

Study Notes of Principles of Mathematical Analysis

Jacob Xie

January 18, 2023

1 The Real and Complex Number Systems

Ordered Sets

1.7 Definition Suppose S is an ordered set, $E \subset S$, and E is bounded above. Suppose there exists an $\alpha \in S$ with the following properties:

- (i) α is an upper bound of E .
- (ii) If $\gamma < \alpha$ the γ is not an upper bound of E .

Then α is called the *least upper bound of E* or the *supremum of E* , and we write

$$\alpha = \sup E$$

The *greatest lower bound*, or *infimum*, of a set E which is bounded below is defined in the same manner: The statement

$$\alpha = \inf E$$

means that α is a lower bound of E and that no β with $\beta > \alpha$ is a lower bound of E .

Note

- S 是有序集合的情况下, E 又是属于 S 的, 并且 E 拥有上界。那么只会存在一个 α 是 E 的最小上界。同理如果是 E 拥有下界, 只会存在一个 α 是 E 的最大下界。
- 上确界 Supremum [su:'pri:məm]; 下确界 Infimum ['ɪnfɪməm]。

1.10 Definition An ordered set S is said to have the *least-upper-bound property* if the following is true: If $E \subset S$, E is not empty, and E is bounded above, then $\sup E$ exists in S .

Note

S 中存在 $E \subset S$, 且 E 具有最小上界, 那么 S 就具有最小上界性, 反之亦然。

1.11 Theorem Suppose S is an ordered set with the least-upper-bound property, $B \subset S$, B is not empty, and B is bounded below. Let L be the set of all lower bounds of B . Then $\alpha = \sup L$ exists in S , and $\alpha = \inf B$. In particular, $\inf B$ exists in S .

Proof.

因为 B 是有下界的, 且 L 不为空。由于 L 包含了所有的 y ($y \in S$) 且满足不等式 $y \leq x$ ($x \in B$), 那么所有的 $x \in B$ 都是 L 的上界。因此 L 是有上界的。关于 S 的假设意为在 S 中有一个 L 的最小上界, 被称为 α 。

如果 $\gamma < \alpha$ 那么 (根据 Definition 1.8) γ 并不是 L 的一个上界, 因此 $\gamma \notin B$ 。对于所有的 $x \in B$ 都有 $\alpha \leq x$ 。因此 $\alpha \in L$ 。

如果 $\alpha < \beta$ 那么 $\beta \notin L$, 因为 α 是 L 的一个上界。

我们展示过了 $\alpha \in L$ 但是 $\beta \notin L$ 而 $\beta > \alpha$ 的情况。也就是说, α 是 B 的一个下界, 但是当 $\beta > \alpha$ 时 β 却不是。这就意味着 $\alpha = \inf B$ 。 \square

Fields

1.12 Definition A field is a set F with two operations, called *addition* and *multiplication*, which satisfy the following so-called "field axioms" (A), (M), and (D):

(A) Axioms for addition

- (A1) If $x \in F$ and $y \in F$, then their sum $x + y$ is in F .
- (A2) Addition is commutative: $x + y = y + x$ for all $x, y \in F$.
- (A3) Addition is associative: $(x + y) + z = x + (y + z)$ for all $x, y, z \in F$.
- (A4) F contains an element 0 such that $0 + x = x$ for every $x \in F$.
- (A5) To every $x \in F$ corresponds an element $-x \in F$ such that $x + (-x) = 0$.

(M) Axioms for multiplication

- (M1) If $x \in F$ and $y \in F$, then their product xy is in F .
- (M2) Multiplication is commutative: $xy = yx$ for all $x, y \in F$.
- (M3) Multiplication is associative: $(xy)z = x(yz)$ for all $x, y, z \in F$.
- (M4) F contains an element $1 \neq 0$ such that $1x = x$ for every $x \in F$.
- (M5) If $x \in F$ and $x \neq 0$ then there exists an element $\frac{1}{x} \in F$ such that $x \cdot (\frac{1}{x}) = 1$.

(D) The distributive law

$x(y + z) = xy + xz$ holds for all $x, y, z \in F$.

