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

$$= (\lambda - 1)^3(\lambda + 3) = 0$$

解得 A 的特征值为 $\lambda_1 = 1$ (三重), $\lambda_2 = -3$, 对于 $\lambda_1 = 1$, 可求得 A 的相应的 3 个线性无关的特征向量为

$$\alpha_1 = (1, 1, 0, 0)^\top, \alpha_2 = (1, 0, 1, 0)^\top, \alpha_3 = (-1, 0, 0, 1)^\top$$

利用 Schmidt 正交化方法, 得

$$\xi_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1, 0, 0)^\top, \xi_2 = \frac{1}{\sqrt{6}}(1, -1, 2, 0)^\top, \xi_3 = \frac{1}{\sqrt{12}}(-1, 1, 1, 3)^\top$$

对于 $\lambda_2 = -3$, 可求得 A 的相应的一个线性无关的特征向量为 $\alpha_4 = (1, -1, -1, 1)^\top$, 把它单位化得 $\xi_4 = \frac{1}{2}(1, -1, -1, 1)^\top$, 于是有 $P^\top AP = \text{diag}(1, 1, 1, -3)$, 其中正交矩阵 P 为

$$P = (\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{12}} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{12}} & -\frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{12}} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{6}}{2} & \frac{3}{\sqrt{12}} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & \frac{3}{\sqrt{12}} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}.$$

例 14.2.22 (2010 武汉大学). 设三阶实对称矩阵 A 的各行元素之和均为 3, 向量

$$\alpha_1 = (-1, 2, -1)^\top, \alpha_2 = (0, -1, 1)^\top$$

是线性方程组 $Ax = 0$ 的两个解.

(1) 求 A 的特征值与特征向量;

(2) 求正交矩阵 Q 和对角矩阵 D , 使得 $Q^\top A Q = D$;

(3) 求行列式 $\left| \left(\frac{2}{3} B^2 \right)^{-1} + \frac{4}{9} B^* + B \right|$, 其中 B 是 $A - \frac{3}{2}E$ 的相似矩阵, B^* 为 B 的伴随矩阵.

(1) 因为 $A\alpha_1 = 0 = 0\alpha_1, A\alpha_2 = 0 = 0\alpha_2$, 所以 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ 是 A 的二重特征值, α_1, α_2 是 A 的属于特征值 0 的两个线性无关的特征向量; 又 A 的各行元素之和均为 3, 所以

$$A(1, 1, 1)^\top = (3, 3, 3)^\top = 3(1, 1, 1)^\top$$

则 $\lambda_3 = 3$ 是 A 的一个特征值, $\alpha_3 = (1, 1, 1)^\top$ 是 A 的属于特征值 3 的特征向量, 总之, A 的特征值为 0, 0, 3, 属于特征值 0 的所有特征向量为 $k_1\alpha_1 + k_2\alpha_2$ (k_1, k_2 不全为零), 属于特征值 3 的所有特征向量为 $k_3\alpha_3$ ($k_3 \neq 0$).

(2) 先将 α_1, α_2 正交化

$$\xi_1 = \alpha_1 = (-1, 2, -1)^\top, \xi_2 = \alpha_2 - \frac{[\alpha_2, \xi_1]}{\|\xi_1\|^2} \xi_1 = \left(-\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2} \right)^\top$$

再将 ξ_1, ξ_2, α_3 单位化, 得

$$e_1 = \frac{\xi_1}{\|\xi_1\|} = \frac{1}{\sqrt{6}}(-1, 2, -1)^\top, e_2 = \frac{\xi_2}{\|\xi_2\|} = \frac{1}{\sqrt{2}}(-1, 0, 1)^\top, e_3 = \frac{\alpha_3}{\|\alpha_3\|} = \frac{1}{\sqrt{3}}(1, 1, 1)^\top$$

$$\text{那么 } Q = (e_1, e_2, e_3) = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{2}{\sqrt{6}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \text{ 于是 } D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}.$$

(3) 因为 B 相似于 $A - \frac{3}{2}E$, 而 $A - \frac{3}{2}E$ 相似于 $D - \frac{3}{2}E$, 于是 B 相似于 $D - \frac{3}{2}E$, 故

$$|B| = \left| D - \frac{3}{2}E \right| = \left(\frac{3}{2} \right)^3 = \frac{27}{8} \Rightarrow B^* = |B| \cdot B^{-1}$$

$$\left(\frac{2}{3}B^2\right)^{-1} + \frac{4}{9}B^* + B = B\left(\frac{3}{2}(B^{-1})^3 + \frac{3}{2}(B^{-1})^2 + E\right) = B\varphi(B^{-1})$$

其中 $\varphi(x) = \frac{3}{2}x^3 + \frac{3}{2}x^2 + 1$, 因为 B^{-1} 的特征值为 $-\frac{2}{3}, -\frac{2}{3}, \frac{2}{3}$, 所以 $\varphi(B^{-1})$ 特征值为

$$\varphi\left(-\frac{2}{3}\right) = \frac{3}{2}\left(-\frac{2}{3}\right)^3 + \frac{3}{2}\left(-\frac{2}{3}\right)^2 + 1 = \frac{11}{9} \quad (\text{二重}) \quad \varphi\left(\frac{2}{3}\right) = \frac{3}{2}\left(\frac{2}{3}\right)^3 + \frac{3}{2}\left(\frac{2}{3}\right)^2 + 1 = \frac{19}{9}$$

故所求的行列式的值为 $|d| = |B||\varphi(B^{-1})| = \frac{27}{8} \times \left(\frac{11}{9}\right)^2 \times \frac{19}{9} = \frac{2299}{216}$.

例 14.2.23. 设 A 是 3 阶实对称矩阵, $\alpha = (0, -1, 1)^\top$, $\beta = (1, 0, -1)^\top$, $A\alpha = 3\beta$, $A\beta = 3\alpha$, 且存在 3 阶矩阵 B , 有 $\text{rank}(AB) < \text{rank } B$,

(1) 求正交变换 $x = Qy$, 化二次型 $x^\top(A + A^*)x$ 为标准形, 并写出该标准形;

(2) 若 $\gamma = (2, 0, -1)^\top$, 求 $A^n\gamma$.

(1) 由 $A\alpha = 3\beta$, $A\beta = 3\alpha$, 可得 $\begin{cases} A(\alpha + \beta) = 3(\alpha + \beta) \\ A(\alpha - \beta) = -3(\alpha - \beta) \end{cases}$ 即特征值 $\lambda_1 = 3$, $\lambda_2 = -3$, 其对应的特征向量为

$$\xi_1 = \alpha + \beta = (1, -1, 0)^\top, \quad \xi_2 = \alpha - \beta = (-1, -1, 2)^\top$$

因为 $\text{rank}(AB) < \text{rank } B$, 可知 A 不可逆, 即 $\det A = 0$, 又 $\det A = \prod_{i=1}^3 \lambda_i$, 故 $\lambda_3 = 0$, 并且 A 是实对称矩阵, 则其特征向量相互正交, 即

$$(1, -1, 0) \times (-1, -1, 2) = (-2, -2, -2) \Rightarrow (1, 1, 1) \Rightarrow \xi_3 = (1, 1, 1)^\top$$

则 A^* 的特征值为¹ $\lambda_1^* = \lambda_2\lambda_3 = 0$, $\lambda_2^* = \lambda_1\lambda_3 = 0$, $\lambda_3^* = \lambda_1\lambda_2 = -9$, 由 $Q^\top AO = \Lambda$ 可得

$$\begin{aligned} Q^\top A^* Q &= Q^\top (Q\Lambda Q^\top)^* Q = Q^\top (Q^\top)^* \Lambda^* Q^* Q = Q^\top |Q^\top| (Q^\top)^{-1} \Lambda^* |Q| E \\ &= Q^\top Q |Q| |\Lambda^*| |Q| E = |Q|^2 \Lambda^* \xrightarrow{\det Q = \pm 1} \Lambda^* \end{aligned}$$

因此 $Q^\top (A + A^*) Q = \left[\begin{pmatrix} 3 & -3 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & -9 \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} 3 & -3 & -9 \end{pmatrix}$ 即在正交变换 $x = Qy$ 下, 二次型的标准形为 $3y_1^2 - 3y_2^2 - 9y_3^2$.

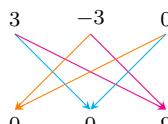
(2) γ 可由 $\xi_{1,2,3}$ 线性表示, 即 $\exists k_1, k_2, k_3$, 使得 $\gamma = k_1\xi_1 + k_2\xi_2 + k_3\xi_3$, 即

$$A^n\gamma = A^n(k_1\xi_1 + k_2\xi_2 + k_3\xi_3) = k_1A^n\xi_1 + k_2A^n\xi_2 + k_3A^n\xi_3 = k_1\lambda_1^n\xi_1 + k_2\lambda_2^n\xi_2 + k_3\lambda_3^n\xi_3 = k_1\lambda_1^n\xi_1 + k_2\lambda_2^n\xi_2$$

作增广矩阵 $B = (\xi_1 \quad \xi_2 \quad \xi_3 : \gamma) = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & : & 2 \\ -1 & -1 & 1 & : & 0 \\ 0 & 2 & 1 & : & -1 \end{pmatrix}$, 将其化为行最简形

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & : & 2 \\ -1 & -1 & 1 & : & 0 \\ 0 & 2 & 1 & : & -1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\begin{array}{l} r_2 + r_1 \\ r_2 \times (-\frac{1}{2}) \\ \hline r_1 + r_2 \\ r_3 - 2r_2 \end{array}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & : & 1 \\ 0 & 1 & -1 & : & -1 \\ 0 & 0 & 3 & : & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\begin{array}{l} r_3 \times \frac{1}{3} \\ r_2 + r_3 \\ \hline \end{array}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & : & 1 \\ 0 & 1 & 0 & : & -\frac{2}{3} \\ 0 & 0 & 1 & : & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

因此 $k_1 = 1$, $k_2 = -\frac{2}{3}$, $k_3 = \frac{1}{3}$, 故 $A^n\gamma = \lambda_1^n\xi_1 - \frac{2}{3}\lambda_2^n\xi_2 = \begin{pmatrix} 3^n + \frac{2}{3} \cdot (-3)^n \\ -3^n + \frac{2}{3} \cdot (-3)^n \\ -\frac{4}{3} \cdot (-3)^n \end{pmatrix}$.



¹因为 A^* 的特征值为 $\frac{\det A}{\lambda}$, 且 $\det A = \prod_{i=1}^n \lambda_i$, 或者可理解为

例 14.2.24. 设二次型

$$f(x_1, x_2, x_3) = 4x_2^2 - 3x_3^2 + 2ax_1x_2 - 4x_1x_3 + 8x_2x_3 \quad (a \in \mathbb{N})$$

经过正交变换 $\mathbf{x} = Q\mathbf{y}$ 化为标准形为 $y_1^2 + 6y_2^2 + by_3^2$,

(1) 求 a, b 的值及正交变换;

(2) 证明: 二次型 $\mathbf{x}^\top(\mathbf{A}^* + 37\mathbf{E})\mathbf{x}$ 正定, 其中 \mathbf{A}^* 为 \mathbf{A} 的伴随矩阵.

(1) 二次型的矩阵为 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & a & -2 \\ a & 4 & 4 \\ -2 & 4 & -3 \end{pmatrix}$, 且 $\mathbf{A} \sim \text{diag}(1, 6, b)$, 由矩阵相似可得 $\text{tr } \mathbf{A} = 1 + 6 + b$, $\det \mathbf{A} = 6b$, 解得

$a = 2, b = -6$, 因此 \mathbf{A} 的特征值分别为 $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 6, \lambda_3 = -6$,

法一: $|\lambda\mathbf{E} - \mathbf{A}| = \begin{vmatrix} \lambda & -2 & 2 \\ -2 & \lambda - 4 & -4 \\ 2 & -4 & \lambda + 3 \end{vmatrix}$, 当 $\lambda = \lambda_1$ 时, $(1\mathbf{E} - \mathbf{A})\mathbf{x} = \mathbf{0}$, 解得特征向量为 $\xi_1 = (-2, 0, 1)^\top$; 当

$\lambda = \lambda_2$ 时, $(6\mathbf{E} - \mathbf{A})\mathbf{x} = \mathbf{0}$, 解得特征向量为 $\xi_2 = (1, 5, 2)^\top$; 当 $\lambda = \lambda_3$ 时, $(-6\mathbf{E} - \mathbf{A})\mathbf{x} = \mathbf{0}$, 解得特征向量为 $\xi_3 = (1, -1, 2)^\top$,

法二: $\lambda = \lambda_1$ 时, $1\mathbf{E} - \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 2 \\ -2 & -3 & -4 \\ 2 & -4 & 4 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_3 - 2r_1} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 2 \\ -2 & -3 & -4 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, r_1 可由 r_2 与 $(3, 1, 6)$ 线性表示, 则

$$(-2, -3, -4) \times (3, 1, 6) = (-14, 0, 7) \Rightarrow (-2, 0, 1) \Rightarrow \xi_1 = (-2, 0, 1)^\top$$

当 $\lambda = \lambda_2$ 时, $6\mathbf{E} - \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 6 & -2 & 2 \\ -2 & 2 & -4 \\ 2 & -4 & 9 \end{pmatrix} \xrightarrow{\begin{array}{l} r_2 + \frac{1}{3}r_1 \\ r_3 - \frac{1}{3}r_1 \\ \frac{3}{5}r_3 + \frac{3}{2}r_2 \\ r_2 \times \frac{3}{2} \\ r_1 \times \frac{1}{2} \end{array}} \begin{pmatrix} 3 & -1 & 1 \\ 0 & 2 & -5 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, r_1 可由 r_2 与 $(3, -3, 6)$ 线性表示, 则

$$(0, 2, -5) \times (3, -3, 6) = (-3, -15, -6) \Rightarrow (1, 5, 2) \Rightarrow \xi_2 = (1, 5, 2)^\top$$

当 $\lambda = \lambda_3$ 时, $-6\mathbf{E} - \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -6 & -2 & 2 \\ -2 & -10 & -4 \\ 2 & -4 & -3 \end{pmatrix} \xrightarrow{\begin{array}{l} r_1 \times \frac{1}{2} \\ r_2 \times \frac{1}{2} \\ r_2 - r_1 - r_3 \\ r_2 \leftrightarrow r_3 \\ r_1 \times \frac{1}{2} \end{array}} \begin{pmatrix} -3 & -1 & 1 \\ 2 & -4 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, r_1 可由 r_2 与 $(-5, 3, 4)$ 线性表示,

则

$$(2, -4, -3) \times (-5, 3, 4) = (-7, 7, -14) \Rightarrow (1, -1, 2) \Rightarrow \xi_3 = (1, -1, 2)^\top$$

将特征向量 $\xi_{1,2,3}$ 单位化得

$$e_1 = \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, e_2 = \frac{1}{\sqrt{30}} \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ 2 \end{pmatrix}, e_3 = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -\frac{2}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{30}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{5}{\sqrt{30}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{2}{\sqrt{30}} & \frac{2}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}$$

令 $Q = (e_1, e_2, e_3)$, 则 $\mathbf{x} = Q\mathbf{y}$ 为所求正交变换, 其中 $Q = \begin{pmatrix} -\frac{2}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{30}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{5}{\sqrt{30}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{2}{\sqrt{30}} & \frac{2}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}$

(2) 因为 \mathbf{A} 的特征值分别为 $1, 6, -6$, 因此 \mathbf{A}^* 的特征值为 $-36, -6, 6$, 那么 $\mathbf{A}^* + 37\mathbf{E}$ 的特征值为 $1, 31, 43$, 皆大于 0, 因此二次型 $\mathbf{x}^\top(\mathbf{A}^* + 37\mathbf{E})\mathbf{x}$ 正定.

例 14.2.25. 设 α, β 是三维列向量, 且 $[\alpha, \beta] = -1$, 又 $\mathbf{A} = \mathbf{E} - \alpha\beta^\top$ 求 $(\mathbf{A} + \mathbf{E})^{-1}$.

因为 $[\alpha, \beta] = -1$ (两个向量的内积), 所以

$$\mathbf{A}^2 = (\mathbf{E} - \alpha\beta^\top)(\mathbf{E} - \alpha\beta^\top) = \mathbf{E} - 2\alpha\beta^\top + \underbrace{\alpha\beta^\top \cdot \alpha}_{[\alpha, \beta] = -1} \beta^\top = \mathbf{E} - 3\alpha\beta^\top = 3(\mathbf{E} - \alpha\beta^\top) - 2\mathbf{E} = 3\mathbf{A} - 2\mathbf{E}$$

$$\text{即 } \mathbf{A}^2 - 3\mathbf{A} + 2\mathbf{E} = \mathbf{O} \Rightarrow (\mathbf{A} + \mathbf{E})(\mathbf{A} - 4\mathbf{E}) + 6\mathbf{E} = \mathbf{O} \Rightarrow (\mathbf{A} + \mathbf{E}) \frac{\mathbf{A} - 4\mathbf{E}}{-6} = \mathbf{E} \Rightarrow (\mathbf{A} + \mathbf{E})^{-1} = \frac{4\mathbf{E} - \mathbf{A}}{6}.$$

例 14.2.26. 设 α 为 3 维非零实列向量, $A = E - \frac{a}{\alpha^\top \alpha} \alpha \alpha^\top$ 为正交矩阵, 其中 $a \neq 0$, E 为三阶单位矩阵,

(1) 求 a 的值, 并证明: α 与 $A\alpha$ 线性相关;

(2) 当 $\alpha = (b, b, 0)^\top$ ($b \neq 0$) 时, 求正交变换 $x = Qy$ 将二次型 $f(x_1, x_2, x_3) = x^\top Ax$ 化为规范形.

(1) 由 $A^\top = \left(E - \frac{a}{\alpha^\top \alpha} \alpha \alpha^\top\right)^\top = E - \frac{a}{\alpha^\top \alpha} (\alpha \alpha^\top)^\top = E - \frac{a}{\alpha^\top \alpha} (\alpha^\top)^\top \alpha^\top = E - \frac{a}{\alpha^\top \alpha} \alpha \alpha^\top = A$ 可知, A 为实对称矩阵, 那么

$$A^2 = AA^\top = \left(E - \frac{a}{\alpha^\top \alpha} \alpha \alpha^\top\right) \left(E - \frac{a}{\alpha^\top \alpha} \alpha \alpha^\top\right) = E - \frac{2a}{\alpha^\top \alpha} \alpha \alpha^\top + \frac{a^2}{(\alpha^\top \alpha)^2} \alpha \underbrace{\alpha^\top \alpha}_{=1} \alpha^\top = E + \frac{a^2 - 2a}{\alpha^\top \alpha} \alpha \alpha^\top$$

又因为 A 是正交矩阵, 所以 $A^2 = E$, 即 $\frac{a^2 - 2a}{\alpha^\top \alpha} \alpha \alpha^\top = O$, 而 α 为 3 维非零实列向量, 即 $\alpha^\top \alpha \neq 0$, $\alpha \alpha^\top \neq O$, 因此 $a^2 - 2a = 0 \Rightarrow a = 2$ ($a \neq 0$), $A\alpha = \left(E - \frac{a}{\alpha^\top \alpha} \alpha \alpha^\top\right) \alpha = \alpha - a\alpha = -\alpha$, 因此 α 与 $A\alpha$ 线性相关.

(2) 法一: 当 $\alpha = (b, b, 0)^\top$ ($b \neq 0$) 时,

$$\alpha^\top \alpha = (b, b, 0) \begin{pmatrix} b \\ b \\ 0 \end{pmatrix} = 2b^2, \quad \alpha \alpha^\top = \begin{pmatrix} b \\ b \\ 0 \end{pmatrix} (b, b, 0) = \begin{pmatrix} b^2 & b^2 & 0 \\ b^2 & b^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = b^2 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

那么 $A = E - \frac{2}{\alpha^\top \alpha} \alpha \alpha^\top = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, 因此特征多项式为 (两种方法)

$$(i) \quad |\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda & 1 & 0 \\ 1 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda - 1 \end{vmatrix} (\lambda^2 - 1)(\lambda - 1) = 0, \text{ 得特征值为 } \lambda_1 = -1, \lambda_2 = \lambda_3 = 1,$$

$$(ii) \quad \lambda^3 - \text{tr } A \cdot \lambda^2 + \sum_{1 \leq j_1 < j_2 \leq 3} \begin{vmatrix} a_{j_1 j_1} & a_{j_1 j_2} \\ a_{j_2 j_1} & a_{j_2 j_2} \end{vmatrix} \cdot \lambda - \det A = \lambda^3 - \lambda^2 - \lambda + 1, \text{ 解得 } \lambda_1 = -1, \lambda_2 = \lambda_3 = 1,$$

当 $\lambda = \lambda_1$ 时, 解得特征向量为 $\xi_1 = (1, 1, 0)^\top$; 当 $\lambda = \lambda_{2,3}$ 时, 解得对应的特征向量分别为 $\xi_2 = (-1, 1, 0)^\top$, $\xi_3 = (0, 0, 1)^\top$, 将 $\xi_{1,2,3}$ 分别单位化, 得

$$e_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad e_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad e_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

令 $Q = (e_1, e_2, e_3)$, 在正交变换 $x = Qy$ 下, 标准形为 $-y_1^2 + y_2^2 + y_3^2$ 也是规范形.

法二: 不妨设 $B = \alpha \alpha^\top = b^2 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow b^2 \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, 则 $\text{rank } B = 1$, 所以矩阵 B 的特征值为

$$\lambda_{b1} = \lambda_{b2} = 0, \quad \lambda_{b3} = \text{tr } B = \alpha^\top \alpha = 2b^2$$

又因为 $A = E - \frac{2}{\alpha^\top \alpha} \alpha \alpha^\top = E - \frac{1}{b^2} B$, 因此矩阵 A 的特征值为 $\lambda_{a1} = \lambda_{a2} = 1, \lambda_{a3} = -1$, 并且 λ_{b1} 对应的特征向量为 $\xi_1 = (-1, 1, 0)^\top$; λ_{b2} 对应的特征向量为 $\xi_2 = (0, 0, 1)^\top$;

$$B\alpha = \alpha \alpha^\top \alpha = \text{tr } B \cdot \alpha \Rightarrow \xi_3 = (1, 1, 0)^\top$$

单位化得 $e_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad e_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad e_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, 令 $Q = (e_1, e_2, e_3)$, 则在正交变换 $x = Qy$ 下, 标准形为 $y_1^2 + y_2^2 - y_3^2$ 也是规范形.

14.2.5 直角坐标变换

设一般二次曲面的方程为

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + 2b_1x + 2b_2y + 2b_3z + c = 0$$

写出矩阵形式为

$$\mathbf{x}^\top \mathbf{A} \mathbf{x} + 2\mathbf{B}^\top \mathbf{x} + c = 0 \quad (1)$$

其中 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$ ($a_{ij} = a_{ji}$), $\mathbf{x} = (x, y, z)^\top$, $\mathbf{B} = (b_1, b_2, b_3)^\top$, 作正交矩阵 \mathbf{Q} , 使 $\mathbf{Q}^\top \mathbf{A} \mathbf{Q} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, 其中 $\lambda_{1,2,3}$ 为 \mathbf{A} 的特征值, 那么化为标准方程可分为两种情况进行.

(1) 若方程组 $\mathbf{Ax} + \mathbf{B} = \mathbf{0}$ 有解, 则取其任意一个解 $\boldsymbol{\delta}$, 作直角坐标变换

$$\mathbf{x} = \mathbf{Q} \mathbf{x}' + \boldsymbol{\delta}$$

代入 (1) 式得

$$\mathbf{x}'^\top \mathbf{Q}^\top \mathbf{A} \mathbf{Q} \mathbf{x}' + 2(\mathbf{A} \boldsymbol{\delta} + \mathbf{B})^\top \mathbf{Q} \mathbf{x}' + \boldsymbol{\delta}^\top \mathbf{A} \boldsymbol{\delta} + 2\mathbf{B}^\top \boldsymbol{\delta} + c = 0$$

由 $\mathbf{Q}^\top \mathbf{A} \mathbf{Q} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, $\mathbf{A} \boldsymbol{\delta} + \mathbf{B} = \mathbf{0}$, 可得

$$\lambda_1 x'^2 + \lambda_2 y'^2 + \lambda_3 z'^2 = d \quad (2)$$

其中 $d = -(\boldsymbol{\delta}^\top \mathbf{A} \boldsymbol{\delta} + 2\mathbf{B}^\top \boldsymbol{\delta} + c)$, (2) 式就是 (1) 式的标准方程.

(2) 若方程组 $\mathbf{Ax} + \mathbf{B} = 0$ 无解, 则必有 $\det \mathbf{A} = 0$, 由于 $\det \mathbf{A} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$, 则 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 中至少有一个为 0, 不妨设 $\lambda_1 \neq 0, \lambda_3 = 0$, 作正交变换 $\mathbf{x} = \mathbf{Q} \mathbf{x}'$, 代入 (1) 式得

$$\lambda_1 x'^2 + \lambda_2 y'^2 + 2b'_1 x' + 2b'_2 y' + 2b'_3 z' + c = 0 \quad (3)$$

(i) 若 $\lambda_2 \neq 0$, 将 (3) 配方得

$$\lambda_1 (x' + b'_1)^2 + \lambda_2 (y' + b'_2)^2 = d - 2b'_3 z' \quad (4)$$

其中 $d = \lambda_1 b'_1^2 + \lambda_2 b'_2^2 - c$, 当 $b'_3 \neq 0$ 时, 作平移

$$\begin{cases} x'' = x' + b'_1 \\ y'' = y' + b'_2 \\ z'' = z' - \frac{d}{2b'_3} \end{cases}$$

则 (4) 式化为标准方程

$$\lambda_1 x''^2 + \lambda_2 y''^2 = -2b'_3 z''$$

当 $b'_3 = 0$ 时, 作平移 $\begin{cases} x'' = x' + b'_1 \\ y'' = y' + b'_2 \\ z'' = z' \end{cases}$ 则 (4) 式化为标准方程

$$\lambda_1 x''^2 + \lambda_2 y''^2 = d$$

(ii) 若 $\lambda_2 = 0$, 将 (3) 配方得

$$\lambda_1(x' + b'_1)^2 = d - 2b'_2y' - 2b'_3z' \quad (5)$$

其中 $d = \lambda_1 b'^2_1 - c$, 当 b'_2, b'_3 不全为 0 时, 作直角坐标变换

$$\begin{cases} x'' = x' + b'_1 \\ y'' = \frac{1}{\sqrt{b'^2_2 + b'^2_3}}(b'_2y' + b'_3z') - \frac{d}{2} \\ z'' = \frac{1}{\sqrt{b'^2_2 + b'^2_3}}(-b'_2y' + b'_3z') \end{cases}$$

(5) 式化为标准方程

$$\lambda_1 x''^2 = -2\sqrt{b'^2_2 + b'^2_3}y''$$

当 b'_2, b'_3 全为 0 时, 令 $\begin{cases} x'' = x' + b'_1 \\ y'' = y' \\ z'' = z' \end{cases}$ 则 (5) 式化为标准方程

$$\lambda_1 x''^2 = d.$$

例 14.2.27. 作直角坐标变换化二次曲面

$$x^2 - 2y^2 + 10z^2 + 28xy + 20xz - 8yz - 26x + 32y + 28z - 38 = 0$$

为标准方程, 并说明是什么曲面.

设 $A = \begin{pmatrix} 1 & 14 & 10 \\ 14 & -2 & -4 \\ 10 & -4 & 10 \end{pmatrix}$, $x = (x, y, z)^\top$, $B = (-13, 16, 14)^\top$, $c = -38$, 曲面方程记为

$$x^\top Ax + 2B^\top x + c = 0$$

A 的特征多项式为

$$f(\lambda) = (\lambda - 9)(\lambda - 18)(\lambda + 18)$$

A 的特征值为 $\lambda_1 = 9$, $\lambda_2 = 18$, $\lambda_3 = -18$, 当 $\lambda_1 = 9$ 时, 由

$$9E - A = \begin{pmatrix} 8 & -14 & -10 \\ -14 & 11 & 4 \\ -10 & 4 & -1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 4 & -7 & -5 \\ 14 & -11 & -4 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 4 & -7 & -5 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

则 r_1 可由 r_2 与 $(2, -1, 0)$ 线性表示, 那么特征向量为 $\vec{r}_2 \times (2, -1, 0) = (1, 2, -2) \Rightarrow \xi_1 = (1, 2, -2)^\top$; 当 $\lambda_2 = 18$ 时, 由

$$18E - A = \begin{pmatrix} 17 & -14 & -10 \\ -14 & 20 & 4 \\ -10 & 4 & 8 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -5 & 2 & 4 \\ -7 & 10 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -5 & 2 & 4 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

则 r_1 可由 r_2 与 $(-1, 0, 1)$ 线性表示, 那么特征向量为 $\vec{r}_2 \times (-1, 0, 1) = (2, 1, 2) \Rightarrow \xi_2 = (2, 1, 2)^\top$; 当 $\lambda_3 = -18$ 时, 由

$$-18E - A = \begin{pmatrix} -19 & -14 & -10 \\ -14 & -16 & 4 \\ -10 & 4 & -28 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 7 & 8 & -2 \\ -5 & 2 & -14 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 7 & 8 & -2 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

则 r_1 可由 r_2 与 $(1, 1, 0)$ 线性表示, 那么特征向量为 $\vec{r}_2 \times (1, 1, 0) = (-2, 2, 1) \Rightarrow \xi_3 = (-2, 2, 1)^\top$, 将各特征向量单位化, 有

$$e_1 = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix}, e_2 = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}, e_3 = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

得正交矩阵 $Q = (e_1, e_2, e_3)$, 因为 $\det A \neq 0$, 方程组 $Ax + B = \mathbf{0}$ 有唯一解 $\delta = (-1, 1, 0)^\top$, 作直角坐标变换 $x = Qx' + \delta$, 曲面方程化为

$$9x'^2 + 18y'^2 - 18z'^2 = 9$$

得曲面的标准方程为

$$x'^2 + 2y'^2 - 2z'^2 = 1$$

因此曲面为单叶双曲面.

14.2.6 谱分解

定理 14.2.6 (谱分解定理). 若 n 阶矩阵 A 的特征值为 λ_i , 所对应特征向量为 x_i , 经过单位化和正交化, 化为两两正交的单位特征向量 e_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 则有

$$A = \sum_{i=1}^n \lambda_i e_i e_i^\top.$$

例 14.2.28. 设 $A = (a_{ij})_{3 \times 3}$ 为实对称矩阵, A 的每行元素之和均为 0, 设 2, 3 是 A 的非零特征值, 则 a_{11} 对应的代数余子式 A_{11} 为

A. 1

B. 2

C. 5

D. 6

因为 A 的每行元素之和均为 0, 故由定理 13.2.8 知, A 的另一特征值为 0, 因此矩阵 A 的全部特征值为 0, 2, 3, 又由定理 13.2.6 知矩阵 A 的伴随矩阵的特征值为

$$\lambda_1^* = 2 \times 3 = 6, \lambda_2^* = 0 \times 3 = 0, \lambda_3^* = 0 \times 2 = 0$$

且 λ_1^* 对应的特征向量为 $(1, 1, 1)^\top$, 又由定理 14.2.6, 知

$$A^* = 0 + 0 + 6 = 6 \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \end{pmatrix}$$

故 $A_{11} = 2$, 选 B.

例 14.2.29. 设 A 为三阶实对称不可逆矩阵, 且 $\begin{pmatrix} 2 & -2 & 1 \\ -2 & -1 & 2 \end{pmatrix} A = \begin{pmatrix} 6 & -6 & 3 \\ -12 & -6 & 12 \end{pmatrix}$, 求 A .

对等式两边同时转置, 有 $A^\top \begin{pmatrix} 2 & -2 \\ -2 & -1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 & -12 \\ -6 & -6 \\ 3 & 12 \end{pmatrix}$, 令 $\xi_1 = (2, -2, 1)^\top$, $\xi_2 = (-2, -1, 2)^\top$, 则有

$$A^\top \xi_1 = 3\xi_1, A^\top \xi_2 = 6\xi_2 \Rightarrow \lambda_1 = 3, \lambda_2 = 6$$

又因为 A 不可逆, 所以 $\det A = 0 \Rightarrow \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 0 \Rightarrow \lambda_3 = 0$, 所以 A 的特征值分别为 2, 6, 0, 故

$$A = \sum_{i=1}^3 \lambda_i e_i e_i^\top = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \cdot \frac{\xi_i}{\|\xi_i\|} \cdot \left(\frac{\xi_i}{\|\xi_i\|} \right)^\top = 3 \cdot \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{3} (2, -2, 1) + 6 \cdot \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix} \cdot (-2, -1, 2) = \begin{pmatrix} 4 & 0 & -2 \\ 0 & 2 & -2 \\ -2 & -2 & 3 \end{pmatrix}.$$

例 14.2.30. 矩阵 A 为 3 阶实对称矩阵, 特征值为 0, 1, 1, 且 $\alpha_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ 0 \end{pmatrix}$, $\alpha_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ a \end{pmatrix}$ 是 A 的两个不同的特征向量, 若 $A(\alpha_1 + \alpha_2) = \alpha_2$, 求 A .

若 α_1, α_2 都为 0 的特征向量, 则 $A(\alpha_1 + \alpha_2) = \mathbf{0}$, 与已知条件矛盾; 若 α_1, α_2 都为 1 的特征向量, 则 $A(\alpha_1 + \alpha_2) = \alpha_1 + \alpha_2$, 与已知条件矛盾; 若 α_1, α_2 分别为 1, 0 的特征向量, 则 $A(\alpha_1 + \alpha_2) = \alpha_1$, 与已知条件矛盾; 综上, α_1 与 α_2 分别为 0, 1 的特征向量, 又 A 为实对称矩阵, 那么 α_1 与 α_2 相互正交, 那么它们的内积为零, 解得 $a = 0$, 故 $\alpha_1 = (1, 1, 0)^\top$, $\alpha_2 = (1, -1, 1)^\top$, 并且 $A - E$ 的特征值为 $-1, 0, 0$, 由定理 14.2.6 知

$$A - E = (-1) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} (1, 1, 0) = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow A = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

例 14.2.31. 假设 3 阶实对称矩阵 A 的秩为 2, 并且 $AB = C$, 其中 $B = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$, $C = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$, 求 A 的所有特征值及相应的特征向量, 并求矩阵 A 及 A^{2023} .

设 $\xi_1 = (1, 0, -1)^\top$, $\xi_2 = (1, 0, 1)^\top$ 那么 $B = (\xi_1, \xi_2)$, $C = (-\xi_1, \xi_2)$, 于是

$$AB = C \Rightarrow A(\xi_1, \xi_2) = (-\xi_1, \xi_2)$$

即 $A\xi_1 = -\xi_1$, $A\xi_2 = \xi_2$, 则 $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = 0$ 是 A 的特征值, ξ_1, ξ_2 是 A 的分别属于 λ_1, λ_2 的特征向量, 又 $\text{rank } A = 2$, 则 $\xi_3 = 0$, 于是

$$A = \sum_{i=1}^3 \lambda_i e_i e_i^\top = (-1) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} (1, 0, -1) + 1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} (1, 0, 1) + 0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

那么 $A^{2023} = A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.

例 14.2.32. 设 3 阶实对称矩阵 A 的每行元素之和为 3, 且 $\text{rank } A = 1$, $\beta = (-1, 2, 2)^\top$,

(1) 求 $A^n \beta$; (2) 求 $\left(A - \frac{3}{2}E\right)^{2024}$.

(1) 法一: 因为 A 的每行元素之和为 3, 故特征值 $\lambda_1 = 3$, 且对应的特征向量为 $\xi_1 = (1, 1, 1)^\top$, 又因为 A 是实对称矩阵, 所以 A 一定能相似对角化, 并且由 $\text{rank } A = 1$, 故矩阵 A 的非零特征值个数为 1, 即 $\lambda_2 = \lambda_3 = 0$, 设其对应的特征向量为 ξ_2, ξ_3 , 则 ξ_1, ξ_2, ξ_3 相互正交, 故可令 $\xi_2 = (-1, 1, 0)^\top$, $\xi_3 = (-1, 0, 1)^\top$, 因为 ξ_1, ξ_2, ξ_3 是三维空间中线性无关的三个向量, 则其线性组合能表示该空间中的任一向量, 即 $\exists k_1, k_2, k_3$, 使得 $\beta = k_1 \xi_1 + k_2 \xi_2 + k_3 \xi_3$, 即

$$A^n \beta = A^n(k_1 \xi_1 + k_2 \xi_2 + k_3 \xi_3) = k_1 A^n \xi_1 + k_2 A^n \xi_2 + k_3 A^n \xi_3 = k_1 \lambda_1^n \xi_1 + k_2 \lambda_2^n \xi_2 + k_3 \lambda_3^n \xi_3$$

作增广矩阵 $B = (\xi_1 \quad \xi_2 \quad \xi_3 : \beta) = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & : & -1 \\ 1 & 1 & 0 & : & 2 \\ 1 & 0 & 1 & : & 2 \end{pmatrix}$, 将其化为行最简形

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & : & -1 \\ 1 & 1 & 0 & : & 2 \\ 1 & 0 & 1 & : & 2 \end{pmatrix} \xrightarrow[r_2 - r_1, r_3 - r_1]{r_1 + r_3} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & : & 2 \\ 0 & 1 & 2 & : & 3 \\ 0 & 2 & 1 & : & 3 \end{pmatrix} \xrightarrow[r_3 \times (-\frac{1}{3})]{r_1 - r_2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & : & 2 \\ 0 & 1 & 0 & : & 1 \\ 0 & 0 & 1 & : & 1 \end{pmatrix}$$

因此 $k_1 = 2, k_2 = 1, k_3 = 1$, 故 $A^n \beta = 2\lambda_1^n \xi_1 + \lambda_2^n \xi_2 + \lambda_3^n \xi_3 = \begin{pmatrix} 2 \cdot 3^n \\ 2 \cdot 3^n \\ 2 \cdot 3^n \end{pmatrix} = 3^n \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$.

法二: 同上, 得 $\lambda_1 = 3, \lambda_2 = \lambda_3 = 0, \xi_1 = (1, 1, 1)^\top$, 将 ξ_1 单位化, 得 $e_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, 因此

$$A = \sum_{i=1}^3 \lambda_i e_i e_i^\top = \lambda_1 e_1 e_1^\top = 3 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} (1, 1, 1) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

又因为 $\text{rank } A = 1$, 故 $A^n = (\text{tr } A)^{n-1} \cdot A$, 因此 $A^n \beta = 3^{n-1} A \beta = 3^{n-1} \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} = 3^n \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$.

(2) 因为 \mathbf{A} 的特征值分别为 $3, 0, 0$, 则 $\mathbf{A} - \frac{3}{2}\mathbf{E}$ 的特征值分别为 $\frac{3}{2}, -\frac{3}{2}, -\frac{3}{2}$, 又因为 \mathbf{A} 是实对称矩阵, 即 $\exists \mathbf{P}$, 使得 $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P} = \mathbf{\Lambda}$, 则有 $\mathbf{P}^{-1}\left(\mathbf{A} - \frac{3}{2}\mathbf{E}\right)\mathbf{P} = \mathbf{\Lambda}_2 = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} & & \\ & -\frac{3}{2} & \\ & & -\frac{3}{2} \end{pmatrix}$, 因此

$$\begin{aligned} \left(\mathbf{A} - \frac{3}{2}\mathbf{E}\right)^{2024} &= \underbrace{\mathbf{P}\mathbf{\Lambda}_2\mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{P}\mathbf{\Lambda}_2\mathbf{P}^{-1} \cdots \mathbf{P}\mathbf{\Lambda}_2\mathbf{P}^{-1}}_{2024} = \mathbf{P}\mathbf{\Lambda}_2^{2024}\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{P}\begin{pmatrix} \frac{3}{2} & & \\ & -\frac{3}{2} & \\ & & -\frac{3}{2} \end{pmatrix}^{2024}\mathbf{P}^{-1} \\ &= \mathbf{P}\left(\frac{3}{2}\right)^{2024}\mathbf{E}\mathbf{P}^{-1} = \left(\frac{3}{2}\right)^{2024}\mathbf{P}\mathbf{P}^{-1} = \left(\frac{3}{2}\right)^{2024}\mathbf{E}. \end{aligned}$$

例 14.2.33 (2024 数一). 已知数列 $\{x_n\}, \{y_n\}, \{z_n\}$ 满足 $x_0 = -1, y_0 = 0, z_0 = 2$, 且

$$\begin{cases} x_n = -2x_{n-1} + 2z_{n-1} \\ y_n = -2y_{n-1} - 2z_{n-1} \\ z_n = -6x_{n-1} - 3y_{n-1} + 3z_{n-1} \end{cases}$$

记 $\boldsymbol{\alpha}_n = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix}$, 写出满足 $\boldsymbol{\alpha}_n = \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha}_{n-1}$ 的矩阵 \mathbf{A} , 并求 \mathbf{A}^n 及 x_n, y_n, z_n .

由题设知, $\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 & 0 & 2 \\ 0 & -2 & -2 \\ -6 & -3 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{n-1} \\ y_{n-1} \\ z_{n-1} \end{pmatrix}$, 即 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -2 & 0 & 2 \\ 0 & -2 & -2 \\ -6 & -3 & 3 \end{pmatrix}$, 由 $|\lambda\mathbf{E} - \mathbf{A}| = 0$ 得 $\lambda(\lambda - 1)(\lambda + 2) = 0$, 解得 $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = -2$, 那么, 当 $\lambda_1 = 0$ 时, 对应的特征向量为 $\xi_1 = (1, -1, 1)^\top$, 当 $\lambda_2 = 1$ 时, 对应的特征向量为 $\xi_2 = (2, -2, 3)^\top$, 当 $\lambda_2 = -2$ 时, 对应的特征向量为 $\xi_3 = (1, -2, 0)^\top$, 故存在可逆矩阵 $\mathbf{P} = (\xi_1, \xi_2, \xi_3) = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ -1 & -2 & -2 \\ 1 & 3 & 0 \end{pmatrix}$, 使得 $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P} = \text{diag}(0, 1, -2) = \mathbf{\Lambda}$, 即 $\mathbf{A} = \mathbf{P}\mathbf{\Lambda}\mathbf{P}^{-1}$, 那么

$$\mathbf{A}^n = \mathbf{P}\mathbf{\Lambda}^n\mathbf{P}^{-1} = \begin{pmatrix} -4 + (-1)^{n+1} \cdot 2^n & -2 + (-1)^{n+1} \cdot 2^n & 2 \\ 4 + (-1)^n \cdot 2^{n+1} & 2 + (-1)^n \cdot 2^{n+1} & -2 \\ -6 & -3 & 3 \end{pmatrix}$$

由 $\boldsymbol{\alpha}_n = \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha}_{n-1}$, 那么 $\boldsymbol{\alpha}_n = \mathbf{A}^n\boldsymbol{\alpha}_0 = \begin{pmatrix} -4 + (-1)^{n+1} \cdot 2^n & -2 + (-1)^{n+1} \cdot 2^n & 2 \\ 4 + (-1)^n \cdot 2^{n+1} & 2 + (-1)^n \cdot 2^{n+1} & -2 \\ -6 & -3 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8 + (-2)^n \\ -8 + (-2)^{n+1} \\ 12 \end{pmatrix}$, 则 $x_n = 8 + (-2)^n, y_n = -8 + (-2)^{n+1}, z_n = 12$.

例 14.2.34. 设二次型 $f(x_1, x_2, x_3)$ 的矩阵为 \mathbf{A} , 已知

$$|\mathbf{A} + \mathbf{E}| = 0, \quad \mathbf{AB} - 2\mathbf{B} = \mathbf{O}$$

其中 $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$, 求一个正交变换 $\mathbf{x} = \mathbf{Q}\mathbf{y}$, 将二次型 $f(x_1, x_2, x_3)$ 化为标准形, 并写出矩阵 \mathbf{A} .

法一: 由 $|\mathbf{A} + \mathbf{E}| = |\mathbf{A} - (-1)\mathbf{E}| = 0$, 知 \mathbf{A} 的一个特征值为 $\lambda_1 = -1$, 且记 $\mathbf{B} = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$, 由 $\mathbf{AB} - 2\mathbf{B} = \mathbf{O}$ 知

$$\mathbf{A}(\beta_1, \beta_2, \beta_3) = (\mathbf{A}\beta_1, \mathbf{A}\beta_2, \mathbf{A}\beta_3) = (2\beta_1, 2\beta_2, 2\beta_3)$$

又 $\text{rank } \mathbf{B} = 2$, 所以 2 是矩阵 \mathbf{A} 的二重特征值, 对应的特征向量分别为² $\xi_2 = \beta_2$, $\xi_3 = \beta_3$, 且已正交, 又因为 \mathbf{A} 是二次型的系数矩阵, 则 \mathbf{A} 是实对称矩阵³, 设 λ_1 对应的特征向量为 ξ_1 , 于是

$$(-1, 0, 1) \times (-1, 2, 1) = (-2, -2, -2) \Rightarrow (1, 1, 1) \Rightarrow \xi_1 = (1, 1, 1)^T$$

分别将特征向量 $\xi_{1,2,3}$ 单位化, 有 $e_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, $e_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, $e_3 = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}$, 那么

$$\mathbf{Q} = (e_1, e_2, e_3) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}$$

因此 $\mathbf{Q}^\top \mathbf{A} \mathbf{Q} = \Lambda = \begin{pmatrix} -1 & & \\ & 2 & \\ & & 2 \end{pmatrix}$, 因此二次型的标准形为 $f(y_1, y_2, y_3) = -y_1^2 + 2y_2^2 + 2y_3^2$,

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & & \\ & 2 & \\ & & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}^\top \\ &= \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{2}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{4}{\sqrt{6}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{2}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}^\top = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

法二: 同上得 $\lambda_1 = -1$, $\lambda_2 = \lambda_3 = 2$, $\xi_1 = (1, 1, 1)^T$, $\xi_2 = (-1, 0, 1)^T$, $\xi_3 = (-1, 2, -1)^T$, 那么 $\mathbf{A} - 2\mathbf{E}$ 的特征值分别为 $-3, 0, 0$, 则

$$\mathbf{A} - 2\mathbf{E} = -3e_1 e_1^\top = -3 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} (1, 1, 1) = -\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

例 14.2.35. 设 3 阶实矩阵 \mathbf{A} 及其伴随矩阵 \mathbf{A}^* 满足 $\mathbf{A} - \mathbf{A}^* - \mathbf{E} = \mathbf{O}$, 且 $\det \mathbf{A} = 2$,

(1) 证明: \mathbf{A} 能相似对角化;

(2) 如果 \mathbf{A} 为实对称矩阵, 且 $\xi = (1, 1, -1)^T$ 是齐次线性方程组 $(\mathbf{A} - 2\mathbf{E})\mathbf{x} = \mathbf{0}$ 的一个解, 求对称矩阵 \mathbf{B} , 使得 $\mathbf{B}^2 = \mathbf{A} + \mathbf{E}$.

(1) 因为 $\mathbf{A}\mathbf{A}^* = \mathbf{A}^*\mathbf{A} = |\mathbf{A}|\mathbf{E} = 2\mathbf{E}$, 所以

$$\mathbf{A}(\mathbf{A} - \mathbf{A}^* - \mathbf{E}) = \mathbf{O} \Rightarrow \mathbf{A}^2 - \mathbf{A} - 2\mathbf{E} = \mathbf{O} \Rightarrow (\mathbf{A} + \mathbf{E})(\mathbf{A} - 2\mathbf{E}) = \mathbf{O}$$

那么

$$3 = \text{rank}[(\mathbf{A} + \mathbf{E}) - (\mathbf{A} - 2\mathbf{E})] \leqslant \text{rank}(\mathbf{A} + \mathbf{E}) + \text{rank}(\mathbf{A} - 2\mathbf{E}) \leqslant 3 \Rightarrow \text{rank}(\mathbf{A} + \mathbf{E}) + \text{rank}(\mathbf{A} - 2\mathbf{E}) = 3$$

又因为属于特征值 -1 的特征向量的个数为 $3 - \text{rank}(\mathbf{A} + \mathbf{E})$, 属于特征值 2 的特征向量的个数为 $3 - \text{rank}(\mathbf{A} - 2\mathbf{E})$, 相加得 \mathbf{A} 有 3 个线性无关的特征向量, 即 \mathbf{A} 能相似对角化.

²这里最好要选择矩阵 \mathbf{B} 中已经正交的向量, 可以由 $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$, 且 $(-1, 0, 1) \cdot (-1, 2, -1) = 0$ 知选 β_2 与 β_3 最合适.

³一般地, 不考虑带有虚数的多项式.

- (2) 由(1)可知, 矩阵 A 的两个特征值分别为 $\lambda_1 = -1$, $\lambda_2 = 2$, 且 $\det A = 2 = \lambda_1\lambda_2\lambda_3$, 所以 $\lambda_3 = -1$, 又因为 $\xi = (1, 1, -1)^\top$ 是齐次线性方程组 $(A - 2E)x = \mathbf{0}$ 的一个解, 所以 λ_2 对应的特征向量为 $\xi = (1, 1, -1)^\top$, 故 $A + E$ 的两个特征值分别为 3, 0, 0, 所以存在正交矩阵 Q , 使得 $Q^\top(A + E)Q = \text{diag}(3, 0, 0)$ 因此

$$A + E = Q \text{diag}(3, 0, 0) Q^\top = Q \begin{pmatrix} \pm\sqrt{3} & & \\ & 0 & \\ & & 0 \end{pmatrix} Q^\top Q \begin{pmatrix} \pm\sqrt{3} & & \\ & 0 & \\ & & 0 \end{pmatrix} Q^\top \Rightarrow B = Q \begin{pmatrix} \pm\sqrt{3} & & \\ & 0 & \\ & & 0 \end{pmatrix} Q^\top$$

$$\text{即 } B = \pm\sqrt{3} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} (1, 1, -1) = \pm \frac{\sqrt{3}}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

例 14.2.36. 设 $A = (a_{ij})$ 为三阶实对称矩阵, $\det A = -2$, $\text{tr } A = 0$, 记

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = \begin{vmatrix} x_1^2 & x_2 & x_3 & x_4 \\ x_2 & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ x_3 & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ x_4 & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$$

已知 $(1, 1, 1)^\top$ 为线性方程组 $(A^* - E)x = \mathbf{0}$ 的解, 其中 A^* 为 A 的伴随矩阵, 试给出正交变换 $x = Qy$, 使得 $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ 化为标准形, 并求出矩阵 A .

记 $x = (x_2, x_3, x_4)^\top$, 由行列式的降阶公式 $\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = |D| |A - BD^{-1}C|$, 得

$$f = \begin{vmatrix} x_1^2 & x^\top \\ x & A \end{vmatrix} = \det A \cdot (x_1^2 - x^\top A^{-1}x) = -2x_1^2 - x^\top A^*x$$

问题归结为求正交变换 $x = Py$ 使得 $g(x) = x^\top A^*x$ 化为标准形, 令 $\alpha_1 = (1, 1, 1)^\top$, 那么

$$A^*\alpha_1 = \alpha_1 \Rightarrow AA^*\alpha_1 = A\alpha_1 \Rightarrow A\alpha_1 = \det A \cdot E\alpha_1 = -2\alpha_1$$

即 $\lambda_1 = -2$ 是矩阵 A 的一个特征值, 其对应的特征向量为 $\alpha_1 = (1, 1, 1)^\top$, 又因为 $\det A = -2$, $\text{tr } A = 0$, 所以 $\begin{cases} \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = -2 \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0 \end{cases}$ 解得 $\lambda_2 = \lambda_3 = 1$, 设 λ_2 对应的特征向量为 $(t_1, t_2, t_3)^\top$, 因为 A 是三阶实对称矩阵, 所以不同特征值的特征向量是正交的, 所以 $t_1 + t_2 + t_3 = 0$, 由此解得 A 的属于 1 的两个相互正交的特征向量为 $\alpha_2 = (-1, 1, 0)^\top$, $\alpha_3 = (-1, -1, 2)^\top$, 取正交矩阵

$$P = \left(\frac{\alpha_1}{\|\alpha_1\|}, \frac{\alpha_2}{\|\alpha_2\|}, \frac{\alpha_3}{\|\alpha_3\|} \right) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}$$

则 $P^\top AP = \text{diag}(-2, 1, 1)$, 因此 $P^\top A^*P = |A|(P^\top AP)^{-1}\text{diag}(1, -2, -2)$, 于是, 可取正交变换 $x = Py$, 其中 $y = (y_2, y_3, y_4)^\top$, 使得 $g = y^\top (P^\top A^*P)y = y_2^2 - 2y_3^2 - 2y_4^2$, 最后再令 $x_1 = y_1$, 以及 $Q = \begin{pmatrix} 1 & \\ & P \end{pmatrix}$, 则正交变换 $\begin{pmatrix} x_1 \\ x \end{pmatrix} = Q \begin{pmatrix} y_1 \\ y \end{pmatrix}$ 可使 f 化为标准形 $f = -2y_1^2 - y_2^2 + 2y_3^2 + 2y_4^2$, 并且由

$$A - E = \sum_{i=1}^3 \lambda_i e_i e_i^\top = -3 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} (1, 1, 1) = -\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow A = E - \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

其中 $e_i = \frac{\alpha_i}{\|\alpha_i\|}$.

14.2.7 正交变换的应用

几何应用

例 14.2.37. 设中心在原点的椭圆方程为 $x^2 - 4xy + 5y^2 = 1$, 求该椭圆的长半轴与短半轴.

方程系数矩阵为 $A = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ -2 & 5 \end{pmatrix}$, 那么 $|\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 1 & 2 \\ 2 & \lambda - 5 \end{vmatrix} = 0 \Rightarrow \lambda_{1,2} = 3 \pm 2\sqrt{2}$, 即

$$(3 + 2\sqrt{2})z_1^2 + (3 - 2\sqrt{2})z_2^2 = 1 \Rightarrow \frac{z_1^2}{3 + 2\sqrt{2}} + \frac{z_2^2}{3 - 2\sqrt{2}} = 1 \Rightarrow \left(\frac{1 - \sqrt{2}}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 + \sqrt{2}}{1}\right)^2 = 1$$

因此, 长半轴长度为 $\sqrt{2} + 1$, 短半轴长度为 $\sqrt{2} - 1$.

例 14.2.38. 求椭圆 $2x^2 + 4xy + 5y^2 = 1$ 的面积.

由题意 $f = X^\top AX = X^\top \begin{pmatrix} 2 & 2 \\ 2 & 5 \end{pmatrix}X = 1$, 那么 $|\lambda E - A| = (\lambda - 6)(\lambda - 1) = 0 \Rightarrow \lambda_1 = 6, \lambda_2 = 1$, 因此

$$(\lambda_i E - A)\alpha_i = \mathbf{0} \Rightarrow \alpha_1 = (1, 2)^\top, \alpha_2 = (-2, 1)^\top \Rightarrow Q = \left(\frac{\alpha_1}{|\alpha_1|}, \frac{\alpha_2}{|\alpha_2|} \right)$$

$f = X^\top AX$ 在 $X = QY$ 的作用下, 化为 $f = Y^\top Q^\top AQY = 6y_1^2 + y_2^2 = 1 \Rightarrow S = \frac{\pi}{\sqrt{6}}$.

二次型与曲面方程

例 14.2.39. 转换一般二次型方程

$$2x^2 + 5y^2 + 5z^2 + 4xy - 4xz - 8yz = 1$$

为标准二次型, 并判定其在直角坐标系 $O - xyz$ 中描述的图形类型.

因为 $\begin{array}{c|ccc} \cdots & \cdots & x & \cdots \\ \cdots & \cdots & 2 & \cdots \\ y & 2 & 5 & -4 \\ z & -2 & -4 & 5 \end{array}$, 所以二次型对应的矩阵为 $A = \begin{pmatrix} 2 & 2 & -2 \\ 2 & 5 & -4 \\ -2 & -4 & 5 \end{pmatrix}$, 故特征多项式为

$$|\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 2 & -2 & 2 \\ -2 & \lambda - 5 & 4 \\ 2 & 4 & \lambda - 5 \end{vmatrix} = \frac{r_2+r_3}{r_3+2r_1} \begin{vmatrix} \lambda - 2 & -2 & 2 \\ 0 & \lambda - 1 & \lambda - 1 \\ 2\lambda - 2 & 0 & \lambda - 1 \end{vmatrix} = (\lambda - 1)^2(\lambda - 10) = 0$$

得矩阵 A 的特征值 $\lambda_{1,2,3} = 1, 1, 10$, 对 $\lambda = 1$, 解齐次方程组

$$\begin{cases} -x - 2y + 2z = 0 \\ -2x - 4y + 4z = 0 \\ 2x + 4y - 4z = 0 \end{cases}$$

得基础解系 $\alpha_1 = (2, -1, 0)^\top$ 与 $\alpha_2 = (2, 0, 1)^\top$, 将他们正交化, 得 $\beta_1 = \alpha_1, \beta_2 = \alpha_2 - \frac{[\alpha_2, \beta_1]}{\|\beta_1\|^2} \beta_1$, 即

$$\beta_1 = (2, -1, 0)^\top, \beta_2 = (2, 0, 1)^\top - \frac{4}{5}(2, -1, 0)^\top = \left(\frac{2}{5}, \frac{4}{5}, 1 \right)^\top$$

单位化: $e_1 = \left(\frac{2}{\sqrt{5}}, -\frac{1}{\sqrt{5}}, 0 \right)^\top, e_2 = \left(\frac{2\sqrt{5}}{15}, \frac{4\sqrt{5}}{15}, \frac{\sqrt{5}}{3} \right)^\top$; 对 $\lambda = 10$, 解齐次方程组

$$\begin{cases} 8x - 2y + 2z = 0 \\ -2x + 5y + 4z = 0 \\ 2x + 4y + 5z = 0 \end{cases}$$

得基础解系 $(1, 2, -2)^\top$, 单位化得 $e_3 = \left(\frac{1}{3}, \frac{2}{3}, -\frac{2}{3} \right)^\top$, 令 $T = \begin{pmatrix} \frac{2\sqrt{5}}{5} & \frac{2\sqrt{5}}{15} & \frac{1}{3} \\ -\frac{\sqrt{5}}{5} & \frac{4\sqrt{5}}{15} & \frac{2}{3} \\ 0 & \frac{\sqrt{5}}{2} & -\frac{2}{3} \end{pmatrix}$, 则有正交变换 $y = Tx$, 即

$$\begin{cases} x = \frac{2\sqrt{5}}{5}u + \frac{2\sqrt{5}}{15}v + \frac{1}{3}w \\ y = -\frac{\sqrt{5}}{5}u + \frac{4\sqrt{5}}{15}v + \frac{2}{3}w \\ z = \frac{\sqrt{5}}{2}v - \frac{2}{3}w \end{cases}$$

将原二次型化为 $u^2 + v^2 + 10w^2 = 1$, 即为椭球面.

例 14.2.40. 用正交变换将二次曲面的方程

$$x^2 - 2y^2 - 2z^2 - 4xy + 4xz + 8yz - 27 = 0$$

化为标准方程，并说明该曲面是什么曲面。

设 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 2 \\ -2 & -2 & 4 \\ 2 & 4 & -2 \end{pmatrix}$, $\mathbf{X} = (x, y, z)^\top$, 则曲面方程为 $\mathbf{X}^\top \mathbf{A} \mathbf{X} = 27$, \mathbf{A} 的特征多项式为

$$|\lambda \mathbf{E} - \mathbf{A}| = \begin{vmatrix} \lambda - 1 & 2 & -2 \\ 2 & \lambda + 2 & -4 \\ -2 & -4 & \lambda + 2 \end{vmatrix} = (\lambda - 2)^2(\lambda + 7) = 0$$

对于 $\lambda_{1,2} = 2$, 解齐次线性方程组 $(\lambda_{1,2}\mathbf{E} - \mathbf{A})\mathbf{X} = \mathbf{0}$, 求得对应的线性无关的特征向量为 $\alpha_1 = (-2, 1, 0)^\top$, $\alpha_2 = (2, 0, 1)^\top$, 并将其正交化, 得

$$\mathbf{e}_1 = \frac{1}{\sqrt{5}}(-2, 1, 0)^\top, \quad \mathbf{e}_2 = \frac{1}{3\sqrt{5}}(2, 4, 5)^\top$$

对于 $\lambda_3 = -7$, 解齐次线性方程组 $(\lambda_3\mathbf{E} - \mathbf{A})\mathbf{X} = \mathbf{0}$, 求得对应的单位化特征向量为 $\mathbf{e}_3 = \frac{1}{3}(1, 2, -2)^\top$, 取正交矩阵 $\mathbf{Q} = (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$, 令 $\mathbf{X}' = (x', y', z')^\top$, 则正交变换 $\mathbf{X} = \mathbf{Q}\mathbf{X}'$ 将曲面的方程 $\mathbf{X}^\top \mathbf{A} \mathbf{X} = 27$ 可化为如下标准方程

$$2x'^2 + 2y'^2 - 7z'^2 = 27$$

这是单叶双曲面。

最值问题

例 14.2.41. 已知二次型 $f(x_1, x_2, x_3) = x_1^2 - 3x_2^2 - 3x_3^2 + 2x_1x_2 - 4x_1x_3$,

(1) 写出二次型 f 的矩阵表达式;

(2) 用正交变换把二次型 f 化为标准形, 并写出相应的正交矩阵;

(3) 若 $\mathbf{x}^\top \mathbf{x} = 5$, 求 f_{max} .

$$(1) f(x_1, x_2, x_3) = \mathbf{x}^\top \mathbf{A} \mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3) \begin{pmatrix} 1 & 1 & -2 \\ 1 & -3 & 0 \\ -2 & 0 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}.$$

$$(2) |\lambda \mathbf{E} - \mathbf{A}| = \begin{vmatrix} \lambda - 1 & -1 & 2 \\ -1 & \lambda + 3 & 0 \\ 2 & 0 & \lambda + 3 \end{vmatrix} = (\lambda - 2)(\lambda + 3)(\lambda + 4), \text{ 当 } \lambda = 2 \text{ 时, 由 } (2\mathbf{E} - \mathbf{A})\mathbf{x} = \mathbf{0}, \text{ 即}$$

$$2\mathbf{E} - \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 2 \\ -1 & 5 & 0 \\ 2 & 0 & 5 \end{pmatrix} \xrightarrow[r_3 - 2r_1]{r_2 + r_1} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 2 \\ 0 & 4 & 2 \\ 0 & 2 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow[r_2 + \frac{1}{2}r_3]{r_3 - \frac{1}{2}r_2} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 2 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow[r_1 - 2r_2]{r_1 - 2r_2} \begin{pmatrix} 1 & -5 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

则基础解系 $\alpha_1 = (5, 1, -2)^\top$; 当 $\lambda = -3$ 时, $(-3\mathbf{E} - \mathbf{A})\mathbf{x} = \mathbf{0}$, 即

$$-3\mathbf{E} - \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -4 & -1 & 2 \\ -1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow[r_1 \leftrightarrow r_2]{r_2 \times (-1)} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

则基础解系 $\alpha_2 = (0, 2, 1)^\top$; 当 $\lambda = -4$ 时, $(-4\mathbf{E} - \mathbf{A})\mathbf{x} = \mathbf{0}$, 即

$$-4\mathbf{E} - \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -5 & -1 & 2 \\ -1 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & -1 \end{pmatrix} \xrightarrow[r_1 \leftrightarrow r_2]{r_2 + 5r_1} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 4 & 2 \\ 0 & -2 & -1 \end{pmatrix} \xrightarrow[r_3 - 2r_1]{r_3 + \frac{1}{2}r_2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 4 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

则基础解系 $\alpha_3 = (-1, 1, -2)$, 因为 \mathbf{A} 为实对称矩阵, 对应于不同特征值的特征向量相互正交, 即 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 相互正交, 故只需将其单位化, 有

$$\mathbf{e}_1 = \frac{1}{\sqrt{30}} \begin{pmatrix} 5 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}_2 = \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}_3 = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix}$$

令 $\mathbf{Q} = (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3) = \begin{pmatrix} \frac{5}{\sqrt{30}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{30}} & \frac{2}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ -\frac{2}{\sqrt{30}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}$ 则经正交变换 $x = \mathbf{Q}\mathbf{y}$, 二次型化为标准形

$$f(x_1, x_2, x_3) = \mathbf{x}^\top \mathbf{A} \mathbf{x} = (\mathbf{Q}\mathbf{y})^\top \mathbf{A}(\mathbf{Q}\mathbf{y}) = \mathbf{y}^\top \mathbf{Q}^\top \mathbf{A} \mathbf{Q} \mathbf{y} = \mathbf{y}^\top \mathbf{\Lambda} \mathbf{y} = 2y_1^2 - 3y_2^2 - 4y_3^2.$$

(3) 因为 $\mathbf{x}^\top \mathbf{x} = (\mathbf{Q}\mathbf{y})^\top (\mathbf{Q}\mathbf{y}) = \mathbf{y}^\top \mathbf{Q}^\top \mathbf{Q} \mathbf{y} = \mathbf{y}^\top \mathbf{y} = 5$, 故求 f 在 $\mathbf{y}^\top \mathbf{y} = 5$ 的最大值, 则由定理 13.2.7 得

$$f(x_1, x_2, x_3) = \mathbf{x}^\top \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{y}^\top \mathbf{\Lambda} \mathbf{y} = 2y_1^2 - 3y_2^2 - 4y_3^2 \leq 2(y_1^2 + y_2^2 + y_3^2) = 10$$

例 14.2.42. 已知二次型 $f(x, y, z) = 3x^2 + 2y^2 + 2z^2 + 2xy + 2zx$,

(1) 用正交变换把二次型 f 化为标准形, 并写出相应的正交矩阵;

(2) 求函数 $f(x, y, z)$ 在单位球面 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ 上的最大值与最小值.

(1) 二次型对应的矩阵 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{pmatrix}$, 则特征多项式为

$$f(\lambda) = \lambda^3 - 7\lambda^2 + 14\lambda - 8 = (\lambda - 1)(\lambda - 2)(\lambda - 4) \Rightarrow \lambda_1 = 1, \lambda_2 = 2, \lambda_3 = 4$$

那么 $\lambda_1 \mathbf{E} - \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -2 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ 其中 r_1 可由 r_2 与 $(0, 1, -1)$ 线性表示, 则

$$(1, 0, 1) \times (0, 1, -1) = (-1, 1, 1) \Rightarrow \xi_1 = (-1, 1, 1)^\top$$

同理可得 $\xi_2 = (0, -1, 1)^\top$, $\xi_3 = (2, 1, 1)^\top$, 则令 $\mathbf{P} = \left(\frac{\xi_1}{\|\xi_1\|}, \frac{\xi_2}{\|\xi_2\|}, \frac{\xi_3}{\|\xi_3\|} \right) = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}$, 于是正交

变换 $\mathbf{X}' = \mathbf{P}^\top \mathbf{X}$, 其中 $\mathbf{X}' = (x', y', z')$, $\mathbf{X} = (x, y, z)$.

(2) 注意到

$$x^2 + y^2 + z^2 = \mathbf{X}^\top \mathbf{X} = \mathbf{X}^\top \mathbf{P} \mathbf{P}^\top \mathbf{X} = (\mathbf{P}^\top \mathbf{X})^\top (\mathbf{P}^\top \mathbf{X}) = \mathbf{X}'^\top \mathbf{X}' = x'^2 + y'^2 + z'^2$$

$$f(x, y, z) = \mathbf{X}^\top \mathbf{A} \mathbf{X} = \mathbf{X}^\top \mathbf{P} \mathbf{\Lambda} \mathbf{P}^\top \mathbf{X} = (\mathbf{P}^\top \mathbf{X})^\top \mathbf{\Lambda} (\mathbf{P}^\top \mathbf{X}) = (\mathbf{X}')^\top \mathbf{\Lambda} (\mathbf{X}') = x'^2 + 2y'^2 + 4z'^2$$

函数 $f(x, y, z)$ 在单位球面 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ 上的最大值与最小值也就是函数 $x'^2 + 2y'^2 + 4z'^2$ 在 $x'^2 + y'^2 + z'^2 = 1$ 上的最大值与最小值, 因此

$$f_{max} = \max_{x'^2 + y'^2 + z'^2 = 1} \{x'^2 + 2y'^2 + 4z'^2\} = \max_{x'^2 + y'^2 + z'^2 = 1} \{4 - 3x'^2 - 2y'^2\} = 4 - 3x'^2 - 2y'^2 \Big|_{(0, 0, 1)} = 4$$

$$f_{min} = \min_{x'^2 + y'^2 + z'^2 = 1} \{x'^2 + 2y'^2 + 4z'^2\} = \min_{x'^2 + y'^2 + z'^2 = 1} \{1 + y'^2 + 3z'^2\} = 1 + y'^2 + 3z'^2 \Big|_{(1, 0, 0)} = 1.$$

第三部分

概率论与数理统计

第 15 章

概率论的基本概念

“概率论，当局限在适当的范围内，应该同样引起数学家、实验者和政治家的兴趣。”

——德·摩根

概率论是数学的一个分支，研究随机事件的发生概率和随机现象的规律性。它是研究不确定性的一种工具和方法。

概率论的基本概念包括随机试验、样本空间、事件、概率等。随机试验是指具有多种可能结果的试验，例如掷硬币、抛骰子等。样本空间是指随机试验的所有可能结果的集合。事件是样本空间的子集，表示试验中我们感兴趣的一些结果。概率是事件发生的可能性的度量，通常用一个介于 0 和 1 之间的数来表示。

概率论的基本原理包括古典概型、几何概型和统计概型。古典概型适用于试验结果的数量有限且每个结果发生的可能性相等的情况，例如抛硬币、掷骰子等。几何概型适用于试验结果的数量无限且每个结果发生的可能性相等的情况，例如在一条直线上选择一个点的位置。统计概型适用于试验结果的数量无限且每个结果发生的可能性不相等的情况，例如从一副牌中抽取一张牌。

概率论的应用广泛，包括统计学、金融学、物理学、工程学、生物学等领域。它可用于描述随机现象的规律性、进行风险评估和决策分析、进行数据分析和建模等。概率论提供了一种量化不确定性的方法，帮助我们理解和解决各种实际问题。

15.1 随机事件及其概率

15.1.1 事件的运算

定理 15.1.1 (交换律). $A \cup B = B \cup A$, $AB = BA$.

定理 15.1.2 (结合律). $A \cup B \cup C = (A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$, $ABC = (AB)C = A(BC)$.

特别地 $(A \cup B) \cap C = A \cup (B \cap C)$ 不一定成立，比如当 $A \neq \emptyset$, $B = \Omega$, $C = \emptyset$ 时，该式不成立。

定理 15.1.3 (和与积的分配律). $(A \cup B) \cap C = (A \cap C) \cup (B \cap C)$, $(A \cap B) \cup C = (A \cup C) \cap (B \cup C)$.

定理 15.1.4 (差与积的分配律). $(A - B) \cap C = (A \cap C) - (B \cap C)$, $(A \cap B) - C = (A - C) \cap (B - C)$.

定理 15.1.5 (和与差的分配律). $(A \cup B) - C = (A - C) \cup (B - C)$

特别地 $(A - B) \cup C = (A \cup C) - (B \cup C)$ 不一定成立, 比如当 $A = B$, $C \neq \emptyset$ 时, 该式不成立.

定理 15.1.6 (对偶律). $\overline{A \cup B} = \bar{A}\bar{B}$, $\overline{AB} = \bar{A} \cup \bar{B}$, $\overline{A \cup B \cup C} = \bar{A}\bar{B}\bar{C}$, $\overline{ABC} = \bar{A} \cup \bar{B} \cup \bar{C}$.

定理 15.1.7 (和差转换). (1) 差: $A - B = \begin{cases} A - AB = A\bar{B} \\ A - BA = \bar{B}A. \end{cases}$

(2) 和: $A \cup B = \begin{cases} (A - B) \cup B = A\bar{B} \cup B = \bar{B}A \cup B \\ A \cup (B - A) = A \cup \bar{A}B = A \cup B\bar{A}. \end{cases}$

15.1.2 概率的性质

定理 15.1.8. $P(\emptyset) = 0$, $P(\Omega) = 1$.

定理 15.1.9 (有限可加性). 设 A_1, A_2, \dots, A_n 是两两互不相容的事件, 则有

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n)$$

(1) 事件 S 被分成两个不相容的事件 S_1, S_2 ($S_1 S_2 = \emptyset$, $S_1 \cup S_2 = S$), 则 $P(S) = P(S_1) + P(S_2)$;

(2) 若 $S_1 \subset S$, 则 $P(S - S_1) = P(S) - P(S_1)$.

定理 15.1.10 (求逆公式). $P(\bar{A}) = 1 - P(A)$.

例 15.1.1. 设 A, B 为两个随机事件, 若 $P(AB) = 0.25$, $P(B) = 0.3$, $P(A \cup B) = 0.6$, 求 $P(A | \bar{B})$.

如图 15.1.1 所示, 则 $P(A | \bar{B}) = \frac{P(A\bar{B})}{P(\bar{B})} = \frac{0.3}{1 - P(B)} = \frac{3}{7}$.

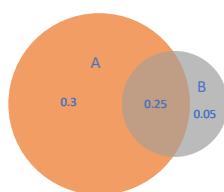


图 15.1.1

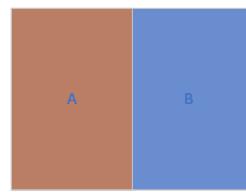


图 15.1.2

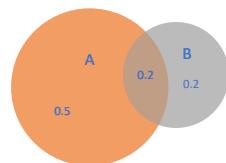


图 15.1.3

例 15.1.2. 设 A, B 为随机事件, $AB = \bar{A}\bar{B}$, $0 < P(B) < 1$, 求 $P(A | \bar{B}) + P(\bar{A} | B)$.

因为 $AB = \bar{A}\bar{B}$, 所以事件 $A + B = \Omega$, 如图 15.1.2 所示, 则 $P(A | \bar{B}) + P(\bar{A} | B) = P(A | A) + P(B | B) = 1 + 1 = 2$.

例 15.1.3. 已知 $P(\bar{A}) = 0.3$, $P(B) = 0.4$, $P(A - B) = 0.5$, 求 $P\{B | (A \cup \bar{B})\}$.

由题意可作出如图 15.1.3 所示的 ven 图, 则 $P\{B | (A \cup \bar{B})\} = \frac{P(B \cap (A \cup \bar{B}))}{P(A \cup \bar{B})} = \frac{P(AB)}{1 - P(AB)} = 0.25$.

15.1.3 古典概率与几何概率

古典概率

例 15.1.4. 求 10 个不同规格的零件中混入 3 个次品, 现进行逐个检查, 则查完 5 个零件时正好查出 3 个次品的概率.

法一: 记 $A =$ 查完 5 个零件正好查出 3 个次品, 那么事件 A 由两个事件构造:

$B =$ 前 4 次检查, 查出 2 个次品, $C =$ 第 5 次检查, 查出的是次品

即 $A = BC$, 由乘法公式 $P(A) = P(BC) = P(B)P(C|B)$, 前 4 次检查中有 2 个正品和 2 个次品的组合为

$$P(B) = \frac{C_3^2 \cdot C_7^2}{C_{10}^4} = \frac{3}{10}$$

已知 B 发生的条件下, 剩下 6 个零件中查出 1 个次品的概率为 $\frac{1}{6}$, 即 $P(C|B) = \frac{1}{6}$, 于是 $P(A) = \frac{3}{10} \times \frac{1}{6} = \frac{1}{20}$.

法二: 事件 A 等价于在 3 个次品中选一个放在第 5 个位置上, 然后在 7 个正品中选 2 个与余下的 2 个次品排在前 4 个位置上, 最后将其余 5 个正品随意排在后面 5 个位置上, 所以

$$P(A) = \frac{C_3^1 C_7^2 C_2^2 \cdot 4! \cdot 5!}{10!} = \frac{1}{20}.$$

法三: 考虑 3 只次品在 10 次检查中的位置, 问题转化为前 4 个位置中选 2 个放次品, 第 5 个位置必须放次品, 于是

$$P(A) = \frac{C_4^2 \cdot 1}{C_{10}^3} = \frac{1}{20}.$$

法四: 只考虑放正品的位置, 则前 4 个位置需要放 2 个正品, 后 5 个位置全为正品, 则 $P(A) = \frac{C_4^2 C_5^5}{C_{10}^3} = \frac{1}{20}$

几何概率

15.1.4 概率基本公式及条件概率

定理 15.1.11 (与独立有关的条件概率). 设 $P(B) \in (0, 1)$, 则 A 与 B 相互独立的充要条件为:

$$(1) \quad P(A | B) = P(A | \bar{B});$$

$$(2) \quad P(A | B) + P(\bar{A} | \bar{B}) = 1;$$

$$(3) \quad P(\bar{A} | B) + P(A | \bar{B}) = 1.$$

15.1.5 全概率公式和 Bayes 公式

定义 15.1.1 (完备事件组). 设 B_1, B_2, \dots, B_n 为试验 E 的一组事件, Ω 为样本空间, 若满足以下两个条件:

$$(1) \quad B_i B_j = \emptyset, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, n;$$

$$(2) \quad B_1 \cup B_2 \cup \cdots \cup B_n = \Omega.$$

则称 B_1, B_2, \dots, B_n 是一个完备事件组, 也称 B_1, B_2, \dots, B_n 为样本空间 Ω 的一个划分.

定理 15.1.12 (全概率公式与 Bayes 公式). 设 Ω 为试验 E 的样本空间, B_1, B_2, \dots, B_n 为 Ω 的一个划分, 且 $P(B_i) > 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 则

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(B_i) P(A | B_i) = P(A | B_1) P(B_1) + P(A | B_2) P(B_2) + \cdots + P(A | B_n) P(B_n)$$

称为全概率公式. 而

$$P(B_i | A) = \frac{P(B_i A)}{P(A)} = \frac{P(A | B_i) P(B_i)}{\sum_{j=1}^n P(A | B_j) P(B_j)} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

称为 Bayes 公式.

例 15.1.5. 一条生产线生产 n 件产品不出故障的概率为 $\frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda}$ ($n = 0, 1, \dots$) 若每件产品合格的概率为 p ($0 < p < 1$), 且各产品是否合格相互独立, 求该生产线在两次故障之间共生产 k ($k = 0, 1, \dots$) 件合格品的概率.

设事件 A_i = “两次故障之间生产的产品总个数为 i ($i = 0, 1, \dots$)”, 事件 B_k = “两次故障之间生产的合格品个数为 k ($k = 0, 1, \dots, i$), 那么事件 B_k 的概率为

$$\begin{aligned} P\{B_k\} &= \sum_{i=0}^{\infty} P\{A_i\} \cdot P\{B_k | A_i\} = \sum_{i=k}^{\infty} P\{A_i\} \cdot P\{B_k | A_i\} = \sum_{i=k}^{\infty} \left(\frac{\lambda^i}{i!} e^{-\lambda} \right) \cdot [C_i^k p^k (1-p)^{i-k}] \\ &= e^{-\lambda} p^k \sum_{i=k}^{\infty} \frac{\lambda^i}{i!} C_i^k (1-p)^{i-k} = e^{-\lambda} p^k \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\lambda^{i+k}}{(i+k)!} C_{i+k}^k (1-p)^i = e^{-\lambda} p^k \lambda^k \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\lambda^i}{(i+k)!} \frac{(i+k)!}{k! i!} (1-p)^i \\ &= \frac{1}{k!} e^{-\lambda} p^k \lambda^k \sum_{i=0}^{\infty} \frac{[\lambda(1-p)]^i}{i!} = \frac{1}{k!} e^{-\lambda} p^k \lambda^k \cdot e^x \Big|_{x=\lambda(1-p)} = e^{-\lambda p} \frac{(p\lambda)^k}{k!} \end{aligned}$$

15.2 事件的独立性

第 16 章

随机变量及其分布

“我创建了形貌随机征象的一种概率散布..”

——泊松

随机变量是一个可以随机取不同值的变量, 其取值是由随机事件的结果决定的. 随机变量可以是离散的, 也可以是连续的.

随机变量的分布描述了其取不同值的概率分布情况. 常见的随机变量分布包括:

1. 离散型随机变量的分布:

- (a) 二项分布: 描述了在一次伯努利试验中成功的次数的分布.
- (b) 泊松分布: 描述了在一段时间内某事件发生次数的分布.
- (c) 几何分布: 描述了在一系列独立伯努利试验中首次成功所需的次数的分布.

2. 连续型随机变量的分布:

- (a) 正态分布: 也称为高斯分布, 是最常见的连续型随机变量分布, 具有钟形曲线.
- (b) 均匀分布: 描述了在一个区间内各个数值出现的概率相同的分布.
- (c) 指数分布: 描述了连续时间内某事件发生的间隔时间的分布.

除了以上列举的分布外, 还有众多其他类型的随机变量分布, 每种分布都有其特定的数学形式和特征. 在统计学和概率论中, 随机变量及其分布是研究的重要对象, 用来描述和分析随机现象的规律.

16.1 离散型随机变量的概率分布

16.1.1 离散型随机变量的分布函数

定义 16.1.1 (分布函数). 设离散型随机变量 X 的分布律为 $P\{X = x_k\} = p_k$, $k = 1, 2, \dots$, 则 X 的分

布函数为

$$F(x) = P\{X \leq x\} = \sum_{x_k \leq x} p_k$$

$$\text{或者 } F(x) = \begin{cases} 0, & x < x_1 \\ p_1, & x_1 \leq x < x_2 \\ p_1 + p_2, & x_2 \leq x < x_3 \\ \vdots & \vdots \end{cases}$$

定理 16.1.1 (分布函数的性质). 以下三条是判定一个函数是否为分布函数的充要条件.

- (1) 单调性: $F(x)$ 是 x 的单调不减函数, 即对于任意实数 $x_1 < x_2$, 有 $F(x_1) \leq F(x_2)$;
- (2) 有界性: $0 \leq F(x) \leq 1$, $F(-\infty) = \lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$, $F(+\infty) = \lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1$;
- (3) 右连续: $F(x)$ 是 x 的右连续函数, 即对任意实数 x , 有 $F(x^+) = F(x)$.

16.1.2 二项分布

定义 16.1.2 (二项分布). 在 n 重伯努利试验中, 若用随机变量 X 表示所关心事件 A 发生的次数, $P(A) = p$ ($0 < p < 1$), 则 X 的分布律为

$$P\{X = k\} = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}, \quad k = 0, 1, \dots, n$$

则称 X 服从参数为 n, p 的二项分布, 记作 $X \sim B(n, p)$.

- (1) 0-1 分布可以视为 $n = 1$ 时的二项分布;
- (2) 若 $X \sim B(n, p)$, 令 $Y = n - X$, 则 $Y \sim B(n, 1 - p)$.

16.2 连续型随机变量的概率分布

16.2.1 连续型随机变量概率密度

定义 16.2.1 (连续型随机变量概率密度). 设随机变量 X 的分布函数是 $F(x)$, 若存在一个非负可积函数 $f(x)$, 使对于任意实数 x , 都有

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad x \in \mathbb{R}$$

则称 X 为连续型随机变量, 称 $f(x)$ 为 X 的概率密度函数, 简称概率密度, 记为 $X \sim f(x)$.

定理 16.2.1 (连续型随机变量概率密度的性质). 概率密度 $f(x)$ 的性质如下:

- (1) 非负性: $f(x) \geq 0$;

(2) 规范性: $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$;

(3) 对任意实数 $a \leq b$ 都有 $P\{a < X \leq b\} = \int_a^b f(x)dx$;

(4) 若 $f(x)$ 在点 x 处连续, 则有 $F'(x) = f(x)$.

16.2.2 均匀分布

定义 16.2.2 (均匀分布). 若随机变量 X 的概率密度为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

则称 X 在区间 (a, b) 上服从均匀分布, 记为 $X \sim U(a, b)$. 其分布函数为

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & b \leq x. \end{cases}$$

16.2.3 指数分布

定义 16.2.3 (指数分布). 若随机变量 X 的概率密度为

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

则称 X 服从参数为 $\lambda (\lambda > 0)$ 的指数分布, 记为 $X \sim E(\lambda)$, 其分布函数为

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

(1) 指数分布常用来描述电子元器件的寿命, $P\{X > x\} = e^{-\lambda x}$;

(2) 指数分布具有无记忆性, 对于任意 $s, t > 0$, 有 $P\{X > s + t | X > s\} = P\{X > t\}$.

例 16.2.1. 设 X 是服从参数为 2 的指数分布的随机变量, 求随机变量 $Y = X - \frac{1}{2}$ 的概率密度函数 $f_Y(y)$.

因为 $X \sim E(2)$, 所以其概率密度为 $f_X(x) = \begin{cases} 2e^{-2x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$, 现 $Y = X - \frac{1}{2}$, 所以

$$F_Y(y) = P\{Y \leq y\} = P\left\{X - \frac{1}{2} \leq y\right\} = P\left\{X \leq y + \frac{1}{2}\right\} = \int_{-\infty}^{y+\frac{1}{2}} f_X(x)dx = F_X\left(y + \frac{1}{2}\right)$$

那么

$$f_Y(y) = F'_Y(y) = F'_X\left(y + \frac{1}{2}\right) = f_X\left(y + \frac{1}{2}\right) = \begin{cases} 2e^{-2y-1}, & y > -\frac{1}{2} \\ 0, & y \leq -\frac{1}{2} \end{cases}$$

例 16.2.2. 设随机变量 $X \sim E(2)$, a 为大于 2 的常数, 已知 $P\{X \leq a | X > 2\} = 1 - e^{-2}$, 求 a .

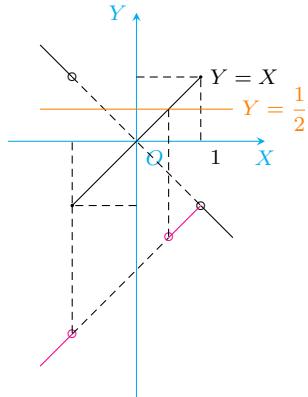
法一: 因为 $P\{X \leq a | X > 2\} = 1 - P\{X > a | X > 2\}$, 于是

$$\begin{aligned} P\{X \leq a | X > 2\} &= 1 - \frac{P\{X > a, X > 2\}}{P\{X > 2\}} = 1 - \frac{P\{X > a\}}{P\{X > 2\}} = 1 - \frac{\int_a^{+\infty} 2e^{-2t} dt}{\int_2^{+\infty} 2e^{-2t} dt} \\ &= 1 - \frac{e^{-2a}}{e^{-4}} = 1 - e^{-2(a-2)} = 1 - e^{-2}. \end{aligned}$$

解得 $a = 3$.

法二: $P\{X \leq a | X > 2\} = 1 - P\{X > a | X > 2\} = 1 - P\{X > a - 2\} = 1 - e^{-2(a-2)} = 1 - e^{-2} \Rightarrow a = 3$.

例 16.2.3. 已知随机变量 $X \sim E(\lambda)$ ($\lambda > 0$), 且随机变量 $Y = \begin{cases} X, & |X| \leq 1 \\ -X, & |X| > 1 \end{cases}$, 求 $P\left\{Y \leq \frac{1}{2}\right\}$.



由图 16.2.1 可知,

$$\begin{aligned} P\left\{Y \leq \frac{1}{2}\right\} &= P\left\{-1 \leq X \leq \frac{1}{2}\right\} + P\{X > 1\} \\ &= P\left\{-1 \leq X \leq \frac{1}{2}\right\} + 1 - P\{X \leq 1\} \\ &= 1 - P\{X < -1\} + P\left\{\frac{1}{2} < X \leq 1\right\} \end{aligned}$$

而 $P\{X < -1\} = 0$, 因此

$$P\left\{Y \leq \frac{1}{2}\right\} = 1 - P\left\{\frac{1}{2} < X \leq 1\right\} = 1 - \int_{\frac{1}{2}}^1 \lambda e^{-\lambda x} dx = 1 + e^{-\lambda} - e^{-\frac{\lambda}{2}}.$$

图 16.2.1

16.2.4 正态分布

定义 16.2.4 (正态分布及其分布函数). 若随机变量 X 的密度为 $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$, 则称 X 服从参数为 μ, σ 的正态分布, 简记为 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, X 的分布函数为 $F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$.

定理 16.2.2 (对称性). 一般正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的概率密度 $f(x)$ 满足 $f(x) = f(2\mu - x)$.

定理 16.2.3 (和一性). 一般正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的分布函数 $F(x)$ 满足 $F(x) + F(2\mu - x) = 1$.

定义 16.2.5 (标准正态分布). 当定义 16.2.4 中 $\mu = 0, \sigma = 1$ 时, 称 X 服从标准正态分布, 简记为 $X \sim N(0, 1)$, 并且分别用 $\varphi(x)$ 与 $\Phi(x)$ 表示其概率密度函数和分布函数.

例 16.2.4. 设 X, Y 相互独立, 且 $X \sim N(1, 2)$, $Y \sim N(0, 1)$, 求 $Z = 2X - Y + 3$ 的密度函数.

因为 $X \sim N(1, 2)$, $Y \sim N(0, 1)$, 所以

$$E(X) = 1, D(X) = 2, E(Y) = 0, D(Y) = 1$$

因此

$$E(Z) = E(2X - Y + 3) = 2E(X) - E(Y) + 3 = 2 - 0 + 3 = 5$$

$$D(Z) = D(2X - Y + 3) = 4D(X) + D(Y) = 8 + 1 = 9$$

故 $Z \sim N(5, 9)$, 于是 $f_Z(z) = \frac{1}{3\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-5)^2}{18}}$.

例 16.2.5. 若随机变量 X 服从正态分布 $N(2, \sigma^2)$, 且 $P\{2 < X < 4\} = 0.3$, 则 $P\{X < 0\}$ 等于

A. 0.2

B. 0.3

C. 0.5

D. 0.7

法一: 由 $X \sim N(2, \sigma^2)$ 知 $\frac{X-2}{\sigma} \sim N(0, 1)$ 从而 $P\{2 < X < 4\} = P\left\{\frac{2-2}{\sigma} < \frac{X-2}{\sigma} < \frac{4-2}{\sigma}\right\} = \Phi\left(\frac{2}{\sigma}\right) - \Phi(0) = 0.3$, 又 $\Phi(0) = \frac{1}{2}$, 得 $\Phi\left(\frac{2}{\sigma}\right) = 0.8$ 于是得 $P\{X < 0\} = P\left\{\frac{X-2}{\sigma} < \frac{0-2}{\sigma}\right\} = 1 - \Phi\left(\frac{2}{\sigma}\right) = 0.2$ 故选 A.

法二: 由 $X \sim N(2, \sigma^2)$ 得到分布函数关于 $x = 2$ 对称, 根据对称性, 并由 $P\{2 < X < 4\} = 0.3$ 得到 $P\{0 < X < 2\} = 0.3$, 那么 $P\{0 < X < 4\} = 0.6$, 那么 $P\{X < 0\} = \frac{1}{2}(1 - 0.6) = 0.2$, 故选 A.

例 16.2.6. 设 $b > 0$ 为常数, 且 $\varphi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi b}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{b}} dt$, 求 $\int_0^{+\infty} (1 - \varphi(x)) dx$.

因为 $1 = \frac{2}{\sqrt{\pi b}} \int_0^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{b}} dt$, 于是 $1 - \varphi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi b}} \int_x^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{b}} dt$, 那么

$$\begin{aligned} \int_0^{+\infty} (1 - \varphi(x)) dx &= \frac{2}{\sqrt{\pi b}} \int_0^{+\infty} dx \int_x^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{b}} dt = \frac{2}{\sqrt{\pi b}} \int_0^{+\infty} dt \int_0^t e^{-\frac{t^2}{b}} dx \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi b}} \int_0^{+\infty} te^{-\frac{t^2}{b}} dt = \frac{2}{\sqrt{\pi b}} \frac{b}{2} \int_0^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{b}} d\frac{t^2}{b} = \sqrt{\frac{b}{\pi}}. \end{aligned}$$

第 17 章

多维随机变量及其分布

17.1 多维离散型随机变量

17.2 多维连续型随机变量

17.2.1 边缘概率密度与边缘分布函数

定义 17.2.1 (边缘分布函数). 设二维随机变量 (X, Y) 的联合分布函数为 $F(x, y)$, 随机变量 X 和 Y 的分布函数 $F_X(x)$ 与 $F_Y(y)$ 分别称为关于 X 和 Y 的边缘分布函数

$$F_X(x) = P\{X \leq x\} = P\{X \leq x, Y < +\infty\} = F(x, +\infty) = \lim_{y \rightarrow +\infty} F(x, y)$$

同理 $F_Y(y) = F(+\infty, y) = \lim_{x \rightarrow +\infty} F(x, y)$.

定义 17.2.2 (二维连续型随机变量的边缘概率密度). 设二维连续型随机变量 (X, Y) 的概率密度为 $f(x, y)$, 则称

$$\begin{aligned} F_X(x) &= F(x, +\infty) = \int_{-\infty}^x \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dy \right] dx \\ F_Y(y) &= F(+\infty, y) = \int_{-\infty}^y \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dx \right] dy \end{aligned}$$

分别为 (X, Y) 关于 X 和关于 Y 的边缘分布函数. 而称

$$\begin{aligned} f_X(x) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dy \\ f_Y(y) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dx \end{aligned}$$

分别为 (X, Y) 关于 X 和关于 Y 的边缘概率密度.

例 17.2.1. 设二维随机变量 (X, Y) 的概率密度为

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{k}{2}xe^{-(x+y)}, & x, y > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

- (1) 求常数 k ;
- (2) 求 (X, Y) 关于 X 和关于 Y 的边缘概率密度函数;
- (3) 判断随机变量 X 和 Y 是否相互独立.

$$(1) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dx dy = 1 \Rightarrow 1 = \int_0^{+\infty} dy \int_0^{+\infty} \frac{k}{2} xe^{-(x+y)} dx = \frac{k}{2} \int_0^{+\infty} e^{-y} dy \Rightarrow k = 2.$$

$$(2) f_X(x) = \int_0^{+\infty} xe^{-(x+y)} dy = xe^{-x} (x > 0) \Rightarrow f_X(x) = \begin{cases} xe^{-x}, & x > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad \text{同理 } f_Y(y) = \begin{cases} e^{-y}, & y > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

(3) 因为 $f(x, y) = f_X(x) \cdot f_Y(y)$, 所以 X, Y 相互独立.

17.2.2 二维连续型随机变量函数的分布

定理 17.2.1 (常见的二维连续型随机变量函数的分布). 设二维连续型随机变量 (X, Y) 的概率密度为 $f(x, y)$, X 和 Y 概率密度分别为 $f_X(x)$ 和 $f_Y(y)$, 连续型随机变量 $Z = g(X, Y)$ 是 X 和 Y 的函数, 则当

- (1) $Z = X + Y$ 的概率密度

$$\begin{aligned} f_Z(z) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, z-x) dx \xrightarrow{\text{当 } X \text{ 和 } Y \text{ 相互独立时}} f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) f_Y(z-x) dx \\ f_Z(z) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(z-y, y) dy \xrightarrow{\text{当 } X \text{ 和 } Y \text{ 相互独立时}} f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(z-y) f_Y(y) dy \end{aligned}$$

- (2) $Z = \pm X \mp Y$ 的概率密度

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, x \mp z) dx &\xrightarrow{\text{当 } X \text{ 和 } Y \text{ 相互独立时}} \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) f_Y(x \mp z) dx \\ \int_{-\infty}^{+\infty} f(y \pm z, y) dy &\xrightarrow{\text{当 } X \text{ 和 } Y \text{ 相互独立时}} \int_{-\infty}^{+\infty} f_Y(y) f_X(y \pm z) dy \end{aligned}$$

- (3) $Z = \frac{Y}{X}$ 的概率密度

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} |x| f(x, xz) dx \xrightarrow{\text{当 } X \text{ 和 } Y \text{ 相互独立时}} \int_{-\infty}^{+\infty} |x| f_X(x) f_Y(xz) dx$$

- (4) $Z = XY$ 的概率密度

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|x|} f\left(x, \frac{z}{x}\right) dx \xrightarrow{\text{当 } X \text{ 和 } Y \text{ 相互独立时}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|x|} f_X(x) f_Y\left(\frac{z}{x}\right) dx$$

(5) $Z = \max\{X, Y\}$ 的分布

$$F_Z(z) = P\{X \leq z, Y \leq z\} = F(z, z) \xrightarrow{\text{当 } X \text{ 和 } Y \text{ 相互独立时}} F_X(z)F_Y(z) \xrightarrow{\text{当 } X \text{ 和 } Y \text{ 独立同分布时}} F_X^2(z)$$

当 X 和 Y 独立同分布时, Z 的概率密度为

$$f_Z(z) = 2F_X(z)f_X(z)$$

(6) $Z = \min\{X, Y\}$ 的分布

$$\begin{aligned} F_Z(z) &= 1 - P\{X > z, Y > z\} \xrightarrow{\text{当 } X \text{ 和 } Y \text{ 相互独立时}} 1 - [1 - F_X(z)][1 - F_Y(z)] \\ &\xrightarrow{\text{当 } X \text{ 和 } Y \text{ 独立同分布时}} 1 - [1 - F_X(z)]^2 \end{aligned}$$

当 X 和 Y 独立同分布时, Z 的概率密度为

$$f_Z(z) = 2[1 - F_X(z)]f_X(z).$$

17.2.3 二维随机变量条件概率密度与条件分布函数

定义 17.2.3 (二维随机变量条件概率密度). 设 (X, Y) 为连续型随机变量, 其概率密度为 $f(x, y)$, 边缘密度函数分别为 $f_X(x)$ 和 $f_Y(y)$, 若 $f_Y(y) > 0$, 则称

$$f_{X|Y}(x | y) = \frac{f(x, y)}{f_Y(y)}$$

为在 $Y = y$ 的条件下 X 的条件概率密度. 同样, 若 $f_X(x) > 0$, 则称

$$f_{Y|X}(y | x) = \frac{f(x, y)}{f_X(x)}$$

为在 $X = x$ 条件下 Y 的条件概率密度.

例 17.2.2. 设二维正态随机变量 (X, Y) 的概率密度为 $f(x, y)$, 已知条件概率密度

$$f_{X|Y}(x | y) = Ae^{-\frac{2}{3}(x-\frac{y}{2})^2}, f_{Y|X}(y | x) = Be^{-\frac{2}{3}(y-\frac{x}{2})^2}$$

试求: (1) 常数 A, B ; (2) $f_X(x), f_Y(y)$; (3) $f(x, y)$.

$$(1) \text{ 令 } Ae^{-\frac{2}{3}(x-\frac{y}{2})^2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \Rightarrow \begin{cases} A = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \\ \frac{2}{3}(x-\frac{y}{2})^2 = \frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = \frac{2}{\sqrt{6\pi}} \\ \mu = \frac{y}{3} \end{cases} \quad \text{由对称性知 } B = A = \frac{2}{\sqrt{6\pi}}.$$

$$(2) \text{ 易得 } \frac{f_X(x)}{f_Y(y)} = \frac{f_{X|Y}(x | y)}{f_{Y|X}(y | x)} = e^{-\frac{2}{3}[(x-\frac{y}{2})^2 - (y-\frac{x}{2})^2]} = e^{-\frac{1}{2}(x^2+y^2)} = \frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{e^{-\frac{y^2}{2}}}, \text{ 故}$$

$$f_X(x) = Ce^{-\frac{x^2}{2}}, f_Y(y) = Ce^{-\frac{y^2}{2}}$$

由于标准差为 1, 则根据正态分布的概率密度知 $C = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}$, 因此 $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{x^2}{2}}$, $f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{y^2}{2}}$.

$$(3) f(x, y) = f_{X|Y}(x | y)f_Y(y) = \frac{2}{\sqrt{6\pi}} e^{-\frac{2}{3}(x-\frac{y}{2})^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} = \frac{1}{\sqrt{3\pi}} e^{-\frac{2}{3}(x^2 - xy + y^2)}.$$

定义 17.2.4 (二维随机变量条件分布函数 A). 如果任给 $\varepsilon > 0$, $P\{y - \varepsilon < Y \leq y + \varepsilon\} > 0$,

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} P\{X \leq x | y - \varepsilon < Y \leq y + \varepsilon\} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{P\{X \leq x, y - \varepsilon < Y \leq y + \varepsilon\}}{P\{y - \varepsilon < Y \leq y + \varepsilon\}}$$

存在, 则称此极限为在条件 $Y = y$ 下随机变量 X 的条件分布函数, 记为 $P\{X \leq x | Y = y\}$ 或 $F_{X|Y}(x | y)$.

$$F_{X|Y}(x | y) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{F(x, y + \varepsilon) - F(x, y - \varepsilon)}{F_Y(y + \varepsilon) - F_Y(y - \varepsilon)} = \frac{\int_{-\infty}^x \int_{y-\varepsilon}^{y+\varepsilon} f(x, y) dx dy}{\int_{y-\varepsilon}^{y+\varepsilon} f_Y(y) dx}$$

定义 17.2.5 (二维随机变量条件分布函数 B). 设 $f(x, y)$ 在点 (x, y) 处连续, $f_Y(y)$ 连续且 $f_Y(y) > 0$, 则称

$$F_{X|Y}(x | y) = \int_{-\infty}^x \frac{f(x, y)}{f_Y(y)} dx$$

为在 $Y = y$ 的条件下 X 的条件分布函数. 若 $f(x, y)$ 在点 (x, y) 处连续, $f_X(x)$ 连续且 $f_X(x) > 0$, 则称

$$F_{Y|X}(y | x) = \int_{-\infty}^y \frac{f(x, y)}{f_X(x)} dy$$

为在 $X = x$ 的条件下 Y 的条件分布函数.

17.2.4 二维正态分布

定义 17.2.6 (二维正态分布). 若二维连续型随机变量 (X, Y) 的概率密度为

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\rho \frac{(x-\mu_1)(y-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right]}$$

则称 (X, Y) 服从参数为 $\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \rho$ 的二维正态分布, 记

$$(X, Y) \sim N(\mu_1, \mu_2; \sigma_1^2, \sigma_2^2; \rho)$$

其中 $\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \rho$ 均为常数, 且 $\sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0, |\rho| < 1$.

定理 17.2.2 (二维正态分布推出一维正态分布). 若 $(X, Y) \sim N(\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \rho)$, 则

$$X \sim N(\mu_1, \sigma_1^2), Y \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$$

反之不对, 即 X 与 Y 均服从一维正态, 不能保证 (X, Y) 一定服从二维正态分布.

定理 17.2.3 (独立一维正态分布推出二维正态分布). 若 $X \sim N(\mu_1, \sigma_1^2), Y \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$, 且相互独立, 则 (X, Y) 一定服从二维正态分布

$$(X, Y) \sim N(\mu_1, \mu_2; \sigma_1^2, \sigma_2^2; \rho).$$

定理 17.2.4. 若 $\begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \neq 0$, 则 $(aX + bY, cX + dY)$ 服从二维正态分布, 明显 $aX + bY$ 服从一维正态分布

$$aX + bY \sim N(a\mu_1 + b\mu_2, a^2\sigma_1^2 + b^2\sigma_2^2 + 2ab\rho\sigma_1\sigma_2).$$

定理 17.2.5. X 和 Y 相互独立的充要条件是 $\rho = 0$.

定理 17.2.6 (二维正态分布的条件分布). 设二维随机变量 (X, Y) 服从 $N(\mu_1, \mu_2; \sigma_1^2, \sigma_2^2; \rho)$, 则 X 在 $Y = y$ 条件下的条件分布为正态分布, 即

$$X \sim N\left(\mu_1 + \frac{\rho\sigma_1(y - \mu_2)}{\sigma_2}, \sigma_1^2(1 - \rho^2)\right)$$

同理, Y 在 $X = x$ 条件下的条件分布为正态分布, 即

$$Y \sim N\left(\mu_2 + \frac{\rho\sigma_2(x - \mu_1)}{\sigma_1}, \sigma_2^2(1 - \rho^2)\right).$$

例 17.2.3. 设二维随机变量 (X, Y) 的概率密度为 $f(x, y) = Ae^{-2x^2-y^2}$, $-\infty < x, y < +\infty$,

(1) 求常数 A ;

(2) 求条件概率密度 $f_{Y|X}(y | x)$.

(1) 法一: 因为二维正态分布的概率密度为

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2}-2\rho\frac{(x-\mu_1)(y-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2}+\frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right]}$$

对比本题所给密度得 $(X, Y) \sim N\left(0, 0; \frac{1}{4}, \frac{1}{2}; 0\right)$, 因此 $A = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{\frac{1}{4}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2}}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi}$.

法二: 因为 $\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dx dy = 1$, $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-t^2} dt = \sqrt{\pi}$, 所以

$$\begin{aligned} 1 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dx dy = A \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2x^2} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y^2} dy \right) dx = A\sqrt{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2x^2} dx \\ &\stackrel{t=\sqrt{2}x}{=} A\sqrt{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-t^2} dt = A\sqrt{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\pi} \Rightarrow A = \frac{\sqrt{2}}{\pi}. \end{aligned}$$

(2) 因为 $\rho = 0$, 所以 X 与 Y 相互独立, 所以 $X \sim N\left(0, \frac{1}{4}\right)$, $Y \sim N\left(0, \frac{1}{2}\right)$, $f(x, y) = f_X(x)f_Y(y)$, 并且

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \frac{1}{2}} e^{-\frac{x^2}{2}} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} e^{-2x^2}, f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}} e^{-y^2} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-y^2}$$

$$\text{所以 } f_{Y|X}(y | x) = \frac{f(x, y)}{f_X(x)} = f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-y^2}, -\infty < y < +\infty.$$

17.2.5 卷积公式

当 $Z = h(X, Y)$, 其中一个随机变量服从均匀分布时, 使用卷积公式将大大简化计算过程.

例 17.2.4. 设随机变量 X 和 Y 相互独立, $X \sim N(0, 1)$, $Y \sim U[0, 1]$, $Z = X + Y$, 求 Z 的概率密度函数 $f_Z(z)$.

法一: 由 $X \sim N(0, 1)$ 知, $f_X(x) = \varphi(x)$, 由 $Y \sim U[0, 1]$ 知, $f_Y(y) = \begin{cases} 1, & 0 \leq y \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$, 又因为 X 与 Y 相互独立, 则

$$f(x, y) = f_X(x)f_Y(y) = \begin{cases} \varphi(x), & -\infty < x < +\infty, 0 \leq y \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

下求 $f_Z(z)$,

$$\begin{aligned} F_Z(z) &= P\{Z \leq z\} = P\{X + Y \leq z\} = \iint_{x+y \leq z} f(x, y) dx dy = \int_{-\infty}^{z-1} \varphi(x) dx \int_0^1 dy + \int_{z-1}^z \varphi(x) dx \int_0^{z-x} dy \\ &= \int_{-\infty}^{z-1} \varphi(x) dx + \int_{z-1}^z (z-x)\varphi(x) dx = \Phi(z-1) + \int_{z-1}^z (z-x)\varphi(x) dx \end{aligned}$$

$$\text{则 } f_Z(z) = \frac{dF_Z(z)}{dz} = \varphi(z-1) + \frac{d}{dz} \left[z \int_{z-1}^z \varphi(x) dx - \int_{z-1}^z x\varphi(x) dx \right] = \int_{z-1}^z \varphi(z) dz = \Phi(z) - \Phi(z-1).$$

法二: 由卷积公式

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, z-x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x)f_Y(z-x) dx = \int_{z-1}^z \varphi(x) dx = \Phi(z) - \Phi(z-1).$$

例 17.2.5. 设随机变量 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, $Y \sim U[-\pi, \pi]$, X, Y 相互独立, 令 $Z = X + Y$, 求 $f_Z(z)$.

法一: 因为 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, $Y \sim U[-\pi, \pi]$, 所以

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad f_Y(y) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & -\pi \leq y \leq \pi \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

并且 X, Y 相互独立, 那么

$$f(x, y) = f_X(x)f_Y(y) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, & -\infty < x < +\infty, -\pi \leq y \leq \pi \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

而 $F_Z(z) = P\{Z \leq z\} = P\{X + Y \leq z\} = \iint_{x+y \leq z} f(x, y) dx dy$, 因此

$$\begin{aligned} F_Z(z) &= \frac{1}{2\pi\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\pi}^{\pi} dy \int_{-\infty}^{z-y} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} dy \int_{-\infty}^{z-y} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} d\left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right) \\ &\stackrel{t=\frac{x-\mu}{\sigma}}{=} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} dy \int_{-\infty}^{\frac{z-y-\mu}{\sigma}} e^{-\frac{1}{2} t^2} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \Phi\left(\frac{z-y-\mu}{\sigma} \right) dy = -\frac{\sigma}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \Phi\left(\frac{z-y-\mu}{\sigma} \right) d\left(\frac{z-y-\mu}{\sigma} \right) \\ &\stackrel{u=\frac{z-y-\mu}{\sigma}}{=} \frac{\sigma}{2\pi} \int_{\frac{z-\pi-\mu}{\sigma}}^{\frac{z+\pi-\mu}{\sigma}} \Phi(u) du \end{aligned}$$

$$\text{因此 } f_Z(z) = F'_Z(z) = \frac{d}{dz} \left[\frac{\sigma}{2\pi} \int_{\frac{z-\pi-\mu}{\sigma}}^{\frac{z+\pi-\mu}{\sigma}} \Phi(u) du \right] = \frac{1}{2\pi} \left[\Phi\left(\frac{z+\pi-\mu}{\sigma} \right) - \Phi\left(\frac{z-\pi-\mu}{\sigma} \right) \right].$$

$$\text{法二: } f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) \cdot f_Y(z-x) dx = \int_{z-\pi}^{z+\pi} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{1}{2\pi} \left[\Phi\left(\frac{z+\pi-\mu}{\sigma} \right) - \Phi\left(\frac{z-\pi-\mu}{\sigma} \right) \right].$$

17.3 多维混合型随机变量

17.3.1 二维混合型随机变量的分布

定理 17.3.1 (二维混合型随机变量函数的分布). 设二维随机变量 (X, Y) , 其中离散型随机变量 X 的分布律为 $P\{X = x_i\} = p_i (i = 1, 2, \dots)$, Y 为连续型随机变量, 则 (X, Y) 的函数 $Z = g(X, Y)$ 分布函数

为

$$F_Z(z) = P\{Z \leq z\} = P\{g(X, Y) \leq z\} = \sum_{i=1}^{\infty} P\{X = x_i\} P\{g(X, Y) \leq z \mid X = x_i\}$$

例 17.3.1. 设随机变量 X, Y 相互独立, 且

$$P\{X = 0\} = P\{X = 1\} = \frac{1}{2}, \quad P\{Y \leq x\} = x, \quad 0 < x \leq 1$$

求 $Z = XY$ 的分布函数.

由题意可知 $Y \in (0, 1]$, 故 $Z = XY = [0, 1]$, 当 $z < 0$ 时, $F_Z(z) = 0$; 当 $z \geq 1$ 时, $F_Z(z) = 1$; 当 $0 \leq z < 1$ 时,

$$\begin{aligned} F_Z(z) &= P\{Z \leq z\} = P\{X = 0\}P\{Z \leq z \mid X = 0\} + P\{X = 1\}P\{Z \leq z \mid X = 1\} \\ &= \frac{1}{2}P\{XY \leq z \mid X = 0\} + \frac{1}{2}P\{XY \leq z \mid X = 1\} = \frac{1}{2}P\{0 \leq z\} + \frac{1}{2}P\{Y \leq z\} \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2}z = \frac{1}{2}(1+z) \end{aligned}$$

$$\text{因此 } F_Z(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ \frac{1}{2}(1+z), & 0 \leq z < 1 \\ 1, & z \geq 1. \end{cases}$$

例 17.3.2. 设随机变量 X 与 Y 相互独立, 且 X 的分布为 $\begin{array}{c|cc} X & -1 & 1 \\ \hline P & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{array}$, Y 服从 $N(0, 1)$ 分布, 记 $Z = XY$, 求 Z 的分布函数 $F_Z(z)$.

根据全概率公式,

$$\begin{aligned} F_Z(z) &= P\{Z \leq z\} = P\{XY \leq z\} = P\{X = -1\}P\{XY \leq z \mid X = -1\} + P\{X = 1\}P\{XY \leq z \mid X = 1\} \\ &= \frac{1}{2}P\{-Y \leq z \mid X = -1\} + \frac{1}{2}P\{Y \leq z \mid X = 1\} = \frac{1}{2}P\{Y \geq -z\} + \frac{1}{2}P\{Y \leq z\} \\ &= \frac{1}{2}[1 - P\{Y < -z\}] + \frac{1}{2}\Phi(z) = \frac{1}{2}[1 - \Phi(-z)] + \frac{1}{2}\Phi(z) \\ &= \frac{1}{2}[1 - 1 + \Phi(z)] + \frac{1}{2}\Phi(z) = \Phi(z) \end{aligned}$$

例 17.3.3 (2008 数一). 设随机变量 X 和 Y 相互独立, X 概率分布为 $P\{X = i\} = \frac{1}{3}$ ($i = -1, 0, 1$), Y

的概率密度为 $f_Z(z) = \begin{cases} 1, & 0 \leq y \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$, 记 $Z = X + Y$.

$$(1) \text{ 求 } P\left\{Z \leq \frac{1}{2} \mid X = 0\right\};$$

$$(2) \text{ 求 } Z \text{ 的概率密度 } f_Z(z).$$

$$(1) P\left\{Z \leq \frac{1}{2} \mid X = 0\right\} = P\left\{X + Y \leq \frac{1}{2} \mid X = 0\right\} = P\left\{Y \leq \frac{1}{2} \mid X = 0\right\} = P\left\{Y \leq \frac{1}{2}\right\} = \int_0^{\frac{1}{2}} f_Y(y) dy = \frac{1}{2}.$$

(2) 记 Z 的分布函数为 $F_Z(z)$ 则

$$\begin{aligned} F_Z(z) &= P\{Z \leq z\} = P\{X + Y \leq z\} = \sum_{i=-1}^1 P\{X = i, X + Y \leq z\} \\ &= \sum_{i=-1}^1 P\{X = i, Y \leq z - i\} = \sum_{i=-1}^1 P\{X = i\}P\{Y \leq z - i\} \\ &= \frac{1}{3}P\{Y \leq z + 1\} + \frac{1}{3}P\{Y \leq z\} + \frac{1}{3}P\{Y \leq z - 1\} \end{aligned}$$

(i) 当 $z < -1$ 时, $F_Z(z) = 0$;

$$(ii) \text{ 当 } -1 \leq z < 0 \text{ 时, } F_Z(z) = \frac{1}{3}P\{Y \leq z+1\} = \frac{z+1}{3};$$

$$(iii) \text{ 当 } 0 \leq z < 1 \text{ 时, } F_Z(z) = \frac{1}{3}P\{Y \leq z+1\} + \frac{1}{3}P\{Y \leq z\} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3}z = \frac{z+1}{3};$$

$$(iv) \text{ 当 } 1 \leq z < 2 \text{ 时, } F_Z(z) = \frac{1}{3}P\{Y \leq z+1\} + \frac{1}{3}P\{Y \leq z\} + \frac{1}{3}P\{Y \leq z+1\} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{z-1}{3} = \frac{z+1}{3};$$

(v) 当 $z \geq 2$ 时, $F_Z(z) = 1$.

$$\text{于是 } F_Z(z) = \begin{cases} 0, & z < -1 \\ \frac{z+1}{3}, & -1 \leq z < 2 \\ 1, & z \geq 2 \end{cases}, \text{ 那么 } f_Z(z) = F'_Z(z) = \begin{cases} \frac{1}{3}, & -1 \leq z < 2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

17.3.2 随机变量与函数性质

例 17.3.4 (2009 数一). 设随机变量 X 与 Y 相互独立, 且 X 服从标准正态分布 $N(0, 1)$, Y 的概率分布为 $P\{Y = 0\} = P\{Y = 1\} = \frac{1}{2}$, 记 $F_Z(z)$ 为随机变量 $Z = XY$ 的分布函数, 则函数 $F_Z(z)$ 的间断点个数为

A. 0

B. 1

C. 2

D. 3

由于 x, y 相互独立, 因此

$$\begin{aligned} F_Z(z) &= P\{xy \leq z\} = P\{xy \leq z \mid y = 0\}P\{y = 0\} + P\{xy \leq z \mid y = 1\}P\{y = 1\} \\ &= \frac{1}{2}[P\{xy \leq z \mid y = 0\} + P\{xy \leq z \mid y = 1\}] = \frac{1}{2}[P\{x \cdot 0 \leq z\} + P\{x \leq z\}] \end{aligned}$$

若 $z < 0$, 则 $F_Z(z) = \frac{1}{2}\Phi(z)$; 若 $z \geq 0$, 则 $F_Z(z) = \frac{1}{2}[1 + \Phi(z)]$, 所以 $z = 0$ 为间断点, 故有一个间断点, 因此选 B.

第 18 章

随机变量的数字特征

18.1 数学期望与方差

18.1.1 数学期望

定义 18.1.1 (离散型随机变量的数学期望). 设离散型随机变量 X 的分布律为

$$P\{X = x_k\} = p_k (k = 1, 2, \dots)$$

若级数 $\sum_{k=1}^{\infty} x_k p_k$ 绝对收敛, 则称级数 $\sum_{k=1}^{\infty} x_k p_k$ 的和为随机变量 X 的数学期望, 记为 $E(X)$, 即

$$E(X) = \sum_{k=1}^{\infty} x_k p_k.$$

不是所有的随机变量都有数学期望, 数学期望是反映随机变量 X 取可能值的平均值.

定义 18.1.2 (连续型随机变量的数学期望). 设连续型随机变量 X 的概率密度为 $f(x)$, 若积分

$$\int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx$$

绝对收敛, 则称积分 $\int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx$ 的值为随机变量 X 的数学期望, 记为 $E(X)$, 即

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx.$$

例 18.1.1. 设随机变量 X 的概率密度函数 $f(x) = \begin{cases} x, & a < x < b \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ ($a > 0$), 其中 a, b 为待定常数, 且 $E(X^2) = 2$, 求 $P\{|X| < \sqrt{2}\}$.

因为 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$, 得 $\int_a^b xdx = 1 \Rightarrow b^2 - a^2 = 2$, 又因为 $E(X^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x)dx = \int_a^b x^3 dx \Rightarrow b^4 - a^4 = 8$, 又因为 $0 < a < b$ 解得 $a = 1, b = \sqrt{3}$, 则

$$P\{|X| < \sqrt{2}\} = P\{-\sqrt{2} < X < \sqrt{2}\} = F(\sqrt{2}) - F(-\sqrt{2}) = \int_{-\sqrt{2}}^{\sqrt{2}} f(x)dx = \int_1^{\sqrt{2}} xdx = \frac{1}{2}x^2 \Big|_1^{\sqrt{2}} = \frac{1}{2}.$$

定理 18.1.1 (常数的数学期望). 设 C 是常数, 则有 $E(C) = C$.

定理 18.1.2. 设 X 是一个随机变量, C 是常数, 则有 $E(CX) = CE(X)$.

定理 18.1.3. 设 X, Y 是两个随机变量, 则有 $E(X + Y) = E(X) + E(Y)$.

定理 18.1.4. 设 X, Y 是相互独立的随机变量, 则有 $E(XY) = E(X)E(Y)$.

定义 18.1.3 (一维随机变量函数的数学期望). (1) 离散型随机变量

设 Y 是随机变量 X 的函数: $Y = g(X)$ (g 连续), 若 X 是离散型随机变量, 其分布律为

$$P\{X = x_k\} = p_k, k = 1, 2, \dots$$

且级数 $\sum_{k=1}^{\infty} g(x_k)p_k$ 绝对收敛, 则

$$E(Y) = E[g(X)] = \sum_{k=1}^{\infty} g(x_k)p_k.$$

(2) 连续型随机变量

设 Y 是随机变量 X 的函数: $Y = g(X)$ (g 连续), 若 X 是连续型随机变量, 其概率密度为 $f(x)$, 且反常积分 $\int_{-\infty}^{+\infty} g(x)f(x)dx$ 绝对收敛, 则

$$E(Y) = E[g(X)] = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x)f(x)dx.$$

例 18.1.2. 设随机变量 X 的分布函数为 $F(x) = 0.3\Phi(x) + 0.7\Phi\left(\frac{x-1}{2}\right)$, 其中 $\Phi(x)$ 为标准正态分布的分布函数, 求 $E(X)$.

对 $F(x)$ 求导, 得 $f(x) = 0.3\varphi(x) + 0.35\varphi\left(\frac{x-1}{2}\right)$, 因此

$$\begin{aligned} E(X) &= \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx = \int_{-\infty}^{+\infty} x \left[0.3\varphi(x) + 0.35\varphi\left(\frac{x-1}{2}\right) \right] dx = 0.3 \int_{-\infty}^{+\infty} x\varphi(x)dx + 0.35 \int_{-\infty}^{+\infty} x\varphi\left(\frac{x-1}{2}\right)dx \\ &= 0.3 \cdot 0 + 0.7 \int_{-\infty}^{+\infty} (2t+1)\varphi(t)dt = 1.4 \int_{-\infty}^{+\infty} t\varphi(t)dt + 0.7 \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t)dt = 0.7 \end{aligned}$$

例 18.1.3 (2019 数一). 在区间 $(0, 2)$ 上随机取一点, 将该区间分成两段, 较短一段的长度为 X , 较长一段的长度为 Y , 令 $Z = \frac{Y}{X}$

(1) 求 X 的概率密度;

(2) 求 Z 的概率密度;

(3) 求 $E\left(\frac{X}{Y}\right)$.

$$(1) \text{ 因为 } F_X(x) = P\{X \leq x\} = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ x, & 0 < x < 1 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases} \text{ 故 } f_X(x) = \begin{cases} 1, & 0 < x < 1 \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

$$(2) Z = \frac{Y}{X} = \frac{2-X}{X} = \frac{2}{X} - 1, \text{ 则 } F_Z(z) = P\{Z \leq z\} = P\left\{\frac{2}{X} - 1 \leq z\right\}, \text{ 当 } z < 1 \text{ 时 } F_Z(z) = 0; \text{ 当 } z \geq 1 \text{ 时,}$$

$$F_Z(z) = P\left\{\frac{2}{X} - 1 \leq z\right\} \Rightarrow P\left\{X \geq \frac{2}{z+1}\right\} = \int_{\frac{2}{z+1}}^1 1 dx = \frac{z-1}{z+1}$$

$$\text{于是 } F_Z(z) = \begin{cases} 0, & z < 1 \\ \frac{z-1}{z+1}, & z \geq 1 \end{cases} \Rightarrow f_Z(z) = F'_Z(z) = \begin{cases} 0, & z \leq 1 \\ \frac{2}{(z+1)^2}, & z > 1. \end{cases}$$

$$(3) E\left(\frac{X}{Y}\right) = E\left(\frac{X}{2-X}\right) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x}{2-x} \cdot 1 dx = \int_0^1 \frac{x}{2-x} dx = -\int_0^1 \left(1 + \frac{2}{x-2}\right) dx = 2 \ln 2 - 1.$$

定理 18.1.5 (最值表达式). $\max\{a, b\} = \frac{a+b+|a-b|}{2}$, $\min\{a, b\} = \frac{a+b-|a-b|}{2}$.

例 18.1.4. 设 X 与 Y 独立, 且 $E(X)$ 和 $E(Y)$ 存在, 记 $U = \max\{X, Y\}$, $V = \min\{X, Y\}$, 则 $E(UV)$

- A. $E(U) \cdot E(V)$ B. $E(X) \cdot E(Y)$ C. $E(U) \cdot E(Y)$ D. $E(X) \cdot E(V)$

当 $X \geq Y$ 时, $U = X$, $V = Y$, $E(UV) = E(X) \cdot E(Y)$; 当 $X < Y$ 时, $U = Y$, $V = X$, $E(UV) = E(X) \cdot E(Y)$, 因此无论何种情况, 恒有 $E(UV) = E(X) \cdot E(Y)$, 故选 B.

例 18.1.5. 设随机变量 X 与 Y 独立同分布, 已知 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 求 $Z = \min\{X, Y\}$ 的数学期望.

因为 $\min\{X, Y\} = \frac{X+Y-|X-Y|}{2}$, 所以 $E(Z) = E\left(\frac{X+Y-|X-Y|}{2}\right)$, $E(X) = E(Y) = \mu$,

$$E(|X-Y|) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|t|}{\sqrt{2\pi}\sqrt{2\sigma}} e^{-\frac{t^2}{4\sigma^2}} dt = 2 \int_0^{+\infty} \frac{t}{2\sigma\sqrt{\pi}} e^{-\frac{t^2}{4\sigma^2}} dt = \frac{2\sigma}{\sqrt{\pi}} \int_0^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{4\sigma^2}} d\left(\frac{t^2}{4\sigma^2}\right) = -\frac{2\sigma}{\sqrt{\pi}} e^{-u} \Big|_0^{+\infty} = \frac{2\sigma}{\sqrt{\pi}}$$

$$\text{因此 } E(Z) = \mu - \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}}.$$

18.1.2 方差

定义 18.1.4 (方差). 设 X 是一个随机变量, 若 $E\{[X - E(X)]^2\}$ 存在, 则称其为随机变量 X 的方差, 记为 $D(X)$, 即

$$D(X) = E\{[X - E(X)]^2\}$$

称 $\sqrt{D(X)}$ 为 X 的均方差或标准差, 记为 $\sigma(X)$, 即 $\sigma(X) = \sqrt{D(X)}$.

(1) 离散型随机变量

设离散型随机变量 X , 其分布律为 $P\{X = x_k\} = p_k, k = 1, 2, \dots$, 则方差计算公式为

$$D(X) = \sum_{k=1}^{\infty} [x_k - E(X)]^2 p_k.$$

(2) 连续型随机变量

设连续型随机变量 X , 其概率密度为 $f(x)$, 则方差计算公式为

$$D(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - E(X)]^2 f(x) dx.$$

定理 18.1.6 (方差与期望的联系). $D(X) = E(X^2) - [E(X)]^2$.

定理 18.1.7 (二维均匀分布的随机变量的概率密度). 若 (X, Y) 在平面有界区域 D 上服从均匀分布, 则 (X, Y) 的概率密度为:

$$f(x, y) = \begin{cases} S_D^{-1}, & (x, y) \in D \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

例 18.1.6. 设 (X, Y) 在区域 $D : 0 < x < 1, |y| \leq x$ 内服从均匀分布,

(1) 求随机变量 X 的边缘密度函数;

(2) 设 $Z = 2X + 1$, 求 $D(Z)$.

(1) 区域 D 的面积为 $S_D = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 2 = 1$, 则 $f(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in D \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \Rightarrow f_X(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dy = \begin{cases} 2x, & 0 < x < 1 \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$

(2) 由方程与期望的关系,

$$\begin{aligned} D(X) &= E(X^2) - E^2(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f_X(x) dx - \left(\int_{-\infty}^{+\infty} x f_X(x) dx \right)^2 \\ &= \int_0^1 2x^3 dx - \left(\int_0^1 2x^2 dx \right)^2 = \frac{1}{2} - \frac{4}{9} = \frac{1}{18} \end{aligned}$$

$$\text{所以 } D(Z) = D(2X + 1) = 4D(X) = \frac{4}{18} = \frac{2}{9}.$$

定理 18.1.8. 若 X_1, X_2, \dots, X_n 互相独立, 且 $X_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$, 则

$$\sum_{i=1}^n a_i X_i \sim N\left(\sum_{i=1}^n a_i \mu_i, \sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_i^2\right).$$

例 18.1.7 (1998 数一). 设两个随机变量相互独立, 且都服从均值为 0, 方差为 $\frac{1}{2}$ 的正态分布, 求随机变量 $|X - Y|$ 的方差.

令 $Z = X - Y$, 由于 $X \sim N\left(0, \frac{1}{2}\right)$, $Y \sim N\left(0, \frac{1}{2}\right)$, 于是 $Z \sim N\left(0, \frac{1}{2} + (-1)^2 \frac{1}{2}\right) = N(0, 1)$, 于是

$$D(|X - Y|) = D(|Z|) = E(Z^2) - E^2(|Z|) = 1 - \left(\int_{-\infty}^{+\infty} |z| \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \right)^2 = 1 - \frac{2}{\pi}$$

其中, 由于 Z 服从标准正态分布则方差为 1, 数学期望为 0, 则 $E(Z^2) = D(Z) + E^2(Z) = 1 + 0 = 1$.

例 18.1.8. 设随机变量 $X \sim N(0, 1)$, 在 $X = x$ 条件下, 随机变量 $Y \sim N(x, 1)$, 求 Y 的方差 $D(Y)$.

$X \sim N(0, 1)$, $f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$, $-\infty < x < +\infty$, 当 $X = x$ 时, $f_{Y|X}(y | x) \sim N(x, 1)$, 即当 $-\infty < x < +\infty$ 时,

$$f_{Y|X}(y | x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-x)^2}{2}}, \quad -\infty < y < +\infty$$

那么

$$(X, Y) \sim f(x, y) = f_X(x)f_{Y|X}(y|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(y-x)^2}{2}} \Rightarrow f(x, y) = \frac{1}{2\pi}e^{-\frac{1}{2}(2x^2 - 2xy + y^2)}, -\infty < x, y < +\infty$$

已知二维正态 $(X, Y) \sim N(\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \rho)$ 的密度为

$$f_1(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho(x-\mu_1)(y-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right]\right\} - \infty < x, y < +\infty.$$

对比 f 与 f_1 则有

$$\begin{cases} \frac{1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \\ -\frac{1}{2} \cdot 2x^2 = -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \cdot \frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1 = \frac{1}{\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \\ 1 = \frac{1}{2(1-\rho^2)} \end{cases}$$

解得 $\sigma_2 = \sqrt{2}$, $D(Y) = \sigma_2^2 = 2$

利用第二型 Euler 积分

有关第二型 Euler 积分的相关知识可参考 3.4.1 节.

例 18.1.9. 设 X 与 Y 相互独立, 且 $X \sim N(0, \sigma^2)$, $Y \sim N(0, \sigma^2)$, 令 $Z = \sqrt{X^2 + Y^2}$, 求 $E(Z)$, $D(Z)$.

因为 $X \sim N(0, \sigma^2)$, $Y \sim N(0, \sigma^2)$, 且 X 与 Y 相互独立, 所以

$$f(x, y) = f_X(x)f_Y(y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x^2+y^2)}$$

因此

$$\begin{aligned} E(Z) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{x^2 + y^2} f(x, y) dx dy = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{x^2 + y^2} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x^2+y^2)} dx dy \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{+\infty} r^2 e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} dr = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{+\infty} \frac{1}{\pi} \left(\frac{r}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2 e^{-\left(\frac{r}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} dr \\ &= \frac{\sqrt{2}\sigma}{2\pi} \cdot 2 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{+\infty} \left(\frac{r}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2 e^{-\left(\frac{r}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} d\left(\frac{r}{\sqrt{2}\sigma}\right) \\ &= \frac{\sqrt{2}\sigma}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) d\theta = \frac{\sqrt{2}\sigma}{2\pi} \cdot \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) d\theta \\ &= \frac{\sqrt{2}\sigma}{2\pi} \cdot \frac{1}{2} \cdot 2\pi \cdot \sqrt{\pi} = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma \end{aligned}$$

因此 $D(Z) = E(Z^2) - E^2(Z) = E(X^2 + Y^2) - \frac{\pi}{2}\sigma^2 = 2\sigma^2 - \frac{\pi}{2}\sigma^2 = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\sigma^2$.

18.2 协方差与相关系数

18.2.1 随机变量的独立性与相关性

定义 18.2.1 (随机变量的相关性定义). 若随机变量 X 和 Y 的相关系数 $\rho_{XY} = 0$ 则称 X 和 Y 不相关, 否则称 X 和 Y 相关.

定理 18.2.1 (独立性与相关性的判定). 随机变量 X 和 Y 不相关, 即 $\rho_{XY} = 0 \Leftrightarrow \text{cov}(X, Y) = 0 \Leftrightarrow E(XY) = E(X)E(Y) \Leftrightarrow D(X \pm Y) = D(X) \pm D(Y) \Leftrightarrow X$ 与 Y 相互独立.

特别地, 当 $(X, Y) \sim N(\mu_1, \mu_2; \sigma_1^2, \sigma_2^2; \rho)$ 时, X 和 Y 不相关 $\Leftrightarrow X$ 和 Y 相互独立;

当随机变量 X 和 Y 都服从 $(0,1)$ 分布, 则 X 和 Y 不相关 $\Leftrightarrow X$ 和 Y 相互独立.

18.2.2 协方差

定理 18.2.2 (协方差的性质). (1) $\text{cov}(X, Y) = \text{cov}(Y, X)$, $\text{cov}(X, X) = D(X)$;

(2) $\text{cov}(aX, bY) = ab\text{cov}(X, Y)$, a, b 是常数, $\text{cov}(X, a) = 0$;

(3) $\text{cov}(X_1 + X_2, Y) = \text{cov}(X_1, Y) + \text{cov}(X_2, Y)$;

(4) 若 X, Y 相互独立, 则 $\text{cov}(X, Y) = 0$, 反之不对.

(5) $\text{cov}(X, Y) = E(XY) - E(X)E(Y)$.

例 18.2.1 (2002 数三). 设随机变量 X 和 Y 的联合概率分布为表 18.1, 求协方差 $\text{cov}(X^2, Y^2)$.

表 18.1

$X \setminus Y$		-1	0	1
		0	0.07	0.18
1	0.08	0.32	0.20	

X, Y 的分布律分别为 $\frac{X}{P} \begin{array}{cc} 0 & 1 \\ 0.4 & 0.6 \end{array}$, $\frac{Y}{P} \begin{array}{ccc} -1 & 0 & 1 \\ 0.15 & 0.5 & 0.35 \end{array}$, 那么
 $E(X^2) = 0.6$, $E(Y^2) = 0.5$, $E(X^2Y^2) = \sum_i \sum_j x_i^2 y_j^2 p_{ij} = 0.08 + 0.20 = 0.28$

所以 $\text{cov}(X^2, Y^2) = E(X^2Y^2) - E(X^2)E(Y^2) = 0.28 - 0.3 = -0.02$.

例 18.2.2. 设随机变量 (X, Y) 的概率分布为表 18.2 求

(1) $P\{X = 2Y\}$; (2) $\text{cov}(X - Y, Y)$.

表 18.2

$X \setminus Y$		0	1	2
		0	$\frac{1}{4}$	0
1	0	$\frac{1}{3}$	0	
2	$\frac{1}{12}$	0	$\frac{1}{12}$	

(1) $P\{X = 2Y\} = P\{X = 0, Y = 0\} + P\{X = 2, Y = 1\} = \frac{1}{4}$.

(2) X, Y 的分布律分别为 $\frac{X}{P} \begin{array}{ccc} 0 & 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \end{array}$, $\frac{Y}{P} \begin{array}{ccc} 0 & 1 & 2 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{array}$, 那么

$\text{cov}(X - Y, Y) = \text{cov}(X, Y) - \text{cov}(Y, Y) = E(XY) - E(X)E(Y) - D(Y)$
 $= E(XY) - E(X)E(Y) - E(Y^2) + E^2(Y)$

其中 $E(XY) = \sum_i \sum_j x_i y_j p_{ij} = 1 \cdot \frac{1}{3} + 2 \cdot \frac{2}{12} = \frac{2}{3}$, $E(X) = \frac{1}{3} + \frac{2}{6} = \frac{2}{3}$, $E(Y) = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} = 1$, $E(Y^2) = \frac{1}{3} + \frac{4}{3} = \frac{5}{3}$, 代入算得 $\text{cov}(X - Y, Y) = -\frac{2}{3}$.

定理 18.2.3 (协方差与方差). $D(X \pm Y) = D(X) + D(Y) \pm 2\text{cov}(X, Y)$.

例 18.2.3 (2011 数一). 设随机变量 X 与 Y 的概率分布分别为 $\frac{X}{P} \begin{array}{cc} 0 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{array}$, $\frac{Y}{P} \begin{array}{ccc} -1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{array}$, 且

$P\{X^2 = Y^2\} = 1$.

(1) 二维随机变量 (X, Y) 的概率分布; (2) $Z = XY$ 的概率分布; (3) X 和 Y 的相关系数 ρ_{XY} .

		(1) 因为 $P\{X^2 = Y^2\} = 1$, 所以 $P\{X^2 \neq Y^2\} = 1 - 1 = 0$, 于是有
		$\begin{cases} a_{11} = P\{X = 0, Y = -1\} = 0 \Rightarrow a_{21} = \frac{1}{3} \\ a_{22} = P\{X = 1, Y = 0\} = 0 \Rightarrow a_{12} = \frac{1}{3} \Rightarrow a_{13} = 0 \Rightarrow a_{23} = \frac{1}{3} \end{cases}$
		(2) $Z = XY$ 的可能取值为 $-1, 0, 1$, 且 $P\{Z = 1\} = P\{X = 1, Y = 1\} = \frac{1}{3}$,
		$P\{Z = 0\} = P\{X = 0, Y = *\} + P\{X = *, Y = 0\} = \frac{1}{3}$
		同理 $P\{Z = -1\} = \frac{1}{3}$, 于是 Z 的概率分布为 $\frac{Z}{P} \mid \begin{array}{ccc} -1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{array}$.
		(3) 易求得 $\text{cov}(X, Y) = 0$, 于是 $\rho_{XY} = 0$. $\frac{Y}{P} \mid \begin{array}{ccc} -1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{array}$

18.2.3 相关系数

定义 18.2.2 (相关系数). 对于随机变量 X, Y , $D(X) > 0, D(Y) > 0$, 则称 $\frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}}$ 为随机变量 X 和 Y 的相关系数, 记作 ρ_{XY} .

定理 18.2.4 (相关系数的性质). (1) $|\rho_{XY}| \leq 1$;

(2) $|\rho_{XY}| = 1 \Leftrightarrow$ 存在 a, b 使得 $PY = aX + b = 1$, 其中 $a > 0$ 时, $\rho_{XY} = 1$ (正线性相关); $a < 0$ 时, $\rho_{XY} = -1$ (负线性相关).

例 18.2.4. 设随机变量 X 和 Y 的联合概率分布为表 18.3, 求 X 和 Y 的相关系数 ρ .

表 18.3

X, Y 的分布律分别为 $\frac{X}{P} \mid \begin{array}{cc} 0 & 1 \\ 0.4 & 0.6 \end{array}$, $\frac{Y}{P} \mid \begin{array}{ccc} -1 & 0 & 1 \\ 0.15 & 0.5 & 0.35 \end{array}$, 那么

$$E(X) = 0.6, E(Y) = 0.2, E(XY) = \sum_i \sum_j x_i y_j p_{ij} = -0.08 + 0.20 = 0.12$$

$$\text{所以 } \text{cov}(X, Y) = E(XY) - E(X)E(Y) = 0, \text{ 所以 } \rho_{XY} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}} = 0.$$

例 18.2.5 (1994 数一). 已知随机变量 X 和 Y 分布服从正态分布 $N(1, 3^2)$ 和 $N(0, 4^2)$, 且 X 与 Y 的相关系数 $\rho_{XY} = -\frac{1}{2}$, 设 $Z = \frac{X}{3} + \frac{Y}{2}$.

(1) 求 Z 的数学期望 $E(Z)$ 和方差 $D(Z)$; (2) 求 X 和 Z 的相关系数 ρ_{XZ} .

$$(1) E(Z) = \frac{1}{3}E(X) + \frac{1}{2}E(Y) = \frac{1}{3} + 0 = \frac{1}{3},$$

$$D(Z) = \frac{1}{9}D(X) + \frac{1}{4}D(Y) + 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \text{cov}(X, Y) = \frac{1}{9}D(X) + \frac{1}{4}D(Y) + 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \rho_{XY} \sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)} = 3.$$

(2) 由协方差的性质,

$$\text{cov}(X, Z) = \text{cov}\left(X, \frac{1}{3}X + \frac{1}{2}Y\right) = \frac{1}{3}\text{cov}(X, X) + \frac{1}{2}\text{cov}(X, Y) = \frac{1}{3}D(X) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{XY} \sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)} = 0$$

所以 $\rho_{XZ} = 0$.

例 18.2.6 (2000 数一). 设二维随机变量 (X, Y) 服从二维正态分布, 则随机变量 $\xi = X+Y$ 与 $\eta = X-Y$ 不相关的充分必要条件为

- A. $E(X) = E(Y)$
 B. $E(X^2) - E^2(X) = E(Y^2) - E^2(Y)$
 C. $E(X^2) = E(Y^2)$
 D. $E(X^2) + E^2(X) = E(Y^2) + E^2(Y)$

因为不相关, 所以 $\rho_{\xi\eta} = 0 \Rightarrow \text{cov}(\xi, \eta) = 0$, 于是

$$\text{cov}(\xi, \eta) = E(\xi\eta) - E(\xi)E(\eta) = E(X^2 - Y^2) - E(X + Y)E(X - Y) = E(X^2 - Y^2) - E^2(X) + E^2(Y) = 0$$

即 $E(X^2) - E^2(X) = E(Y^2) - E^2(Y)$, 故选 B.

定理 18.2.5. 当 $Y = aX + b$ 时, $\rho_{XY} = \text{sgn}(a)$.

例 18.2.7. 设随机变量 $X \sim N(0, 1)$, $Y \sim N(1, 4)$, 且相关系数 $\rho_{XY} = 1$, 则

- A. $P\{Y = -2X - 1\} = 1$
 B. $P\{Y = 2X - 1\} = 1$
 C. $P\{Y = -2X + 1\} = 1$
 D. $P\{Y = 2X + 1\} = 1$

用排除法, 设 $Y = aX + b$, 由 $\rho_{XY} = 1 \Rightarrow a > 0$, 排除 A、C, 由 $E(X) = 0$, $E(Y) = 1$, 且

$$E(Y) = E(aX + b) = aE(X) + b \Rightarrow b = 1$$

排除 B, 故选 D.

例 18.2.8. 设二维随机变量 (X, Y) 的概率密度为

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{2}{\pi}(1 - x^2 - y^2), & x^2 + y^2 \leqslant 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

(1) X 与 Y 是否相互独立, 说明理由;

(2) 求 ρ_{XY} ;

(3) 求 $Z = \sqrt{X^2 + Y^2}$ 的概率密度.

(1) 注意到 X 与 Y 轮换对此, 那么

$$\begin{aligned} f_X(x) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dy = \frac{2}{\pi} \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} (1 - x^2 - y^2) dy = \frac{4}{\pi} \int_0^{\sqrt{1-x^2}} [(1 - x^2) - y^2] dy \\ &= \frac{4}{\pi} \left[(1 - x^2)^{\frac{3}{2}} - \frac{1}{3} (1 - x^2)^{\frac{5}{2}} \right] = \frac{8}{3\pi} (1 - x^2)^{\frac{3}{2}}, |x| \leqslant 1 \end{aligned}$$

故

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{8}{3\pi} (1 - x^2)^{\frac{3}{2}}, & |x| \leqslant 1 \\ 0, & |x| > 1 \end{cases}$$

同理可求得

$$f_Y(y) = \begin{cases} \frac{8}{3\pi} (1 - y^2)^{\frac{3}{2}}, & |y| \leqslant 1 \\ 0, & |y| > 1 \end{cases}$$

由于 $f_X(x) \cdot f_Y(y) \neq f(x, y)$, 所以 X 与 Y 不相互独立.

(2) 由 $EX = \int_{-\infty}^{+\infty} xf_X dx = \int_{-1}^1 x \cdot \frac{8}{3\pi} (1 - x^2)^{\frac{3}{2}} dx = 0$, 且被积函数关于 x, y 均为奇函数,

$$E_{XY} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} xy f(x, y) dx dy = \iint_{x^2 + y^2 \leqslant 1} \frac{2}{\pi} xy (1 - x^2 - y^2) dx dy = 0$$

所以 $\text{cov}(X, Y) = EXY - EXEY = 0$, 从而可得 $\rho_{XY} = 0$.

(3) 当 $z < 0$ 时, $Z = \sqrt{X^2 + Y^2}$ 的分布函数为 $F_Z(z) = 0$. 当 $0 \leq z < 1$ 时,

$$F_z(z) = P\{\sqrt{X^2 + Y^2} \leq z\} = \iint_{x^2+y^2 \leq z^2} f(x, y) dx dy = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^z \frac{2}{\pi} (1 - r^2) r dr = 2z^2 - z^4$$

$$\text{当 } z \geq 1 \text{ 时, } F_Z(z) = 1, \text{ 故 } Z \text{ 的概率密度为 } f_Z(z) = F'_Z(z) = \begin{cases} 4z - 4z^3, & 0 < z < 1, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

第 19 章

大数定律与中心极限定理

“对于任意一个正数，不论它多大，总有一个足够大的整数，使得它的倒数小于这个正数。”

——切比雪夫

大数定律和中心极限定理是概率论中两个重要的定理，它们分别描述了随机变量序列的极限行为。

19.1 Chebyshev 不等式

方差可以描述随机变量的离散程度，方差越大，说明随机变量取值越分散，偏离其均值 $E(X)$ 越远。具体来讲，设 ε 为任意正数，事件 $|X - E(X)| \geq \varepsilon$ 发生的概率 $P\{|X - E(X)| \geq \varepsilon\}$ 应该与方差 $D(X)$ 关系密切， $D(X)$ 越大， $P\{|X - E(X)| \geq \varepsilon\}$ 应该越大，其关系就是下面著名的 Chebyshev 不等式。

定理 19.1.1 (Chebyshev 不等式). 设随机变量 X 的数学期望 $E(X)$ 和方差 $D(X)$ 均存在，则对于任意 $\varepsilon > 0$ ，不等式

$$P\{|X - E(X)| \geq \varepsilon\} \leq \frac{D(X)}{\varepsilon^2} \text{ 或 } P\{|X - \mu| < \varepsilon\} \geq 1 - \frac{D(X)}{\varepsilon^2}.$$

例 19.1.1. 设电站供电网有 10000 盏灯，夜晚每一盏灯开灯的概率都是 0.7，假定所有电灯开或关是彼此独立的，试用切比雪夫不等式估计夜晚同时开着的电灯数目在 6800 与 7200 之间的概率。

设 X 表示夜晚同时开着的电灯数目，它服从参数 $n = 10000, p = 0.7$ 的二项分布。于是有

$$\begin{aligned} E(X) &= np = 10000 \times 0.7 = 7000, \\ D(X) &= npq = 10000 \times 0.7 \times 0.3 = 2100, \\ P\{6800 < X < 7200\} &= P\{|X - 7000| < 200\} \geq 1 - \frac{2100}{200^2} \approx 0.95. \end{aligned}$$

计算结果表明，虽然有 10000 盏灯，但是电站只要有供应 7000 盏灯的电力就能够以相当大的概率保证电量够用。

19.2 大数定律

大数定律是概率论中的一个基本定理，描述了随机变量序列的均值在样本数量足够大的情况下会收敛于其数学期望的概率性现象。大数定律是概率论和统计学中的重要定理之一，对于理解随机现象的规律和稳定性具有重要意义。

19.2.1 Bernoulli 大数定律

定理 19.2.1 (Bernoulli 大数定律). 设 n_A 是 n 重 Bernoulli 试验中事件 A 发生的次数, $p(0 < p < 1)$ 是事件 A 在一次试验中发生的概率, 则对任意给定的正数 ε , 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \left| \frac{n_A}{n} - p \right| < \varepsilon \right\} = 1.$$

19.2.2 Chebyshev 大数定律

定理 19.2.2 (Chebyshev 大数定律). 设 $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$ 是相互独立的随机变量序列, 其数学期望与方差都存在, 且方差一致有界, 即存在正数 M , 对任意 $i(i = 1, 2, \dots)$, 有

$$D(X_i) \leq M$$

则对任意给定的正数 ε , 恒有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(X_i) \right| > \varepsilon \right\} = 0.$$

这一定理说明, 经过算术平均后得到的随机变量 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ 在统计上具有一种稳定性, 它的取值将比较紧密地聚集在其期望附近. 这正是大数定律的含义, 在概率论中, 大数定律是随机现象的统计稳定性的深刻描述, 同时也是数理统计的重要理论基础.

Bernoulli 大数定律是 Chebyshev 大数定律的特殊情况, 即随机变量序列 $X_i \sim b(1, p)$, $\sum_{i=1}^n X_i$ 是 n 次独立重复试验中 A 发生的次数 n_A , 即 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ 为事件 A 发生的频率 $\frac{n_A}{n}$, 而 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(X_i) = p$.

19.2.3 Khinchin 大数定律

定理 19.2.3 (Khinchin 大数定律). 设随机变量序列 $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$ 相互独立且服从相同的分布, 具有数学期望 $E(X_i) = \mu, i = 1, 2, \dots$, 则对任意给定的正数 ε , 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - \mu \right| < \varepsilon \right\} = 1.$$

Khinchin 大数定律中对 $D(X_i)$ 不再有要求, 即不用再验证方差 $D(X_i)$ 是否存在. 因此, 它比 Chebyshev 大数定律使用更方便.

19.3 中心极限定理

中心极限定理是概率论和统计学中的一个基本定理, 描述了独立同分布随机变量和其均值之间的关系. 中心极限定理指出, 对于具有有限方差的独立同分布随机变量, 它们的样本均值在样本量足够大的情况下, 以接近正态分布的形式收敛.

19.3.1 Levy Lindeberg 定理

定理 19.3.1 (Levy Lindeberg 中心极限定理). 设随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$ 相互独立, 服从同一分布, 且具有数学期望和方差:

$$E(X_i) = \mu, D(X_i) = \sigma^2 > 0 (i = 1, 2, \dots)$$

则对任意实数 x 都有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left\{\frac{\sum_{i=1}^n X_i - n\mu}{\sqrt{n}\sigma} \leq x\right\} = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \Phi(x)$$

其中 $\Phi(x)$ 是标准正态分布函数.

当 n 充分大时, $\sum_{i=1}^n X_i$ 近似服从正态分布 $N(n\mu, n\sigma^2)$, 而 $\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}$ $\underset{\text{近似}}{\sim} N(0, 1)$.

例 19.3.1 (2022 数一). 设 X_1, X_2, \dots, X_{100} 为来自总体 X 的简单随机样本, 其中 $P\{X = 0\} = P\{X = 1\} = \frac{1}{2}$, $\Phi(x)$ 表示标准正态分布函数, 则利用中心极限定理可得 $P\left\{\sum_{i=1}^{100} X_i \leq 55\right\}$ 的近似值为

- A. $1 - \Phi(1)$ B. $\Phi(1)$ C. $1 - \Phi(0.2)$ D. $\Phi(0.2)$

由 $\frac{X}{P} \mid \begin{array}{cc} 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{array}$, $E(X) = \frac{1}{2}$, $D(X) = \frac{1}{4}$, 那么 $E\left(\sum_{i=1}^{100} X_i\right) = 100E(X) = 50$, $D\left(\sum_{i=1}^{100} X_i\right) = 100D(X) = 25$, 根据中心

极限定理得出 $\sum_{i=1}^{100} X_i$ 近似服从正态分布 $N(50, 25)$, 将其标准化为 $\frac{\sum_{i=1}^{100} X_i - 50}{\sqrt{25}} \sim N(0, 1)$, 因此

$$P\left\{\frac{\sum_{i=1}^{100} X_i - 50}{\sqrt{25}} \leq \frac{55 - 50}{\sqrt{25}}\right\} = \Phi\left(\frac{55 - 50}{\sqrt{25}}\right) = \Phi(1)$$

故选 B.

例 19.3.2. 设 $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$ 为独立同分布的随机变量序列, 且均服从参数为 $\lambda (\lambda > 1)$ 的指数分布, 记 $\Phi(x)$ 为标准正态分布函数, 则有

- | | |
|---|---|
| A. $\lim_{n \rightarrow \infty} P\left\{\frac{\sum_{i=1}^n X_i - n\lambda}{\lambda\sqrt{n}} \leq x\right\} = \Phi(x)$ | B. $\lim_{n \rightarrow \infty} P\left\{\frac{\sum_{i=1}^n X_i - n\lambda}{\sqrt{n\lambda}} \leq x\right\} = \Phi(x)$ |
| C. $\lim_{n \rightarrow \infty} P\left\{\frac{\lambda \sum_{i=1}^n X_i - n}{\sqrt{n}} \leq x\right\} = \Phi(x)$ | D. $\lim_{n \rightarrow \infty} P\left\{\frac{\sum_{i=1}^n X_i - \lambda}{\sqrt{n\lambda}} \leq x\right\} = \Phi(x)$ |

因为 $X \sim E(\lambda)$, 所以 $E(X) = \frac{1}{\lambda}$, $D(X) = \frac{1}{\lambda^2}$, 那么 $E\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) = nE(X) = \frac{n}{\lambda}$, $D\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) = nD(X) = \frac{n}{\lambda^2}$, 根据中

心极限定理得出 $\sum_{i=1}^n X_i$ 近似服从正态分布 $N\left(\frac{n}{\lambda}, \frac{n}{\lambda^2}\right)$, 将其标准化为 $\frac{\sum_{i=1}^n X_i - \frac{n}{\lambda}}{\sqrt{\frac{n}{\lambda^2}}} \sim N(0, 1)$, 因此

$$P = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n X_i - \frac{n}{\lambda}}{\sqrt{\frac{n}{\lambda^2}}} \leq x \right\} = P\left\{ \frac{\lambda \sum_{i=1}^n X_i - n}{\sqrt{n}} \leq x \right\} = \Phi(x)$$

故选 C.

19.3.2 De Moivre-Laplace 定理

定理 19.3.2 (De Moivre-Laplace 中心极限定理). 设随机变量 X_n 服从参数为 n, p ($0 < p < 1$) 的二项分布 $X_n \sim B(n, p)$ ($n = 1, 2, \dots$), 对于任意 x , 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \frac{X_n - np}{\sqrt{np(1-p)}} \leqslant x \right\} = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \Phi(x).$$

第 20 章

数理统计的基本概念

“当我们正想专心工作时，我们却太老了。”

——卡尔·皮尔逊

数理统计是统计学的一个重要分支，主要研究如何利用数学方法对数据进行收集、分析和推断，从而对随机现象进行量化描述和推断。

20.1 随机样本

在数理统计中，总体 X 的分布通常是未知的，或者在形式上是已知的但含有未知参数。那么为了获得总体的分布信息，从理论上讲，需要对总体 X 中的所有个体进行观察测试，但这往往是做不到的。例如，由于测试砖的耐压性的试验具有破坏性，一旦我们获得每块砖的耐压数据，这批砖也就全部报废了。所以，我们不可能对所有个体逐一观察测试，而是从总体 X 中随机抽取若干个个体进行观察测试。从总体中抽取若干个个体的过程叫做抽样，抽取的若干个个体称为样本，样本中所含个体的数量称为样本容量。

由上知，抽取样本是为了研究总体的性质，为了保证所抽取的样本具有代表性，抽样方法必须满足以下两个条件：

- (1) 随机性。每次抽取时，总体中每个个体被抽到的可能性均等，可以通过编号抽签的方法或利用随机数表的方法产生。
- (2) 独立性。每次抽取必须是相互独立的，即每次抽取的结果既不影响其他各次抽取的结果，也不受其他各次抽取结果的影响。

这种随机的、独立的抽样方法称为简单随机抽样，由此得到的样本称为简单随机样本。今后，如无特殊说明，样本专指简单随机样本。

定义 20.1.1 (样本与样本值). 设总体 X 的分布函数为 $F(x)$, 若随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 相互独立, 且都与总体 X 具有相同的分布函数, 则称 X_1, X_2, \dots, X_n 是来自总体 X 的简单随机样本, 简称为样本, n 称为样本容量. 在对总体 X 进行一次具体的抽样并作观测之后, 得到样本 X_1, X_2, \dots, X_n 的确切数值 x_1, x_2, \dots, x_n , 称为样本观测值, 简称为样本值.

根据定义, 若 X_1, X_2, \dots, X_n 是分布函数为 $F(x)$ 的总体 X 的容量为 n 的简单随机样本, 则 X_1, X_2, \dots, X_n 的联合分布函数为 $F^*(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n F(x_i)$.

若总体 X 是离散型随机变量, 其分布律为 $P\{X = x_i\} = p_i(i = 1, 2, \dots)$, 则 X_1, X_2, \dots, X_n 的联合分布律为

$$P\{X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n\} = \prod_{i=1}^n P\{X_i = x_i\} = \prod_{i=1}^n p_i.$$

若总体 X 是连续型随机变量, 其概率密度为 $f(x)$, 则 X_1, X_2, \dots, X_n 的联合概率密度为

$$f^*(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f(x_i)$$

定义 20.1.2 (统计量与其观测值). 设 X_1, X_2, \dots, X_n 是来自总体 X 的一个样本, x_1, x_2, \dots, x_n 是样本观测值, $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 是 X_1, X_2, \dots, X_n 的函数. 如果 $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 中不含未知参数, 则称 $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为一个统计量, 而 $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 称为统计量的观测值.

20.1.1 常用统计量

定义 20.1.3 (常用统计量). 设 X_1, X_2, \dots, X_n 是来自总体 X 的简单随机样本, 以下为常用统计量:

$$(1) \text{ 样本均值 } \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i;$$

$$(2) \text{ 样本方差 } S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2 \right);$$

$$(3) \text{ 样本标准差 } S = \sqrt{S^2};$$

$$(4) \text{ 样本 } k \text{ 阶原点矩 } A_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^k (k = 1, 2, \dots);$$

$$(5) \text{ 样本 } k \text{ 阶中心矩 } B_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^k (k = 2, 3, \dots); \text{ 其中 } B_1 = 0, B_2 = \frac{n-1}{n} S^2;$$

$$(6) \text{ 最小顺序统计量 } X_{(1)} = \min\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$$

$$F_{(1)}(x) = P\{\min\{X_1, X_2, \dots, X_n\} \leq x\} = 1 - [1 - F(x)]^n$$

对连续型随机变量, 概率密度函数为 $f_{(1)}(x) = n[1 - F(x)]^{n-1} f(x)$;

(7) 最大顺序统计量 $X_{(n)} = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$

$$F_{(n)}(x) = P\{\max\{X_1, X_2, \dots, X_n\} \leq x\} = [F(x)]^n$$

对连续型随机变量, 概率密度函数为 $f_{(n)}(x) = n[F(x)]^{n-1}f(x)$.

20.1.2 样本数字特征的性质

定理 20.1.1 (样本数字特征的性质). (1) 若总体 X 的数学期望 $E(X) = \mu$, 则 $E(\bar{X}) = E(X) = \mu$;

(2) 若总体 X 的方差为 $D(X) = \sigma^2$, 则 $D(\bar{X}) = \frac{1}{n}D(X) = \frac{\sigma^2}{n}$, $E(S^2) = D(X) = \sigma^2$.

例 20.1.1. 设 X_1, X_2, \dots, X_n 是来自指数分布总体 $E(\lambda)$ 的简单随机样本 \bar{X} 和 S^2 分别是样本均值和样本方差, 记统计量 $T = \bar{X} - S^2$, 求 $E(T)$.

$$\begin{aligned} E(T) &= E(\bar{X} - S^2) = E(\bar{X}) - E(S^2) = E(\bar{X}) - D(X), \text{ 因为 } X \sim E(\lambda), \text{ 所以 } E(X) = \frac{1}{\lambda}, D(X) = \frac{1}{\lambda^2}, \text{ 因此} \\ E(T) &= \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{\lambda - 1}{\lambda^2}. \end{aligned}$$

例 20.1.2. 设 X_1, X_2, \dots, X_n 是来自 $X \sim P(\lambda)$ 的简单随机样本, \bar{X} 和 S^2 分布为样本均值和方差, 求统计量 $T = \bar{X}^2 - \frac{S^2}{n}$ 的数学期望 $E(T)$.

$$\begin{aligned} E(T) &= E\left(\bar{X}^2 - \frac{S^2}{n}\right) = E(\bar{X}^2) - E\left(\frac{S^2}{n}\right) = E(\bar{X}^2) - \frac{1}{n}E(S^2) = D(\bar{X}) + E^2(\bar{X}) - \frac{1}{n}D(X), \text{ 因为 } X \sim P(\lambda), \text{ 所以} \\ E(X) &= D(X) = \lambda, \text{ 且} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E(\bar{X}) &= E\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(X_i) = \frac{1}{n} \cdot n\lambda = \lambda \\ D(\bar{X}) &= D\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i\right) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n D(X_i) = \frac{1}{n^2} \cdot n\lambda = \frac{\lambda}{n} \end{aligned}$$

$$\text{因此 } E(T) = \frac{\lambda}{n} + \lambda^2 - \frac{\lambda}{n} = \lambda^2.$$

20.2 三大抽样分布

20.2.1 χ^2 分布

定义 20.2.1 (卡方分布). 设 X_1, X_2, \dots, X_n 相互独立, 且都服从标准正态分布 $N(0, 1)$, 则称统计量

$$\chi^2 = X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2$$

服从自由度为 n 的 χ^2 分布, 记为 $\chi^2 \sim \chi^2(n)$.

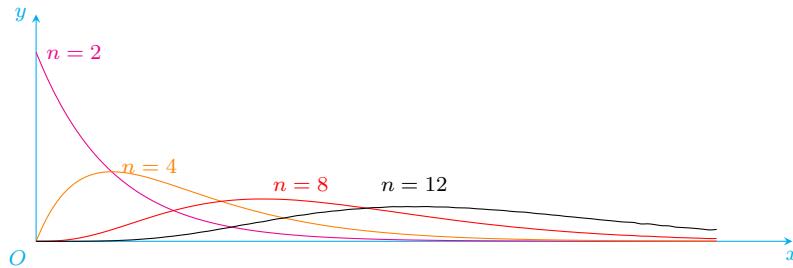


图 20.2.1

定理 20.2.1. 若 $X \sim \chi^2(n)$, 则 $E(X) = n, D(X) = 2n$.

例 20.2.1. 设 $X_1, x_2, \dots, X_n, X_{n+1}$ 为总体 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 的简单随机样本, 且有

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, T = \frac{n}{(n+1)\sigma^2} (X_{n+1} - \bar{X})^2$$

求 T 服从的分布, 并计算 $E(T)$ 和 $D(T)$.

错解. 由题意知 $X_{n+1} \sim N(\mu, \sigma^2)$, $\bar{X} \sim N\left(\mu, \frac{1}{n}\sigma^2\right)$, 且 X_{n+1} 与 \bar{X} 相互独立, 故 $X_{n+1} - \bar{X} \sim N\left(0, \frac{n-1}{n}\sigma^2\right)$,

错因: 不能简单的加减法, 要从期望和方差的角度进行计算.

由题意知 $X_{n+1} \sim N(\mu, \sigma^2)$, $\bar{X} \sim N\left(\mu, \frac{1}{n}\sigma^2\right)$, 且 X_{n+1} 与 \bar{X} 相互独立,

$$E(X_{n+1} - \bar{X}) = E(X_{n+1}) - E(\bar{X}) = \mu - \mu = 0, D(X_{n+1} - \bar{X}) = D(X_{n+1}) + D(\bar{X}) = \sigma^2 + \frac{\sigma^2}{n} = \frac{n+1}{n}\sigma^2$$

因此 $X_{n+1} - \bar{X} \sim N\left(0, \frac{n+1}{n}\sigma^2\right)$, 则 $\frac{X_{n+1} - \bar{X} - 0}{\sqrt{\frac{n+1}{n}}\sigma} \sim N(0, 1)$, 两边平方有

$$\left(\frac{X_{n+1} - \bar{X} - 0}{\sqrt{\frac{n+1}{n}}\sigma} \right)^2 = \frac{n}{(n+1)\sigma^2} (X_{n+1} - \bar{X})^2 = T \sim \chi^2(1)$$

故 $E(T) = 1, D(T) = 2$.

定理 20.2.2 (分布的可加性). 设 $X \sim \chi^2(n_1), Y \sim \chi^2(n_2)$, 且 X, Y 相互独立, 则

$$X + Y \sim \chi^2(n_1 + n_2).$$

定理 20.2.3 (χ^2 分布上 α 分位点). 设 $\chi^2 \sim \chi^2(n)$, 对于给定的 α ($0 < \alpha < 1$), 满足条件

$$P\{\chi^2 > \chi_\alpha^2(n)\} = \int_{\chi_\alpha^2(n)}^{+\infty} f(y) dy = \alpha$$

的点 $\chi_\alpha^2(n)$ 称为 $\chi^2(n)$ 分布的上 α 分位点.

例 20.2.2. 已知 (X, Y) 的概率密度函数为 $f(x, y) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{1}{2}(x^2+y^2-2y+1)}$, $-\infty < x, y < +\infty$, 求 $\frac{X^2}{(Y-1)^2}$ 服从的分布及参数.

已知二维正态分布概率密度函数为

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\rho\frac{(x-\mu_1)(y-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right]}$$

因此 $f(x, y) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{1}{2}(x^2+y^2-2xy+1)} \sim N(0, 1; 1, 1; 0)$, 故 $X \sim N(0, 1)$, $Y \sim N(1, 1)$ 且 X, Y 相互独立, 那么 $\frac{X^2}{(Y-1)^2} \sim F(1, 1)$.

例 20.2.3. 设 X_1, X_2 是来自总体 X 的简单随机样本, 且 $\bar{X} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 X_i$, $S_2^2 = \sum_{i=1}^2 (X_i - \bar{X})^2$, $Y = \sqrt{X_1 X_2}$,

(1) 若 X 服从参数为 $\frac{1}{2}$ 的指数分布, 求 EY ;

(2) 若 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 求 $E[(\bar{X} S_2^2)^2]$.

(1) $EY = E(\sqrt{X_1 X_2}) = [E(\sqrt{X})]^2$, 下求 $E\sqrt{X}$,

$$E\sqrt{X} = \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{x} \cdot f(x) dx = \int_0^{+\infty} \sqrt{x} \cdot \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}x} dx \stackrel{\frac{1}{2}x=t}{=} \sqrt{2} \int_0^{+\infty} \sqrt{t} e^{-t} dt = \sqrt{2} \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{2\pi}}{2}$$

$$\text{于是 } EY = \left(\frac{\sqrt{2\pi}}{2}\right)^2 = \frac{\pi}{2}.$$

(2) 因为 \bar{X} 与 S_2^2 相互独立, 所以

$$\begin{aligned} E[(\bar{X} S_2^2)^2] &= E(\bar{X}^2) E(S_2^2) = [D\bar{X} + (E\bar{X})^2][D(S_2^2) + E^2(S_2^2)] \\ &= \left[\frac{1}{n} DX + E^2 X\right] \left[\left(\sigma^2\right)^2 D\left(\frac{S_2^2}{\sigma^2}\right) + \left(\sigma^2 E\left(\frac{S_2^2}{\sigma^2}\right)\right)^2\right] \\ &= \left[\frac{1}{2}\sigma^2 + \mu^2\right] [2\sigma^4 + \sigma^4] = 3\sigma^4 \left(\frac{1}{2}\sigma^2 + \mu^2\right). \end{aligned}$$

20.2.2 t 分布

定义 20.2.2 (t 分布). 设随机变量 $X \sim N(0, 1)$, $Y \sim \chi^2(n)$, 且 X, Y 相互独立, 则称随机变量

$$T = \frac{X}{\sqrt{Y/n}}$$

服从自由度为 n 的 t 分布, 记为 $T \sim t(n)$.

定理 20.2.4. t 分布的概率密度函数 $h(t)$ 为偶函数, 即 $t_{1-\alpha}(n) = -t_\alpha(n)$.

定理 20.2.5. 当 n 足够大时, t 分布近似于 $N(0, 1)$ 分布.

定理 20.2.6 (t 分布与 F 分布). $t^2 \sim F(1, n)$.

定义 20.2.3 (t 分布上 α 分位点). 设 $t \sim t(n)$, 对于给定的 α ($0 < \alpha < 1$), 满足条件

$$P\{t > t_\alpha(n)\} = \int_{t_\alpha(n)}^{+\infty} h(t) dt = \alpha$$

的点 $t_\alpha(n)$ 称为 $t(n)$ 分布的上 α 分位点.

20.2.3 F 分布

定义 20.2.4 (F 分布). 设随机变量 $X \sim \chi^2(n_1), Y \sim \chi^2(n_2)$, 且 X, Y 相互独立, 则称随机变量

$$F = \frac{X/n_1}{Y/n_2}$$

服从自由度为 (n_1, n_2) 的 F 分布, 记为 $F \sim F(n_1, n_2)$.

定理 20.2.7. 若 $F \sim F(n_1, n_2)$, 则有 $\frac{1}{F} \sim F(n_2, n_1)$, $F_{1-\alpha}(n_1, n_2) = \frac{1}{F_\alpha(n_2, n_1)}$.

定理 20.2.8 (F 分布上 α 分位点). 设 $F \sim F(n_1, n_2)$, 对于给定的 $\alpha(0 < \alpha < 1)$, 满足条件

$$P\{F > F_\alpha(n_1, n_2)\} = \int_{F_\alpha(n_1, n_2)}^{+\infty} \psi(y) dy = \alpha$$

的点 $F_\alpha(n_1, n_2)$ 称为 $F(n_1, n_2)$ 分布的上 α 分位点.

常用分布及其数学期望与方差.

分布名称及记号	概率函数或概率密度	数学期望	方差
(1) “0-1” 分布	$p(x) = p^x q^{1-x}, x = 0, 1, 0 < p < 1, p + q = 1$	p	pq
(2) 二项分布 $B(n, p)$	$p(x) = C_n^x p^x q^{n-x}, x = 0, 1, 2, \dots, n, 0 < p < 1, p + q = 1$	np	npq
(3) 超几何分布 $H(n, M, N)$	$p(x) = \frac{C_M^x C_{N-M}^{n-x}}{C_N^n}, x = 0, 1, \dots, \min\{n, M\}, 0 \leq n, M \leq N$	$\frac{nM}{N}$	$\frac{nM(N-M)(N-n)}{N^2(N-1)}$
(4) 泊松分布 $P(\lambda)$	$p(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}, x = 0, 1, 2, \dots, \lambda > 0$	λ	λ
(5) 几何分布 $G(p)$	$p(x) = pq^{x-1}, x = 1, 2, \dots, 0 < p < 1, p + q = 1$	$\frac{1}{p}$	$\frac{q}{p^2}$
(6) 均匀分布 $U(a, b)$	$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{(b-a)^2}{12}$
(7) 指数分布 $e(\lambda)$	$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad \lambda > 0$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$
(8) 正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < x < \infty, \sigma > 0$	μ	σ^2
(9) χ^2 分布 $\chi^2(k)$	$f(x) = \begin{cases} \frac{x^{\frac{k}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}}}{2^{\frac{k}{2}} \Gamma\left(\frac{k}{2}\right)}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad k \in \mathbb{Z}$	k	$2k$
(10) t 分布 $t(k)$	$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\sqrt{k}\pi\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} \left(1 + \frac{x^2}{k}\right)^{-\frac{k+1}{2}}$	0	$\frac{k}{k-2}$
(11) F 分布 $F(k_1, k_2)$	$f(x) = \begin{cases} \frac{\Gamma\left(\frac{k_1+k_2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k_1}{2}\right)\Gamma\left(\frac{k_2}{2}\right)} k_1^{\frac{k_1}{2}} k_2^{\frac{k_2}{2}} \frac{x^{\frac{k_1}{2}-1}}{(k_1 x + k_2)^{\frac{k_1+k_2}{2}}}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$	$\frac{k_2}{k_2-2}$	$\frac{2k_2^2(k_1+k_2-2)}{k_1(k_2-2)^2(k_2-4)}$

例 20.2.4. 设 X_1, X_2, \dots, X_n ($n \geq 2$) 为来自总体 $N(\mu, 1)$ 的简单随机样本, 及 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$, 则不能得出结论

A. $\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2$ 服从 χ^2 分布

B. $2(X_n - X_1)^2$ 服从 χ^2 分布

C. $\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ 服从 χ^2 分布

D. $n(\bar{X} - \mu)^2$ 服从 χ^2 分布

$X_i - \mu \sim N(0, 1)$, 由卡方分布的定义知 $\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 \sim \chi^2(n)$, A 正确; $X_n \sim N(\mu, 1)$, $X_1 \sim N(\mu, 1)$, 标准化处理有 $\frac{X_n - X_1}{\sqrt{2}} \sim N(0, 1)$, 即 $\left(\frac{X_n - X_1}{\sqrt{2}}\right)^2 \sim \chi^2(1) \Rightarrow \frac{(X_n - X_1)^2}{2} \sim \chi^2(1)$, 故选项 B 错误; 由于 $\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = (n-1)S^2$, 而 $\frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-1)$, 则 $\frac{(n-1)S^2}{1} \sim \chi^2(n-1)$, 即 $\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sim \chi^2(n-1)$, C 正确; 由于 $\frac{\bar{X} - \mu}{\sqrt{\frac{1}{n}}} \sim N(0, 1)$, 则 $\left(\frac{\bar{X} - \mu}{\sqrt{\frac{1}{n}}}\right)^2 = n(\bar{X} - \mu)^2 \sim \chi^2(1)$, D 正确.

例 20.2.5. 设 X_1, X_2, \dots, X_n 为来自正态总体 $N(\mu, \sigma^2)$ 的简单随机样本, 则数学期望

$$E\left\{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)\left[\sum_{j=1}^n \left(nX_j - \sum_{k=1}^n X_k\right)^2\right]\right\}$$

等于

A. $n^3(n-1)\mu \cdot \sigma^2$ B. $n^2(n-1)\mu \cdot \sigma^2$ C. $n(n-1)\mu \cdot \sigma^2$ D. $n^3(n-1)\mu \cdot \sigma$

令 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$, 那么 $\sum_{i=1}^n X_i = n\bar{X}$,

$$\sum_{j=1}^n \left(nX_j - \sum_{k=1}^n X_k\right)^2 = \sum_{j=1}^n (nX_j - n\bar{X})^2 = n^2 \sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2 = n^2(n-1)S^2$$

因此

$$E\left\{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)\left[\sum_{j=1}^n \left(nX_j - \sum_{k=1}^n X_k\right)^2\right]\right\} = E[n\bar{X} \cdot n^2(n-1)S^2] = n^3(n-1)E(\bar{X} \cdot S^2) \xrightarrow{\bar{X}, S^2 \text{ 相互独立}} n^3(n-1)\mu\sigma^2$$

故选 A.

例 20.2.6. 已知 (X, Y) 的概率密度函数为 $f(x, y) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{1}{2}(x^2+y^2-2y+1)}$, $-\infty < x, y < +\infty$, 求 $\frac{X^2}{(Y-1)^2}$ 服从的分布及参数.

已知二维正态分布概率密度函数为

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\rho \frac{(x-\mu_1)(y-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right]}$$

因此 $f(x, y) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{1}{2}(x^2+y^2-2y+1)} \sim N(0, 1; 1, 1; 0)$, 故 $X \sim N(0, 1)$, $Y \sim N(1, 1)$ 且 X, Y 相互独立, 那么 $\frac{X^2}{(Y-1)^2} \sim F(1, 1)$.

例 20.2.7. 设总体 $X \sim N(0, 1)$, $(X_1, X_2, \dots, X_{10})$ 为 X 的简单随机样本,

$$(1) \text{ 若 } T = \frac{1}{3} \left(\sum_{i=1}^3 X_i \right)^3 + \frac{1}{7} \left(\sum_{i=4}^{10} X_i \right)^2, \text{ 求 } T \text{ 服从的分布;}$$

$$(2) \text{ 若 } T = \frac{7 \sum_{i=1}^3 X_i^2}{3 \sum_{i=4}^{10} X_i^2}, \text{ 求 } T \text{ 服从的分布;}$$

$$(3) \text{ 若 } T = \frac{3X_1}{\sqrt{\sum_{i=2}^{10} X_i^2}}, \text{ 求 } T \text{ 服从的分布.}$$

(1) 因为 $\sum_{i=1}^3 X_i = X_1 + X_2 + X_3 \sim N(0+0+0, 1+1+1) = N(0, 3)$, 所以

$$\frac{1}{3} \left(\sum_{i=1}^3 X_i \right)^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^3 X_i \right)^2}{(\sqrt{3})^2} = \left(\frac{\sum_{i=1}^3 X_i - 0}{\sqrt{3}} \right)^2 \sim \chi^2(1)$$

$$\text{同理 } \frac{1}{7} \left(\sum_{i=4}^{10} X_i \right)^2 = \frac{\left(\sum_{i=4}^{10} X_i \right)^2}{(\sqrt{7})^2} = \left(\frac{\sum_{i=4}^{10} X_i - 0}{\sqrt{7}} \right)^2 \sim \chi^2(1), \text{ 于是 } T = \frac{1}{3} \left(\sum_{i=1}^3 X_i \right)^3 + \frac{1}{7} \left(\sum_{i=4}^{10} X_i \right)^2 \sim \chi^2(2).$$

$$(2) T = \frac{7 \sum_{i=1}^3 X_i^2}{3 \sum_{i=4}^{10} X_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^3 X_i^2}{\frac{\sum_{i=4}^{10} X_i^2}{7}} \sim F(3, 7).$$

$$(3) T = \frac{3X_1}{\sqrt{\sum_{i=2}^{10} X_i^2}} = \frac{X_1}{\sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{10} X_i^2}{3}}} = \frac{X_1}{\sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{10} X_i^2}{9}}} \sim t(9).$$

20.3 正态总体的抽样分布

设总体 X (不管服从什么分布, 只要均值和方差存在) 的均值为 μ , 方差为 σ^2 , X_1, X_2, \dots, X_n 为来自 X 的一个样本, 样本均值 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$, 样本方差 $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$, 则有 $E(\bar{X}) = \mu$, $D(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{n}$, $E(S^2) = \sigma^2$.

鉴于正态总体在数理统计中的重要性, 我们将不加证明地给出有关来自于正态总体样本均值及样本方差的统计量分布的结论. 这些结论将在总体参数的区间估计和假设检验问题中用到.

20.3.1 单正态总体的抽样分布

定理 20.3.1 (单正态总体的抽样分布). 设 X_1, X_2, \dots, X_n 是来自正态总体 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 的简单随机样本, 样本均值为 \bar{X} , 样本方差为 S^2 , 则

$$(1) \quad \bar{X} \sim N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right), \quad \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \sim N(0, 1);$$

$$(2) \quad \bar{X} \text{ 与 } S^2 \text{ 相互独立, 且 } \frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sim \chi^2(n-1);$$

$$(3) \quad \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \sim t(n-1);$$

$$(4) \quad \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 \sim \chi^2(n).$$

20.3.2 双正态总体的抽样分布

定理 20.3.2 (双正态总体的抽样分布). 设 X_1, X_2, \dots, X_{n_1} 与 Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_2} 分别为来自于总体 $X \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ 和 $Y \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$ 的样本, 且这两个样本相互独立. 设 $\bar{X} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} X_i$, $\bar{Y} = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} Y_i$ 分别是两个样本的样本均值,

$$S_1^2 = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (X_i - \bar{X})^2, \quad S_2^2 = \frac{1}{n_2 - 1} \sum_{i=1}^{n_2} (Y_i - \bar{Y})^2$$

分别是两个样本的样本方差, 则有:

$$(1) \quad \frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \sim N(0, 1);$$

$$(2) \quad \frac{S_1^2 / S_2^2}{\sigma_1^2 / \sigma_2^2} \sim F(n_1 - 1, n_2 - 1);$$

$$(3) \quad \frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_1 - \mu_2)}{S_w \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \sim t(n_1 + n_2 - 2), \text{ 其中 } S_w^2 = \frac{(n_1 - 1) S_1^2 + (n_2 - 1) S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}.$$

第 21 章

正态总体参数的区间估计与假设检验

“在波兰，没有谁能考我！”于是，传记作家问他，那谁算你的导师呢？

他丝毫不迟疑的回答：“亨利·勒贝格！”

——乔治·内曼

正态总体参数的区间估计和假设检验是统计学中常用的两种方法，用于对正态分布总体的参数进行推断和检验。

21.1 区间估计

区间估计是统计学中一种常用的方法，用于估计一个参数的值在一个给定的区间内的范围。在实际应用中，我们往往无法得到一个参数的精确值，而是通过收集样本数据，利用统计方法来估计这个参数的取值范围。

21.1.1 区间估计的定义

定义 21.1.1 (区间估计). 设总体 X 的分布函数为 $F(x; \theta)$ ，含有未知参数 $\theta \in \Theta$ (Θ 是 θ 的取值范围)，对于给定的 α ($0 < \alpha < 1$)， $\underline{\theta} = \underline{\theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 和 $\bar{\theta} = \bar{\theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ($\underline{\theta} < \bar{\theta}$) 是来自 X 的样本 X_1, X_2, \dots, X_n 确定的两个统计量，若对于任意 $\theta \in \Theta$ 满足

$$P\{\underline{\theta}(X_1, X_2, \dots, X_n) < \theta < \bar{\theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)\} \geq 1 - \alpha$$

则称随机区间 $(\underline{\theta}, \bar{\theta})$ 为参数 θ 的置信水平为 $1 - \alpha$ 的置信区间， $\underline{\theta}$ 和 $\bar{\theta}$ 分别称为置信水平为 $1 - \alpha$ 的双侧置信区间的置信下限和置信上限， $1 - \alpha$ 称为置信水平。

置信水平 $1 - \alpha$ 的含义：在随机抽样中，若重复抽样多次（每次的样本容量相同），得到样本 X_1, X_2, \dots, X_n 的多个样本值，对应每个样本值都确定了一个置信区间 $(\underline{\theta}, \bar{\theta})$ ，每个这样的置信区间要么包含了 θ 的真值，要么不包含 θ 的真值。

根据伯努利大数定理, 当抽样次数充分大时, 这些置信区间中包含 θ 的真值的频率接近于置信水平(即概率) $1 - \alpha$, 即在这些置信区间中包含 θ 的真值的置信区间大约有 $(1 - \alpha) \times 100\%$ 个, 不包含 θ 的真值的置信区间大约有 $\alpha \times 100\%$ 个. 例如, 给定 $\alpha = 0.05$, 则置信水平是 0.95, 若重复抽样 10000 次, 对应每次抽样都确定了一个置信区间 $(\underline{\theta}, \bar{\theta})$, 则其中大约有 9500 个置信区间包含 θ 的真值, 大约有 500 个置信区间不包含 θ 的真值. 也就是说, 某一置信区间中包含 θ 的真值的概率是 0.95.

例 21.1.1. 已知某种袋装食盐的质量 X 服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 从一批食盐中随机抽取 9 袋, 测得其质量(单位: g) 分别为

502 503 501 503 498 502 499 500 501

已知 $\sigma = 1$, 求总体均值 μ 的置信水平为 0.95 的置信区间.

由于统计量 $Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \sim N(0, 1)$, 按标准正态分布上 α 分位点的定义(见图 21.1.1), 有

$$P\left\{ \left| \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \right| < z_{\alpha/2} \right\} = 1 - \alpha$$

即

$$P\left\{ \bar{X} - z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n} < \mu < \bar{X} + z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n} \right\} = 1 - \alpha$$

故此置信区间为

$$(\bar{X} - z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n}, \bar{X} + z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n}) \quad (1)$$

常缩写为 $(\bar{X} \pm z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n})$.

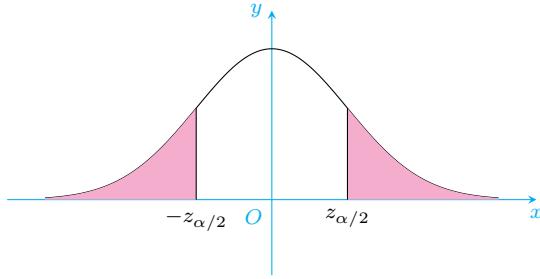


图 21.1.1

由于 $\alpha = 0.05$, 查表知 $z_{0.025} = 1.96$, 且由于 $\sigma = 1, n = 9, \bar{x} = 501$, 由式(1), 得到 μ 的置信水平为 0.95 的置信区间为 $(501 \pm 1.96 \times 1/\sqrt{9})$, 即 $(500.35, 501.65)$.

这个区间的含义是: 若反复抽样多次, 每次抽样均确定一个置信区间, 在这些置信区间中, 包含 μ 的约占 95%, 或者说某一置信区间是包含 μ 的区间的可信程度为 95%. 置信区间长度的一半是 0.65, 表示用 $\bar{x} = 501$ 来估计参数 μ 的误差不大于 0.65, 这个误差估计的可信程度是 95%.

若给定置信水平 0.99 时, 则 $\alpha = 0.01$, 查表知 $z_{0.005} = 2.58$, 得到置信区间为 $(500.14, 501.86)$. 可以看出, 当给定的置信水平越大时, 即 $1 - \alpha$ 越大, 则 α 值越小, $z_{\alpha/2}$ 越大, 从而置信区间长度 $2z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ 越大, 参数估计的精确程度越差.

21.1.2 区间估计的一般步骤

求置信区间的步骤如下：

- (1) 选择一个与样本 X_1, X_2, \dots, X_n 及 θ 有关的函数 $W(X_1, X_2, \dots, X_n; \theta)$, 使得 W 的分布不依赖于 θ 和其他未知参数, 称具有这种性质的函数 W 为枢轴量. 枢轴量选取的标准为:
 - (a) 必须含有要估计的参数 θ , 不含有其他未知参数;
 - (b) 尽量使用总体的已知信息.
- (2) 对于给定的置信水平 $1 - \alpha$, 根据 $P\{a < W(X_1, X_2, \dots, X_n; \theta) < b\} = 1 - \alpha$, 在枢轴量 W 为常用分布的情况下, a 和 b 可由分位数表查得.
选择分位数 a 和 b 的标准是使区间 (a, b) 最小, 实际应用中很难实现这一点, 因此通常选取 a 和 b 使得 $P\{W(X_1, X_2, \dots, X_n; \theta) \leq a\} = P\{W(X_1, X_2, \dots, X_n; \theta) \geq b\} = \alpha/2$.
- (3) 由 $a < W(X_1, X_2, \dots, X_n; \theta) < b$, 作恒等变形后解出参数 θ 的取值范围, 即为所求的置信区间 $(\underline{\theta}, \bar{\theta})$.
- (4) 代入已知样本数据进行计算.

21.2 正态总体均值和方差的区间估计

21.2.1 单个正态总体参数的置信区间

正态总体 $N(\mu, \sigma^2)$ 是最常见的分布, 下面我们讨论它的两个参数 μ 和 σ^2 的置信区间. 设 X_1, X_2, \dots, X_n 是来自总体 X 的样本.

定理 21.2.1 (σ^2 已知时 μ 的置信区间). σ^2 已知, 选择枢轴量 $\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}$, 得到 μ 的置信水平为 $1 - \alpha$ 的置信区间为 $(\bar{X} \pm z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n})$.

定理 21.2.2 (σ^2 未知时 μ 的置信区间). σ^2 未知, 由于枢轴量 $\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \sim N(0, 1)$ 中含有未知参数 σ , 故不能采用. 而 $\frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \sim t(n-1)$ 含有待估计参数 μ , 且不含有其他未知参数, 则使用 $\frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}}$ 作为枢轴量 (见图 21.2.1(a)), 得

$$P\left\{-t_{\alpha/2}(n-1) < \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} < t_{\alpha/2}(n-1)\right\} = 1 - \alpha$$

即

$$P\{\bar{X} - t_{\alpha/2}(n-1)S/\sqrt{n} < \mu < \bar{X} + t_{\alpha/2}(n-1)S/\sqrt{n}\} = 1 - \alpha$$

因此, μ 的置信水平为 $1 - \alpha$ 的置信区间为

$$(\bar{X} - t_{\alpha/2}(n-1)S/\sqrt{n}, \bar{X} + t_{\alpha/2}(n-1)S/\sqrt{n})$$

常缩写为

$$(\bar{X} \pm t_{\alpha/2}(n-1)S/\sqrt{n}).$$

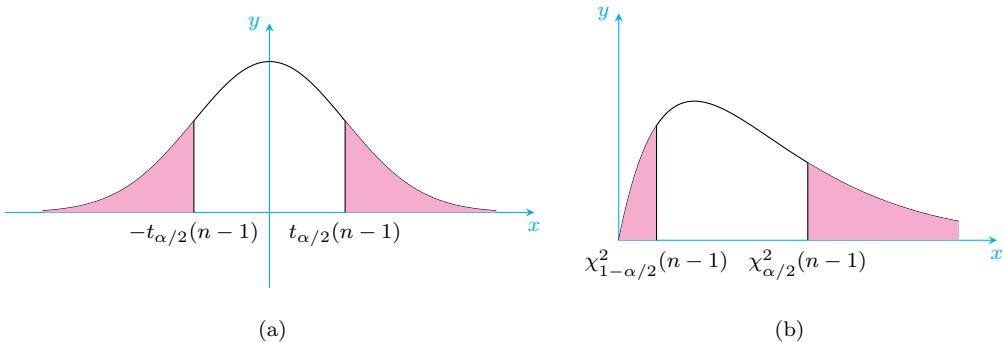


图 21.2.1

在实际中, σ^2 未知且 μ 已知的情形是极为少见的, 因此这里只讨论 μ 未知时 σ^2 的置信区间.

定理 21.2.3 (μ 未知时 σ^2 的置信区间). 由于 μ 未知, 枢轴量 $U = \frac{\bar{X} - \mu}{\sqrt{\sigma^2/n}} \sim N(0, 1)$ 和 $t = \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \sim t(n-1)$ 中都包含 μ , 故此不能采用, 而 $\frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-1)$ 不含有其他未知参数, 我们采用统计量 $\frac{(n-1)S^2}{\sigma^2}$ 作为枢轴量 (见图 21.2.1(b)), 由

$$P \left\{ \chi^2_{1-\alpha/2}(n-1) < \frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} < \chi^2_{\alpha/2}(n-1) \right\} = 1 - \alpha$$

即

$$P \left\{ (n-1)S^2 / \chi^2_{\alpha/2}(n-1) < \sigma^2 < (n-1)S^2 / \chi^2_{1-\alpha/2}(n-1) \right\} = 1 - \alpha$$

则方差 σ^2 的置信水平为 $1 - \alpha$ 的置信区间为

$$\left((n-1)S^2 / \chi^2_{\alpha/2}(n-1), (n-1)S^2 / \chi^2_{1-\alpha/2}(n-1) \right)$$

且标准差 σ 的置信水平为 $1 - \alpha$ 的置信区间为

$$\left(\sqrt{(n-1)S^2 / \chi^2_{\alpha/2}(n-1)}, \sqrt{(n-1)S^2 / \chi^2_{1-\alpha/2}(n-1)} \right).$$

21.2.2 双正态总体均值差与方差比的置信区间

21.3 单侧置信区间

单侧置信区间是指在统计学中用于估计参数的一种区间估计方法, 只考虑了参数的一个方向. 单侧置信区间通常用于确定参数的下限或上限, 而不是同时确定参数的上限和下限.

定义 21.3.1 (单侧置信下限). 对于给定值 $\alpha(0 < \alpha < 1)$, $\underline{\theta} = \underline{\theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 是由样本 X_1, X_2, \dots, X_n 确定的统计量, 对于任意的 $\theta \in \Theta$ 满足 $P\{\theta > \underline{\theta}\} \geq 1 - \alpha$, 称随机区间 $(\underline{\theta}, +\infty)$ 为参数 θ 的置信水平为 $1 - \alpha$ 的单侧置信区间, $\underline{\theta}$ 称为 θ 的置信水平为 $1 - \alpha$ 的单侧置信下限.

定义 21.3.2 (单侧置信上限). 对于给定值 $\alpha(0 < \alpha < 1)$, $\bar{\theta} = \bar{\theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 是由样本 X_1, X_2, \dots, X_n 确定的统计量, 对于任意的 $\theta \in \Theta$ 满足 $P\{\theta < \bar{\theta}\} \geq 1 - \alpha$, 称随机区间 $(-\infty, \bar{\theta})$ 为参数 θ 的置信水平为 $1 - \alpha$ 的单侧置信区间, $\bar{\theta}$ 称为 θ 的置信水平为 $1 - \alpha$ 的单侧置信上限.

单侧置信上限和单侧置信下限的求法与双侧置信区间的求法类似, 步骤如下:

- (1) 选择枢轴量的方法与双侧置信区间枢轴量的确定方法是相同的;
- (2) 对于给定的置信水平 $1 - \alpha$, 若求单侧置信下限, 根据 $P\{\theta > \underline{\theta}\} \geq 1 - \alpha$, 若求单侧置信上限, 根据 $P\{\theta < \bar{\theta}\} \geq 1 - \alpha$, 求出分位数 $\underline{\theta}$ 或者 $\bar{\theta}$;
- (3) 由 $\theta > \underline{\theta}$ 或者 $\theta < \bar{\theta}$, 作恒等变形后解出参数 θ 的取值范围, 即所求的单侧置信区间;
- (4) 代入已知样本数据进行计算, 求出具体区间.

例 21.3.1. 从一批电视机中随机地抽取 6 台做寿命试验, 测得寿命 (单位: h) 为

24000 25500 30100 28530 30150 29870

设电视机的寿命服从正态分布, 求电视机平均寿命的单侧置信下限 ($\alpha = 0.1$).

设电视机的寿命 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, σ^2 未知, 由于 $\frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \sim t(n-1)$ 含有待估计参数 μ , 且不含有其他未知参数, 故使用 $\frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \sim t(n-1)$ 作为枢纽量, 则

$$P\left\{\frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} < t_{\alpha}(n-1)\right\} = 1 - \alpha$$

即

$$P\{\mu > \bar{X} - t_{\alpha}(n-1)S/\sqrt{n}\} = 1 - \alpha$$

于是得到 μ 的置信水平为 $1 - \alpha$ 的单侧置信下限为

$$\bar{X} - t_{\alpha}(n-1)S/\sqrt{n}$$

根据已知数据, 得 $\bar{x} = 28025$, $s = 2647.9$, $n = 6$, 由 $\alpha = 0.1$, 查表知 $t_{\alpha}(n-1) = t_{0.1}(5) = 1.4759$, 于是得到 μ 的置信水平为 0.9 的单侧置信下限为 $28025 - 1.4759 \times 2647.9/\sqrt{6} = 26430$.

21.4 假设检验

假设检验是一种统计推断方法, 用于判断关于总体参数的某种假设是否成立. 在假设检验中, 我们通常会提出一个关于总体参数的假设, 然后利用样本数据来判断这个假设是否成立.

表 21.1: 正态总体参数区间估计表

总体	参数	统计量	双侧置信区间	单侧置信区间
$X \sim N(\mu, \sigma_0^2)$	μ	$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \sim N(0, 1)$	$\left(\bar{X} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\alpha/2} \right)$	$\left(\bar{X} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\alpha}, +\infty \right)$
σ^2 已知				
$X \sim N(\mu, \sigma^2)$	μ	$t = \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \sim t(n-1)$	$\left(\bar{X} \pm t_{\alpha/2}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}} \right)$	$\left(\bar{X} - t_{\alpha}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}}, +\infty \right)$
σ^2 未知				
$X \sim N(\mu, \sigma^2)$	σ^2	$\chi^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma^2}$	$\left(\frac{(n-1)S^2}{\chi_{\alpha/2}^2(n-1)}, \frac{(n-1)S^2}{\chi_{1-\alpha/2}^2(n-1)} \right)$	$\left(0, \frac{(n-1)S^2}{\chi_{1-\alpha}^2(n-1)} \right), +\infty$
μ 未知		$\sim \chi^2(n-1)$		
$X \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$		$Z = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$	$(-\infty, \bar{X} - \bar{Y})$	$(\bar{X} - \bar{Y}$
$Y \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$	$\mu_1 - \mu_2$	$\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$	$\left(X - Y \pm z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} \right)$	$-z_{\alpha} \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}, +\infty \right)$
σ_1^2, σ_2^2 已知		$\sim N(0, 1)$		
$X \sim N(\mu_1, \sigma^2)$		$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - (\mu_1 - \mu_2)}{S_w \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$	$(\bar{X} - \bar{Y} + \pm t_{\alpha/2}(n_1 + n_2$	$(\bar{X} - \bar{Y} - t_{\alpha}(n_1 + n_2$
$Y \sim N(\mu_2, \sigma^2)$	$\mu_1 - \mu_2$	$\sim t(n_1 + n_2 - 2)$	$-2) \cdot S_w \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$	$-2) \cdot S_w \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$
σ^2 未知				
$X \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$		$F = \frac{S_1^2 / S_2^2}{\sigma_1^2 / \sigma_2^2}$	$\left(\frac{S_1^2}{S_2^2} \cdot F_{\alpha/2}^{-1}(n_1 - 1, n_2 - 1) \right)$	$\left(0, \frac{S_1^2}{S_2^2} \cdot F_{1-\alpha}^{-1}(n_1 - 1, n_2 - 1) \right)$
$Y \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$		$\sim F(n_1 - 1, n_2 - 1)$		$\left(\frac{S_1^2}{S_2^2} \cdot F_{\alpha}^{-1}(n_1 - 1, n_2 - 1), +\infty \right)$
μ_1, μ_2 未知				

21.4.1 假设检验的基本思想

例 21.4.1. 某厂生产一种袋装白糖，每袋白糖的净重是一个随机变量，服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ ，机器正常工作时，均值是 0.5 (单位: kg)，标准差是 0.01 kg，某天随机地抽取 5 袋白糖，称得净重为

$$0.54 \quad 0.58 \quad 0.47 \quad 0.49 \quad 0.52$$

问当日机器是否正常工作？

由题意知，方差 σ^2 已知， μ 未知，要判断机器是否正常工作，就是要判断该日生产的白糖净重的均值是否为 0.5 kg，即检验假设 “ $\mu = 0.5$ ” 是否正确。因此，提出两个相互对立的假设：

原假设 $H_0 : \mu = \mu_0 = 0.5$ ，备择假设 $H_1 : \mu \neq 0.5$ 。

如果假设 $H_0 : \mu = \mu_0 = 0.5$ 为真，那么机器正常工作；如果假设 $H_1 : \mu \neq 0.5$ 为真，则机器工作不正常。

在假设 $H_0 : \mu = \mu_0 = 0.5$ 条件下，统计量 $Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}} \sim N(0, 1)$ ，由标准正态分布的分位点的定义（见图 21.1.1），知 $P_{\mu_0} \left\{ \left| \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}} \right| \geq z_{\alpha/2} \right\} = \alpha$ ，若给定 $\alpha = 0.05$ ，查表知 $z_{0.025} = 1.96$ ，代入样本数据： $n = 5, \bar{x} = 0.52$ ，则

$$z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}} = \frac{0.52 - 0.5}{0.01/\sqrt{5}} = 4.47 > 1.96.$$

这说明小概率事件发生了，所以应该拒绝假设 $H_0 : \mu = \mu_0 = 0.5$ ，接受备择假设 $H_1 : \mu \neq 0.5$ ，即机器工作不正常。

定义 21.4.1 (接收域和拒绝域). 上述例题中，若 z 取值在区间 $(-1.96, 1.96)$ 范围内，则接受假设 H_0 ，即 $|z| < z_{\alpha/2}$ 称为接受域，而 $|z| \geq z_{\alpha/2}$ 称为拒绝域， $z_{\alpha/2}$ 称为临界值， $Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}$ 称为检验统计量。

在根据样本作推断时，由于样本的随机性，难免会做出错误的决定。

定义 21.4.2 (第一类错误). 当原假设 H_0 为真时，而做出拒绝 H_0 的判断，称为犯第一类错误（拒真错误）

定义 21.4.3 (第二类错误). 当原假设 H_0 不真时，而作出接受 H_0 的判断，称为犯第二类错误（取伪错误）。

定义 21.4.4 (显著性水平). 在实际应用中，控制犯第一类错误的概率，使其不大于一个较小的正数 $\alpha (0 < \alpha < 1)$ ，称 α 为检验的显著性水平。

定义 21.4.5 (双边备择假设与双边假设检验). 形如 $H_1 : \mu \neq \mu_0$ 的假设，表示 μ 可能大于 μ_0 ，也可能小于 μ_0 ，称为双边备择假设；形如 $H_0 : \mu = \mu_0$ 的假设，称为双边假设检验。

在实际中，有时只关心均值是否减小。例如某机器的生产效率问题，此时我们应该关注的是生产时间，时间越短越好。对于采用新工艺来提高生产效率，生产时间是否显著缩短的问题，需要考虑如下假设检验：原假设 $H_0 : \mu \geq \mu_0$ ，备择假设 $H_1 : \mu < \mu_0$ 。

定义 21.4.6 (单边检验). 形如 $H_0 : \mu \geq \mu_0$ 的假设称为左边检验，类似的形如 $H_0 : \mu \leq \mu_0$ 的假设称为右边检验。左边检验和右边检验统称为单边检验。

21.4.2 假设检验的解题步骤

- (1) 确定原假设 H_0 与备择假设 H_1 ;
- (2) 选择合适的检验统计量, 在原假设成立的条件下求其分布;
- (3) 根据显著性水平 α , 再原假设成立的条件下确定临界值和拒绝域;
- (4) 判断是否落入拒绝域, 落入拒绝域则拒绝 H_0 , 否则拒绝 H_1 .

21.4.3 单个正态总体的假设检验

σ^2 已知, 关于 μ 的检验 (Z 检验)

设总体 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 其中 σ^2 已知, 要检验假设:

- (1) 双边检验. $H_0: \mu = \mu_0$, 备择假设 $H_1: \mu \neq \mu_0$, 由例题 21.4.1 知, 选取检验统计量为 $Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}$, 拒绝域为 $|z| \geq z_{\alpha/2}$.
- (2) 右边检验. $H_0: \mu \leq \mu_0$, $H_1: \mu > \mu_0$, 选择统计量 $Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}} \sim N(0, 1)$, 根据标准正态分布分位点的定义 (见图 21.4.1(a)) 可知 $P_{\mu_0} \left\{ \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}} \geq z_\alpha \right\} = \alpha$, 则拒绝域为 $z \geq z_\alpha$.
- (3) 左边检验. $H_0: \mu \geq \mu_0$, $H_1: \mu < \mu_0$, 选取统计量 $Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}} \sim N(0, 1)$, 由标准正态分布分位点的定义 (见图 21.4.1(b)) 可知 $P_{\mu_0} \left\{ \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}} \leq -z_\alpha \right\} = \alpha$, 则拒绝域为 $z \leq -z_\alpha$.

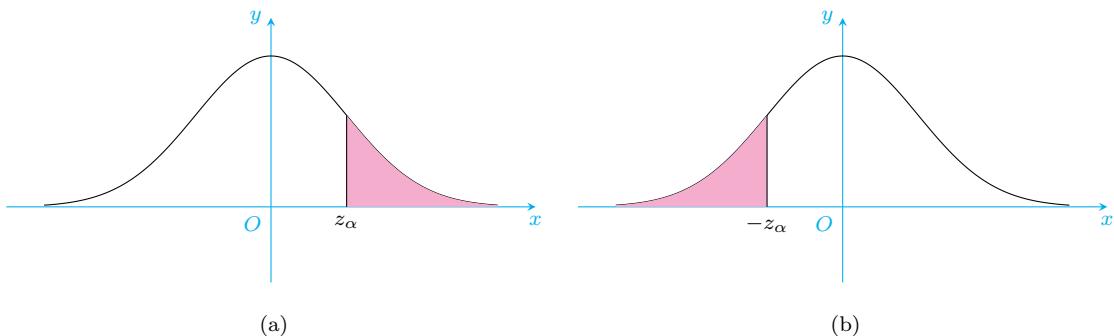


图 21.4.1

例 21.4.2. 设某电子产品平均寿命 5000 h 为达到标准, 现从一大批产品中抽出 5 件, 试验结果 (单位: h) 如下:

5325 4878 4638 5652 4474

假设该产品的寿命 $X \sim N(\mu, 1000)$, 试问此批产品是否合格 (取显著性水平 $\alpha = 0.05$)?

由题意知, 需要检验假设

$$H_0: \mu \geq 5000, H_1: \mu < 5000$$

根据已知样本数据, 得 $n = 5, \bar{x} = 4993, \sigma_0 = \sqrt{1000}$, 则

$$z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma_0 / \sqrt{n}} = \frac{\sqrt{5}(4993 - 5000)}{\sqrt{1000}} = -0.495$$

查表知 $z_{0.05} = 1.645$, 由于拒绝域为 $z \leq -z_\alpha$, 故可接受 H_0 , 即认为该批产品合格.

σ^2 未知, 关于 μ 的检验 (t 检验)

设总体 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 其中 μ, σ^2 未知, 检验假设:

- (1) 双边检验. $H_0: \mu = \mu_0$, 备择假设 $H_1: \mu \neq \mu_0$;
- (2) 右边检验. $H_0: \mu \leq \mu_0, H_1: \mu > \mu_0$;
- (3) 左边检验. $H_0: \mu \geq \mu_0, H_1: \mu < \mu_0$;

这里以双边检验 $H_0: \mu = \mu_0, H_1: \mu \neq \mu_0$ 为例求拒绝域.

若总体方差 σ^2 未知, Z 检验法不能使用, 因为 $Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}}$ 中含未知参数 σ , 不是统计量, 所以要选择其他的统计量来进行检验. 选取统计量 $t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S / \sqrt{n}}$ 作为检验统计量. 由抽样分布定理知, $\frac{\bar{X} - \mu_0}{S / \sqrt{n}} \sim t(n-1)$, 当原假设 H_0 成立时, 有

$$P_{\mu_0} \left\{ \left| \frac{\bar{X} - \mu_0}{S / \sqrt{n}} \right| \geq t_{\alpha/2}(n-1) \right\} = \alpha$$

即得拒绝域为 $|t| = \left| \frac{\bar{x} - \mu_0}{s / \sqrt{n}} \right| \geq t_{\alpha/2}(n-1)$. 类似地, 可得单边检验的拒绝域:

- (1) 假设 $H_0: \mu \leq \mu_0, H_1: \mu > \mu_0$, 其检验的拒绝域为 $t \geq t_\alpha(n-1)$;
- (2) 假设 $H_0: \mu \geq \mu_0, H_1: \mu < \mu_0$, 其检验的拒绝域为 $t \leq -t_\alpha(n-1)$.

这种利用 t 统计量得出的检验法称为 t 检验法.

例 21.4.3. 已知钢筋强度服从正态分布, 现测得生产出的钢筋强度 (单位: Pa) 分别为

55.5 59.0 53.5 51.5 56.0

能否认为其强度的均值为 52.0 ($\alpha = 0.05$)?

在 σ^2 未知的条件下, 检验假设

$$H_0: \mu = 52.0, \quad H_1: \mu \neq 52.0$$

选择统计量 $t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S / \sqrt{n}}$, 由 $n = 5, \bar{x} = 55.1, s = 2.8151$, 得统计量 t 的观测值为

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s / \sqrt{n}} = \frac{\sqrt{5}(55.1 - 52.0)}{2.8151} = 2.4624$$

当 $\alpha = 0.05$, 查 t 分布表得临界值 $t_{0.025}(4) = 2.776$, 由于 $|t| = 2.4624 < 2.776 = t_{0.025}(4)$, 所以接受假设 H_0 , 即认为钢筋强度的均值为 52.0.

例 21.4.4. 已知某种电器在正常工作条件下平均消耗电流不会超过 0.8 A. 现随机抽取 16 台这种电器进行试验, 求得平均消耗电流为 0.91 A, 消耗电流的标准差为 0.2 A. 假设电器所消耗的电流服从正态分布, 显著性水平为 $\alpha = 0.05$, 问能否认为电器在正常工作条件下平均消耗电流不会超过 0.8 A?

根据题意, 检验假设

$$H_0: \mu \leq 0.8, \quad H_1: \mu > 0.8$$

由于 σ 未知, 故采用 t 检验法, 选择检验统计量 $t = \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{16}} \sim t(15)$, 查表得 $t_{0.05}(15) = 1.753$, 故拒绝域为 $\frac{\bar{x} - 0.8}{s/\sqrt{n}} > 1.753$, 代入样本数据, 得 $t = \frac{\bar{x} - 0.8}{s/\sqrt{n}} = \frac{0.9 - 0.8}{0.2/\sqrt{16}} = 2$, 因此拒绝原假设, 即认为电器在正常工作条件下平均消耗电流会超过 0.8 A.

μ 未知, 关于 σ^2 的检验 (χ^2 检验)

设总体 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, μ, σ^2 均未知, X_1, X_2, \dots, X_n 是来自 X 的样本, 要求检验假设 $H_0: \sigma^2 = \sigma_0^2; H_1: \sigma^2 \neq \sigma_0^2$, σ_0^2 为已知常数 (显著性水平为 α).

选取 $\chi^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2}$ 作为检验统计量, 原假设 H_0 成立时, $\frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2} \sim \chi^2(n-1)$, 其拒绝域的形式为 $\frac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2} \leq k_1$ 或 $\frac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2} \geq k_2$, 其中 k_1, k_2 由下式确定:

$$\text{由 } P\{\text{拒绝 } H_0 \mid H_0 \text{ 为真}\} = P_{\delta_0} \left\{ \left(\frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2} \leq k_1 \right) \cup \left(\frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2} \geq k_2 \right) \right\} = \alpha$$

为计算方便, 习惯上取 $P_{\delta_0} \left\{ \frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2} \leq k_1 \right\} = \frac{\alpha}{2}, P_{\delta_0} \left\{ \frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2} \geq k_2 \right\} = \frac{\alpha}{2}$, 得

$$k_1 = \chi_{1-\alpha/2}^2(n-1), \quad k_2 = \chi_{\alpha/2}^2(n-1)$$

于是拒绝域为

$$\frac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2} \leq \chi_{1-\alpha/2}^2(n-1) \quad \text{或} \quad \frac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2} \geq \chi_{\alpha/2}^2(n-1).$$

类似地可得关于方差的两个单边检验的拒绝域:

(1) 假设 $H_0: \sigma^2 \leq \sigma_0^2; H_1: \sigma^2 > \sigma_0^2$, 该检验的拒绝域为 $\frac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2} \geq \chi_{\alpha}^2(n-1)$;

(2) 假设 $H_0: \sigma^2 \geq \sigma_0^2; H_1: \sigma^2 < \sigma_0^2$, 该检验的拒绝域为 $\frac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2} \leq \chi_{1-\alpha}^2(n-1)$.

以上检验法称为 χ^2 检验法.

例 21.4.5. 某厂应用新工艺对加工好的 15 个活塞的直径进行测量, 得样本方差 $s^2 = 0.0006$. 已知老工艺生产的活塞直径的方差为 0.0004. 问改革后活塞直径的方差是否不大于改革前的方差 (取显著性水平 $\alpha = 0.05$)?

对方差进行右边检验, 且正态总体均值未知, 用 χ^2 检验法. 设测量值 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, $\sigma^2 = 0.0004$. 检验假设为

$$H_0: \sigma^2 \leq 0.0004, \quad H_1: \sigma^2 > 0.0004$$

选择统计量 $\chi^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2}$, 拒绝域为 $\chi^2 \geq \chi_{\alpha}^2(n-1)$. 查表得 $\chi_{0.05}^2(14) = 23.685$, 代入样本数据, 得

$$\chi^2 = \frac{(15-1) \times 0.0006}{0.0004} = 21 < 23.685$$

故接受 H_0 , 即改革后活塞直径的方差不显著大于改革前的方差.

21.4.4 双正态总体的假设检验

双正态总体均值的检验 (t 检验)

双正态总体方差的假设检验

正态总体方差的假设检验各情况表.

条件	原假设	统计量	对应样本函数分布	拒绝域
单正态总体均值和方差的假				
已知 σ^2	$H_0 : \mu = \mu_0$			$ z \geq z_{\alpha/2}$
	$H_0 : \mu \leq \mu_0$	$Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}}$	$N(0, 1)$	$z \geq z_\alpha$
	$H_0 : \mu \geq \mu_0$			$z \leq -z_\alpha$
未知 σ^2	$H_0 : \mu = \mu_0$			$ t \geq t_{\alpha/2}(n_1 + n_2 - 2)$
	$H_0 : \mu \leq \mu_0$	$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S / \sqrt{n}}$	$t(n-1)$	$t \geq t_\alpha(n_1 + n_2 - 2)$
	$H_0 : \mu \geq \mu_0$			$t \leq -t_\alpha(n_1 + n_2 - 2)$
未知 μ	$H_0 : \sigma^2 = \sigma_0^2$			$\chi^2 \geq \chi_{\alpha/2}^2(n-1)$
	$H_0 : \sigma^2 \leq \sigma_0^2$	$\chi^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2}$	$\chi^2(n-1)$	$\chi^2 \geq \chi_\alpha^2(n-1)$
	$H_0 : \sigma^2 \geq \sigma_0^2$			$\chi^2 \leq \chi_{1-\alpha}^2(n-1)$
双正态总体均值和方差的假				
已知 σ_1^2, σ_2^2	$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = \delta$	$Z = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - \delta}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$	$N(0, 1)$	$ z \geq z_{\alpha/2}$
	$H_0 : \mu_1 - \mu_2 \leq \delta$			$z \geq z_\alpha$
	$H_0 : \mu_1 - \mu_2 \geq \delta$			$z \leq -z_\alpha$
未知 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = \delta$	$t = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - \delta}{S_w \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$	$t(n_1 + n_2 - 2)$	$ t \geq t_{\alpha/2}(n_1 + n_2 - 2)$
	$H_0 : \mu_1 - \mu_2 \leq \delta$			$t \geq t_\alpha(n_1 + n_2 - 2)$
	$H_0 : \mu_1 - \mu_2 \geq \delta$			$t \leq -t_\alpha(n_1 + n_2 - 2)$
未知 μ_1, μ_2	$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$			$F \geq F_{\alpha/2}(n_1 - 1, n_2 - 1)$
	$H_0 : \sigma_1^2 \leq \sigma_2^2$	$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$	$\frac{S_1^2 / S_2^2}{\sigma_1^2 / \sigma_2^2} \sim F(n_1 - 1, n_2 - 1)$	$F \geq F_\alpha(n_1 - 1, n_2 - 1)$
	$H_0 : \sigma_1^2 \geq \sigma_2^2$			$F \leq F_{1-\alpha}(n_1 - 1, n_2 - 1)$

第 22 章

参数的点估计及其优良性

“数学家通常是先通过直觉来发现一个定理；
这个结果对于他首先是似然的，然后他再着手去制造一个证明。”

——哈代

参数的点估计是统计学中一种估计参数的方法，通过样本数据来估计总体参数的值。在统计学中，参数通常是描述总体特征的数值，如总体均值、方差等。点估计的目标是通过样本数据估计出最可能的参数值。

22.1 矩估计法

设总体 X 的分布形式已知， θ 为总体的待估参数， X_1, X_2, \dots, X_n 为从总体 X 中抽取的样本，如果总体 X 的数学期望 $E(X)$ 存在，那么 $E(X)$ 是 θ 的函数。例如，在泊松分布总体 $\pi(\lambda)$ 中，样本一阶矩 $E(X) = \lambda$ ；在指数分布总体 $X \sim e(\lambda)$ 中， $E(X) = \frac{1}{\lambda}$ 。由于 X_1, X_2, \dots, X_n 相互独立且与总体 X 同分布，由大数定律知，当 n 越来越大时， $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ 依概率收敛到 $E(X) = h(\theta)$ 。要估计 θ ，令

$$E(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \bar{X}$$

解方程 $h(\theta) = \bar{X}$ ，可求出 θ ，此种方法所得的估计 $\hat{\theta}$ 称为未知参数 θ 的矩估计。

例 22.1.1. 设总体 $X \sim U(a, b)$ ， a, b 未知， X_1, X_2, \dots, X_n 为来自总体 X 的样本， x_1, x_2, \dots, x_n 是样本值，试求 a, b 的矩估计量和矩估计值。

令
$$\begin{cases} E(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \bar{X} \\ E(X^2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 \end{cases}, \text{ 且 } X \sim U(a, b), \text{ 那么}$$
$$E(X) = \frac{a+b}{2}, E(X^2) = D(X) + E^2(X) = \frac{(b-a)^2}{12} + \frac{(a+b)^2}{4}$$

$$\text{即 } \begin{cases} a+b=2\bar{X} \\ b-a=2\sqrt{3}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n X_i^2 - \bar{X}^2} \end{cases} \quad \text{并且 } \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n X_i^2 - \bar{X}^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \text{ 解得矩估计量和矩估计值分别为} \\ \begin{cases} \hat{a} = \bar{X} - \sqrt{\frac{3}{n}\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \\ \hat{b} = \bar{X} + \sqrt{\frac{3}{n}\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \end{cases} \quad \begin{cases} \hat{a} = \bar{x} - \sqrt{\frac{3}{n}\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ \hat{b} = \bar{x} + \sqrt{\frac{3}{n}\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \end{cases}$$

例 22.1.2. 设总体 X 的分布函数为 $F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-(x-\theta)^2}, & x \geq \theta \\ 0, & x < \theta \end{cases}$ ($\theta > 0$ 为未知数), X_1, X_2, \dots, X_n 为来自总体 X 的简单随机样本, $\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n X_i$, 求 θ 的矩估计量 $\hat{\theta}$.

总体 X 的密度函数为 $f(x) = \begin{cases} 2(x-\theta)e^{-(x-\theta)^2}, & x \geq \theta \\ 0, & x < \theta \end{cases}$, 那么

$$\begin{aligned} E(X) &= \int_0^{+\infty} x \cdot 2(x-\theta)e^{-(x-\theta)^2} dx = 2 \int_\theta^{+\infty} [(x-\theta)+\theta] \cdot (x-\theta)e^{-(x-\theta)^2} d(x-\theta) \\ &= 2 \int_0^{+\infty} x(x+\theta)e^{-x^2} dx = 2 \int_0^{+\infty} x^2 e^{-x^2} dx + \theta \int_0^{+\infty} e^{-x^2} d(x^2) \\ &\stackrel{x^2=t}{=} 2 \int_0^{+\infty} te^{-t} \cdot \frac{1}{2\sqrt{t}} dt + \theta = \int_0^{+\infty} t^{\frac{1}{2}} e^{-t} dt + \theta = \Gamma\left(\frac{1}{2}+1\right) + \theta = \frac{\sqrt{\pi}}{2} + \theta \end{aligned}$$

令 $E(X) = \bar{X}$ 得参数 θ 的矩估计量为 $\hat{\theta} = \bar{X} - \frac{\sqrt{\pi}}{2}$.

例 22.1.3. 设总体 X 的概率密度为 $f(x) = \begin{cases} 2(x-\theta)e^{-(x-\theta)^2}, & x > \theta \\ 0, & x \leq \theta \end{cases}$ (X_1, X_2, \dots, X_n) 为来自总体 X 的简单随机样本.

(1) 求参数 θ 的矩估计量;

(2) 设 $U = \min\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 求 $E(U)$.

(1) 与上题类似, 有

$$\begin{aligned} E(X) &= \int_\theta^{+\infty} x \cdot 2(x-\theta)e^{-(x-\theta)^2} dx \stackrel{x-\theta=t}{=} \int_0^{+\infty} (t+\theta) \cdot 2te^{-t^2} dt \\ &= \int_0^{+\infty} 2t^2 e^{-t^2} dt + \theta \int_0^{+\infty} 2te^{-t^2} dt = \int_0^{+\infty} (t^2)^{\frac{1}{2}} e^{-t^2} d(t^2) + \theta \int_0^{+\infty} e^{-t^2} d(t^2) \\ &= \Gamma\left(\frac{1}{2}+1\right) + \theta = \frac{1}{2}\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) + \theta = \theta + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \end{aligned}$$

由 $E(X) = \bar{X}$ 得参数 θ 的矩估计量为 $\hat{\theta} = \bar{X} - \frac{\sqrt{\pi}}{2}$.

(2) 总体 X 的分布函数为 $F(x) = P\{X \leq x\}$,

当 $x < \theta$ 时, $F(x) = 0$;

当 $x \geq \theta$ 时, $F(x) = \int_\theta^x 2(x-\theta)e^{-(x-\theta)^2} dx = 1 - e^{-(x-\theta)^2}$, 即

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < \theta \\ 1 - e^{-(x-\theta)^2}, & x \geq \theta \end{cases}$$

U 的分布函数为

$$\begin{aligned} F_U(x) &= P\{U \leq x\} = 1 - P\{U > x\} = 1 - P\{X_1 > x\} P\{X_2 > x\} \cdots P\{X_n > x\} \\ &= 1 - [P\{X > x\}]^n = 1 - [1 - F(x)]^n = \begin{cases} 0, & x < \theta \\ 1 - e^{-n(x-\theta)^2}, & x \geq \theta \end{cases} \end{aligned}$$

U 的密度函数为

$$f_U(x) = \begin{cases} 0, & x \leq \theta \\ 2n(x-\theta)e^{-n(x-\theta)^2}, & x > \theta \end{cases}$$

则

$$\begin{aligned} E(U) &= \int_{\theta}^{+\infty} 2nx(x-\theta)e^{-n(x-\theta)^2} dx = \int_{\theta}^{+\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{n}} [n(x-\theta)^2]^{\frac{1}{2}} + \theta \right] e^{-n(x-\theta)^2} d[n(x-\theta)^2] \\ &= \int_0^{+\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{n}} t^{\frac{1}{2}} + \theta \right) e^{-t} dt = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{2} + 1\right) + \theta = \frac{\sqrt{\pi n}}{2n} + \theta \end{aligned}$$

22.2 极大似然估计

极大似然估计法是参数估计使用的最广泛的方法, 最早由德国数学家 Gauss 在 1821 年提出, 但是此法一般归功于英国统计学家 Fisher, 因为 Fisher 于 1922 年再次提出了这个思想, 并且证明了这种方法的一些性质, 从而使得极大似然法得到更普遍的应用.

例 22.2.1. 设 $X_i, i = 1, 2, \dots, n$ 为来自总体 $X \sim B(N, p)$ ($0 < p < 1$) 的简单随机样本, 求 p 的极大似然估计量.

似然函数为 $L(p) = \prod_{i=1}^n C_N^{x_i} \cdot p^{x_i} \cdot (1-p)^{N-x_i}$, 两边取对数, 得

$$\ln L(p) = \sum_{i=1}^n \ln C_N^{x_i} + \sum_{i=1}^n x_i \ln p + \sum_{i=1}^n (N - X_i) \ln(1-p)$$

令

$$\frac{d}{dp} \ln L(p) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{1-p} \left(nN - \sum_{i=1}^n x_i \right) = 0$$

解得 $p = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{nN} = \frac{\bar{X}}{N}$, 故 p 的最大似然估计量为 $\hat{p} = \frac{\bar{X}}{N}$, 其中 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$.

例 22.2.2. 设总体概率函数如下, x_1, x_2, \dots, x_n 是样本, 试求未知参数的极大似然估计:

$$(1) \quad p(x; \theta) = \sqrt{\theta} x^{\sqrt{\theta}-1}, 0 < x < 1, \theta > 0;$$

$$(2) \quad p(x; \theta) = \theta c^\theta x^{-(\theta+1)}, x > c > 0, \theta > 1.$$

(1) 似然函数 $L(\theta) = (\sqrt{\theta})^n \left(\prod_{i=1}^n x_i \right)^{\sqrt{\theta}-1}$, 取对数得

$$\ln L(\theta) = \frac{n}{2} \ln \theta + (\sqrt{\theta} - 1) \sum_{i=1}^n \ln x_i$$

将 $\ln L(\theta)$ 关于 θ 求导, 并令其值为 0 即得到似然函数

$$\frac{\partial \ln L(\theta)}{\partial \theta} = \frac{n}{2\theta} + \frac{1}{2\sqrt{\theta}} \sum_{i=1}^n x_i = 0$$

解得 $\hat{\theta} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \right)^{-2}$, 并且

$$\frac{\partial^2 \ln L(\theta)}{\partial \theta^2} \Big|_{\theta=\hat{\theta}} = \left(-\frac{n}{2\theta^2} - \frac{1}{4\theta^{3/2}} \sum_{i=1}^n \ln x_i \right) \Big|_{\theta=\hat{\theta}} = -\frac{3}{4n^3} \left(\sum_{i=1}^n \ln x_i \right)^4 < 0$$

所以 $\hat{\theta}$ 是 θ 的极大似然估计.

(2) 似然函数 $L(\theta) = \theta^n c^{n\theta} \left(\prod_{i=1}^n x_i \right)^{-(\theta+1)}$, 取对数得

$$\ln L(\theta) = n \ln \theta + n\theta \ln c - (\theta + 1) \sum_{i=1}^n \ln x_i$$

将 $\ln L(\theta)$ 关于 θ 求导, 并令其值为 0 即得到似然函数

$$\frac{\partial \ln L(\theta)}{\partial \theta} = \frac{n}{\theta} + n \ln c - \sum_{i=1}^n \ln x_i = 0$$

解得 $\hat{\theta} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \ln c) \right]^{-1}$, 并且 $\frac{\partial^2 \ln L(\theta)}{\partial \theta^2} = \frac{-n}{\theta^2} < 0$, 所以 $\hat{\theta}$ 是 θ 的极大似然估计.

例 22.2.3 (2020 数一). 设某种元件的使用寿命 T 的分布函数为

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-(\frac{t}{\theta})^m}, & t \geq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中 m, θ 为参数且大于 0,

(1) 求概率 $P\{T > t\}$ 与 $P\{T > s+t \mid T > s\}$, 其中 $s, t > 0$;

(2) 任取 n 个这种元件做寿命试验, 测得它们的寿命分别为 t_1, t_2, \dots, t_n , 若 m 已知, 求 θ 的极大似然估计值 $\hat{\theta}$.

(1) 由 $P\{T > t\} = 1 - P\{T \leq t\}$, 所以 $P\{T > t\} = 1 - F(t) = e^{-(\frac{t}{\theta})^m}$, 并且

$$P\{T > s+t \mid T > s\} = \frac{P\{T > s+t, T > s\}}{P\{T > s\}} = \frac{P\{T > s+t\}}{P\{T > s\}}$$

所以 $P\{T > s+t \mid T > s\} = e^{-(\frac{s+t}{\theta})^m + (\frac{s}{\theta})^m}$, $s, t > 0$;

(2) 由 $f(t) = F'(t)$ 可得概率密度函数

$$f(t) = \begin{cases} \frac{mt^{m-1}}{\theta^m} e^{-(\frac{t}{\theta})^m}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$

对数似然函数为

$$\begin{aligned} \ln [L(\theta)] &= \ln \left[\prod_{i=1}^n f(t_i; \theta) \right] = \ln \left[\prod_{i=1}^n \frac{mt_i^{m-1}}{\theta^m} e^{-(\frac{t_i}{\theta})^m} \right] = \ln \left[\frac{m^n (t_1 t_2 \cdots t_n)^{m-1}}{\theta^{mn}} \cdot e^{-\frac{1}{\theta^m} \sum_{i=1}^n t_i^m} \right] \\ &= n \ln m + (m-1) \ln \prod_{i=1}^n t_i - mn \ln \theta - \frac{1}{\theta^m} \sum_{i=1}^n t_i^m \end{aligned}$$

求导得 $\frac{d \ln [L(\theta)]}{d \theta} = -\frac{mn}{\theta} + m \frac{1}{\theta^{m+1}} \sum_{i=1}^n t_i^m = 0$, 解得 $\frac{1}{\theta^m} \sum_{i=1}^n t_i^m = n$, 那么 θ 的极大似然估计值为 $\hat{\theta} =$

$$\sqrt[m]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^m}.$$

22.3 估计量优良性的判定标准

虽然总体分布中的参数是确定的,但是对于同一个参数,可以有许多不同的点估计.在这些估计中,我们自然地希望挑选一个最“优”的点估计,因此,有必要建立评价估计量优劣的标准.下面介绍几个常用的标准:无偏性、有效性和一致性.

22.3.1 无偏性

定义 22.3.1 (无偏性).若 $\hat{\theta} = \hat{\theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 是参数 θ 的估计量,其数学期望 $E(\hat{\theta})$ 存在,且 $E(\hat{\theta}) = \theta$,则称 $\hat{\theta}$ 是 θ 的无偏估计量.

例 22.3.1.已知 $E(X) = \mu, D(X) = \sigma^2$ 存在, X_1, X_2, \dots, X_n 为来自总体 X 的样本,试判定:

(1) \bar{X} 是否为 μ 的无偏估计量;

(2) $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ 是否为 σ^2 的无偏估计量.

由定义可知,

(1) 因为总体 $E(X) = \mu, D(X) = \sigma^2, X_1, X_2, \dots, X_n$ 为来自总体 X 的样本,则

$$E(X_i) = \mu, D(X_i) = \sigma^2, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

所以 $E(\bar{X}) = E\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(X_i) = \mu$, 所以 \bar{X} 为 μ 的无偏估计量.

(2) 因为 $D(\bar{X}) = D\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i\right) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n D(X_i) = \frac{\sigma^2}{n}$, 所以

$$E(\bar{X}^2) = D(\bar{X}) + E^2(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{n} + \mu^2, \quad E(X_i^2) = D(X_i) + E^2(X_i) = \sigma^2 + \mu^2$$

$$\begin{aligned} E\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2\right] &= E\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 - \bar{X}^2\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(X_i^2) - E(\bar{X}^2) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu^2 + \sigma^2) - \left(\frac{\sigma^2}{n} + \mu^2\right) = \frac{n-1}{n} \sigma^2 \end{aligned}$$

所以 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ 不是 σ^2 的无偏估计量.

由例题 22.3.1 可以看出,如果在 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ 前面乘以系数 $\frac{n}{n-1}$,就修正成为 σ^2 的无偏估计量.由此也解释了在定义样本方差时,我们之所以选择 $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$,而不是 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ 形式,是因为 S^2 是 σ^2 的无偏估计量.

22.3.2 有效性

同一个参数可以有多个无偏估计量,那么选择哪一个为好呢?设参数 θ 有两个无偏估计量 $\hat{\theta}_1$ 和 $\hat{\theta}_2$,在样本容量 n 相同的情况下,若 $\hat{\theta}_1$ 的观测值都集中在 θ 的真值附近,而 $\hat{\theta}_2$ 的观测值较远离 θ 的真值,

很显然 $\hat{\theta}_1$ 作为 θ 的估计更合适. 即 $\hat{\theta}_1$ 的方差较 $\hat{\theta}_2$ 的方差小, 我们认为 $\hat{\theta}_1$ 较 $\hat{\theta}_2$ 要好, 由此有如下的定义.

定义 22.3.2 (有效性). 设 $\hat{\theta}_1 = \hat{\theta}_1(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 与 $\hat{\theta}_2 = \hat{\theta}_2(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 都是参数 θ 的无偏估计量, 若 $D(\hat{\theta}_1) \leq D(\hat{\theta}_2)$, 则称 $\hat{\theta}_1$ 较 $\hat{\theta}_2$ 更有效.

22.3.3 一致性

无偏性和有效性都是在假设样本容量 n 固定的条件下讨论的. 由于估计量是样本的函数, 它依赖样本容量 n , 自然地, 我们希望一个好的估计量, 当 n 越来越大时, 它与参数的真值几乎一致, 这就是估计量的一致性或称之为相合性.

定义 22.3.3 (一致性). 设 $\hat{\theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为参数 θ 的估计量, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\hat{\theta}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 概率收敛于 θ , 即对于任意 $\varepsilon > 0$, 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left\{|\hat{\theta} - \theta| < \varepsilon\right\} = 1$$

则称 $\hat{\theta}$ 为 θ 的相合估计量.

第 A 章

积分表推导

A.1 含有 $ax + b$ 的积分

i. $\int \frac{dx}{ax+b} = \frac{1}{a} \ln |ax+b| + C.$

ii. $\int (ax+b)^n dx = \frac{(ax+b)^{n+1}}{a(n+1)} + C.$

iii. $\int \frac{x}{ax+b} dx = \frac{1}{a} \int \frac{ax+b}{ax+b} dx - \frac{b}{a} \int \frac{dx}{ax+b} = \frac{x}{a} - \frac{b}{a^2} \ln |ax+b| + C.$

iv.
$$\begin{aligned} \int \frac{x^2}{ax+b} dx &= \int \left(\frac{1}{a}x - \frac{b}{a^2} \right) dx + \frac{b^2}{a^2} \int \frac{dx}{ax+b} \\ &= \frac{1}{a} \int x dx - \frac{b}{a^2} \int dx + \frac{b^2}{a^2} \int \frac{dx}{ax+b} = \frac{1}{2a}x^2 - \frac{b}{a^2}x + \frac{b^2}{a^3} \ln |ax+b| + C. \end{aligned}$$
$$\begin{array}{r} \frac{\frac{1}{a}x - \frac{b}{a^2}}{|x^2|} \\ ax+b \\ \frac{x^2 + \frac{b}{a}x}{-\frac{b}{a}x} \\ \hline -\frac{b}{a}x - \frac{b^2}{a^2} \\ \hline \frac{b^2}{a^2} \end{array}$$

v. 设 $\frac{1}{x(ax+b)} = \frac{A}{x} + \frac{B}{ax+b} \Rightarrow \begin{cases} A = \frac{1}{b} \\ B = -\frac{a}{b} \end{cases}$, 于是 $\int \frac{dx}{x(ax+b)} = \frac{1}{b} \int \frac{dx}{x} - \frac{a}{b} \int \frac{dx}{ax+b}$, 故
$$\int \frac{dx}{x(ax+b)} = \frac{1}{b} \ln|x| - \frac{a}{b} \cdot \frac{1}{a} \ln|ax+b| + C = \frac{1}{b} \ln \left| \frac{x}{ax+b} \right| + C.$$

vi. 设 $\int \frac{dx}{x^2(ax+b)} = \frac{A}{x} + \int \left(\frac{B}{x} + \frac{C}{ax+b} \right) dx$, 等式两边同时求导, 并对比等式两边分子的系数, 得

$$\begin{cases} Ba + C = 0 \\ -Aa + Bb = 0 \\ -Ab = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = -\frac{1}{b} \\ B = -\frac{a}{b^2} \\ C = \frac{a^2}{b^2} \end{cases}$$

于是

$$\int \frac{dx}{x^2(ax+b)} = -\frac{1}{bx} - \frac{a}{b^2} \ln|x| + \frac{a}{b^2} \ln|ax+b| + C.$$

vii. 设 $\int \frac{dx}{x(ax+b)^2} = \frac{A}{ax+b} + \int \left(\frac{B}{ax+b} + \frac{C}{x} \right) dx$, 等式两边同时求导, 并对比等式两边分子的系数, 得

$$\begin{cases} Ba + Ca^2 = 0 \\ -Aa + Bb + 2Cab = 0 \\ Cb^2 = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = \frac{1}{b} \\ B = -\frac{a}{b^2} \\ C = \frac{1}{b^2} \end{cases}$$

于是

$$\int \frac{dx}{x(ax+b)^2} = \frac{1}{b(ax+b)} - \frac{1}{b^2} \ln |ax+b| + \frac{1}{b^2} \ln |x| + C = \frac{1}{b(ax+b)} + \frac{1}{b^2} \ln \left| \frac{x}{ax+b} \right| + C.$$

A.2 含有 $\sqrt{ax+b}$ 的积分

- i. $\int \sqrt{ax+b} dx = \frac{1}{a} \int \sqrt{ax+b} d(ax+b) = \frac{2}{3a} (ax+b)^{\frac{3}{2}} + C.$
- ii. $\int x \sqrt{ax+b} dx \stackrel{ax+b=z^2}{=} \frac{2}{a^2} \int z^2 (z^2 - b) dz = \frac{2}{a^2} \int (z^4 - bz^2) dz = \frac{2z^5}{5a^2} - \frac{2b}{3a^2} z^3 + C = \frac{2}{5a^2} (ax+b)^{\frac{5}{2}} - \frac{2b}{3a^2} (ax+b)^{\frac{3}{2}} + C.$
- iii. $\int x^2 \sqrt{ax+b} dx \stackrel{ax+b=z^2}{=} \frac{2}{a^3} \int z^2 (z^2 - b)^2 dz = \frac{2}{a^3} \left(\frac{1}{7} z^7 - \frac{2b}{5} z^5 + \frac{b^3}{3} z^3 \right) + C = \frac{2}{7a^3} (ax+b)^{\frac{7}{2}} - \frac{2b}{5} (ax+b)^2 + \frac{b^2}{3} (ax+b)^{\frac{3}{2}} + C.$
- iv. $\int \frac{x}{\sqrt{ax+b}} dx \stackrel{ax+b=z^2}{=} \frac{2}{a^2} \int (z^2 - b) dz = \frac{2}{3a^2} z^3 - \frac{2b}{a^2} z + C = \frac{2}{3a^2} (ax+b)^{\frac{3}{2}} - \frac{2b}{a^2} (ax+b)^{\frac{3}{2}} + C.$
- v. $\int \frac{x^2}{\sqrt{ax+b}} dx \stackrel{ax+b=z^2}{=} \frac{2}{a^3} \int (z^2 - b)^2 dz = \frac{2}{5a^3} (ax+b)^{\frac{5}{2}} - \frac{4b}{3a^3} (ax+b)^{\frac{3}{2}} + \frac{2b^2}{a^3} (ax+b)^{\frac{1}{2}} + C.$
- vi. $\int \frac{dx}{x\sqrt{ax+b}} \stackrel{ax+b=z^2}{=} 2 \int \frac{dz}{z^2 - b} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{b}} \ln \left| \frac{\sqrt{ax+b} - \sqrt{b}}{\sqrt{ax+b} + \sqrt{b}} \right| + C & , b > 0 \\ \frac{2}{\sqrt{-b}} \arctan \sqrt{\frac{ax+b}{-b}} + C & , b < 0 \end{cases}.$
- vii. $\int \frac{dx}{x^2\sqrt{ax+b}} \stackrel{ax+b=z^2}{=} 2a \int \frac{dz}{(z^2 - b)^2} = -\frac{a}{b} \left(\frac{z}{z^2 - b} + \int \frac{dz}{z^2 - b} \right) = -\frac{\sqrt{ax+b}}{bx} - \frac{a}{2b} \int \frac{dx}{x\sqrt{ax+b}}.$
- viii. $\int \frac{\sqrt{ax+b}}{x} dx \stackrel{ax+b=z^2}{=} 2 \int \frac{z^2}{z^2 - b} dz = 2 \int dz + 2b \int \frac{dz}{z^2 - b} = 2\sqrt{ax+b} + b \int \frac{dx}{x\sqrt{ax+b}}.$
- ix. $\int \frac{\sqrt{ax+b}}{x^2} dx = \int \sqrt{ax+b} d\frac{1}{x} = \frac{\sqrt{ax+b}}{x} - \frac{a}{2} \int \frac{dx}{x\sqrt{ax+b}}.$

A.3 含有 $x^2 \pm a^2$ 的积分

- i. $\int \frac{dx}{x^2 + a^2} \stackrel{x=a\tan t}{=} \frac{1}{a} \int dt = \frac{t}{a} + C = \frac{1}{a} \arctan \frac{x}{a} + C.$
- ii. $\int \frac{dx}{x^2 - a^2} = \frac{1}{2a} \int \left(\frac{1}{x-a} - \frac{1}{x+a} \right) dx = \frac{1}{2a} \ln \left| \frac{x-a}{x+a} \right| + C.$

A.4 含有 $ax^2 + b$ ($a > 0$) 的积分

- i. $\int \frac{dx}{ax^2 + b} = \begin{cases} \frac{1}{a} \int \frac{dx}{x^2 + \left(\sqrt{\frac{b}{a}}\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{ab}} \arctan \sqrt{\frac{a}{b}} x + C & (b > 0). \\ \frac{1}{a} \int \frac{dx}{x^2 - \left(\sqrt{\frac{-b}{a}}\right)^2} = \frac{1}{2\sqrt{-ab}} \ln \left| \frac{\sqrt{ax} - \sqrt{-b}}{\sqrt{ax} + \sqrt{-b}} \right| + C & (b < 0). \end{cases}$
- ii. $\int \frac{x}{ax^2 + b} dx = \frac{1}{2a} \int \frac{d(ax^2 + b)}{ax^2 + b} = \frac{1}{2a} \ln |ax^2 + b| + C.$
- iii. $\int \frac{x^2}{ax^2 + b} dx = \frac{1}{a} \int \frac{ax^2 + b}{ax^2 + b} dx - \frac{b}{a} \int \frac{dx}{ax^2 + b} = \frac{x}{a} - \frac{b}{a} \int \frac{dx}{ax^2 + b}.$
- iv. $\int \frac{dx}{x(ax^2 + b)} = \frac{1}{b} \int \frac{dx}{x} - \frac{a}{b} \int \frac{x}{ax^2 + b} dx = \frac{1}{b} \ln |x| - \frac{1}{2b} \ln |ax^2 + b| + C.$

$$\text{v. } \int \frac{dx}{x^2(ax^2+b)} = \frac{1}{b} \int \frac{dx}{x^2} - \frac{a}{b} \int \frac{dx}{ax^2+b} - \frac{1}{bx} - \frac{a}{b} \int \frac{dx}{ax^2+b}.$$

$$\text{vi. } \int \frac{dx}{x^3(ax^2+b)}$$

$$\text{vii. } \int \frac{dx}{(ax^2+b)^2}$$

A.5 含有 $ax^2 + b + c$ ($a > 0$) 的积分

索引

- Abel 定理, 312
Cauchy 不等式, 112
Cauchy 定理, 84
Cauchy-Schwarz 不等式, 172
Darboux 定理, 85
Dirichlet 定理, 190
Dirichlet 收敛定理, 327
Dirichlet 积分等式, 191
Euler 积分, 184
Fourier 展开, 328
Fresnel 积分等式, 191
Frullani 积分定理, 187
Gauss 公式, 289
Heine 定理, 28
Hesse 矩阵与极值定理, 234
Jensen 不等式, 113
L'Hospital 法则, 27
Lagrange 中值定理, 40
Lagrange 定理, 84
Lagrange 恒等式, 203
Laplace 积分等式, 192
Leibniz 定理, 308
Lobachevsky 积分法, 191
p-级数, 306
Rolle 定理, 84
Stokes 积分法, 296
Taylor 展开式, 80
三重积分分部积分公式, 287
不动点迭代, 61
不等分积分与极限式, 49
两点三次 Hermite 插值, 108
二元函数取极值的充分条件, 233
二元函数取极值的必要条件, 233
二元函数的 Taylor 展开唯一性, 218
二重外积公式, 203
二重积分中值定理, 258
二重积分分部积分公式, 276
二阶常系数线性齐次微分方程的通解结构, 338
偶倍奇零性, 281
全微分的形式不变性, 222
共面条件, 203
减法无穷小代换, 14
几何级数, 306
函数 Stolz 定理, 55
函数极限的保号性, 12
函数极限的充要条件, 12
函数极限的唯一性, 12
函数极限的有界性, 12
函数的单调性判定, 3
函数的可导性与连续性, 73
函数的周期性定理, 3
函数的有界性定理, 3
函数连续的充要条件, 5
分式极限的关系, 19
分离性定理, 113
分部和公式, 311
切平面方程, 206
割线定理, 9
加法性质, 66
区间再现公式, 147
单调有界准则, 60
压缩映射, 60
双阶乘与阶乘的转化, 26
反函数的导数, 74
反常积分的区间再现公式, 180
变换性质, 67
含参变量积分求导公式, 257
含绝对值函数的可导性, 82
周期函数的定积分公式, 146
均值不等式, 111
均方逼近, 330
夹逼准则, 12
夹逼准则的函数形式, 20
奇偶次项幂级数的收敛半径, 312
定积分与极限式, 46
对数平均不等式 (ALG), 110
对称区间上的积分公式, 145
对称性质, 190
差商与导数的关系, 102
带 Lagrange 余项的 Taylor 展开, 96

- 常系数线性齐次递推定理, 68
 幂级数的性质, 313
 幂级数的运算性质, 312
 平面图形面积公式, 153
 平面曲线弧长公式, 155
 拐点存在的必要条件, 114
 数列极限的保号性, 12
 数列极限的唯一性, 11
 数列极限的有界性, 11
 数列的 Stolz 定理, 51
 数列的单调有界准则, 13
 方向导数与 Hamilton 算符, 302
 方向导数与梯度的关系, 240
 方向导数的计算, 239
 旋转体的体积公式, 154
 旋转体的侧面积公式, 153
 无穷小量的乘法, 30
 无穷小量的传递性, 30
 无穷小量的加法, 30
 曲率的计算公式, 115
 极限值与函数式的转换, 19
 根值审敛法, 307
 正项级数收敛的充要条件, 307
 比值审敛法, 307
 比较审敛法, 307
 比较审敛法的极限形式, 307
 法线方程, 206
 物体的质心, 262
 物体的质量, 261
 用参数方程确定的函数的导数, 74
 留数定理, 193
 积分判别法, 308
 积分因子的存在性定理, 337
 移位性质, 66
 空间曲线绕直线旋转的曲面方程, 209
 第一型余元公式, 190
 第一型曲面积分化为二重积分, 282
 第一型递推性质, 190
 第一分中值定理, 150
 第二型余元公式, 189
 第二型倍元公式, 190
 第二型曲面积分的分部积分公式, 289
 第二型递推性质, 189
 第二积分中值定理, 152
 等价无穷小的充要条件, 30
 等价积分, 45
 算子特性, 341
 级数收敛的必要条件, 306
 线轴夹角余弦平方和公式, 203
 线面夹角余弦平方和公式, 204
 调和级数, 306
 路径无关, 275
 转动惯量, 262
 通解公式, 334
 重积分的对称性, 252
 阶乘与阶乘幂, 310
 隐函数存在定理, 220
 隐函数的导数, 74
 高阶常系数线性齐次微分方程通解结构, 339
 高阶幂展开式, 131

参考文献

- [1] Б.П.吉米多维奇数学分析习题集题解第四版 1
- [2] Б.П.吉米多维奇数学分析习题集题解第四版 2
- [3] Б.П.吉米多维奇数学分析习题集题解第四版 3
- [4] Б.П.吉米多维奇数学分析习题集题解第四版 4
- [5] Б.П.吉米多维奇数学分析习题集题解第四版 5
- [6] Б.П.吉米多维奇数学分析习题集题解第四版 6
- [7] 常微分方程第三版
- [8] 常微分方程学习辅导与习题解答
- [9] 大学生数学竞赛教程
- [10] 高等代数典型问题与方法
- [11] 高等数学竞赛题解析教程 (2022)
- [12] 高等数学一题多解 300 例
- [13] 高等数学证明题 500 例解析
- [14] 全国大学生数学竞赛辅导
- [15] 数学大辞典
- [16] 数学分析中的典型问题与方法 (第三版)
- [17] 线性代数、概率论与数理统计证明题 500 例解析
- [18] 线性代数第二版