Note

域的定义：维基百科。

1.17 Definition An *ordered field* is a field F which is also an ordered set, such that:

1. $x + y < x + z$ if $x, y, z \in F$ and $y < z$,
2. $xy > 0$ if $x \in F, y \in F, x > 0$, and $y > 0$.

如果 $x > 0$, 我们称 x 为 *positive*; 如果 $x < 0$, x 则为 *negative*。

The Real Field

1.19 Theorem *There exists an ordered field R which has the least-upper-bound property. Moreover, R contains Q as a subfield.*

第二个声明意味着 $Q \subset R$ 以及加法与乘法在 R 上的运算, 当应用于 Q 的成员时, 与有理数的通常操作重合; 同样的, 正有理数成员是 R 的正元素。

R 的成员被称为 *real numbers*, 即实数。

1.20 Theorem

- (a) *If $x \in R, y \in R$, and $x > 0$, then there is a positive integer n such that $nx > y$.*
- (b) *If $x \in R, y \in R$, and $x < y$, then there exists a $p \in Q$ such that $x < p < y$.*

对于 (a) 部分通常认为是 R 具有 *archimedean property*, 即阿基米德性质, 详见维基百科。
(b) 部分则表明 Q 是在 R 中 *dense*, 即具有稠密性: 在任意两个实数之间有一个有理数。

Proof.

- (a) 令 A 作为所有 nx 的集合, 其中 n 为所有的正整数。如果 (a) 是错误的, 那么 y 则会是 A 的一个上界。但是接着 A 会在 R 中拥有一个最小上界, 即 $\alpha = \sup A$ 。由于 $x > 0$, $\alpha - x < \alpha$, 以及 $\alpha - x$ 不是 A 的上界, 因此 $\alpha - x < mx$ 对于某些正整数 m 成立。但是这样就会有 $\alpha < (m+1)x \in A$, 这是不可能的, 因为 α 是 A 的上界。
- (b) 因为 $x < y$, $y - x > 0$ 以及由 (a) 所知一个正整数 n 满足

$$n(y - x) > 1$$

再次应用 (a), 获取正整数 m_1 与 m_2 满足 $m_1 > nx$, $m_2 > -nx$, 那么

$$-m_2 < nx < m_1$$

因此会有一个整数 m ($-m_2 \leq m \leq m_1$) 满足

$$m - 1 \leq nx \leq m$$

如果我们结合这些不等式，则会得到

$$nx < m \leq 1 + nx < ny$$

因为 $n > 0$ ，它遵循

$$x < \frac{m}{n} < y$$

通过 $p = \frac{m}{n}$ 证明了 (b)。

□

Note

(b) 的第一步将 $y - x$ 作为整体，将 (a) $nx > y$ 中的 x 替换为 $y - x$ ， y 替换为 1。同理对于整数 m_1 与 m_2 而言，可分别将 nx 与 $-nx$ 视为不等式右侧的 y ，而不等式左侧的 x 视为 1，那么就有了 $m_1 \cdot 1 > nx$ 与 $m_2 \cdot 1 > -nx$ 。对于整数 m 的 $-m_2 \leq m \leq m_1$ 最坏的情况可将 $-m_2$ 与 m_1 视为相邻的整数，比如说 1 和 2，那么当 m 取值为 2 时视为 $2 - 1 \leq nx < 2$ ，满足 $m - 1 \leq nx < m$ 。最后根据有理数的定义 $p = m/n$ $m, n \in \mathbb{Q}$ 可以得出 x 与 y 之间一定存在一个有理数。

1.21 Theorem For every real $x > 0$ and every integer $n > 0$ there is one and only one positive real y such that $y^n = x$.

这个 y 数可以被写作 $\sqrt[n]{x}$ 或是 $x^{\frac{1}{n}}$ 。

Proof.

对于至多存在一个 y 的论证很简单，因为 $0 < y_1 < y_2$ 意味着 $y_1^n < y_2^n$ 。

令 E 为所有满足 $t^n < x$ 的正实数 t 的集合。

如果 $t = x/(1+x)$ 那么 $0 \leq t < 1$ ，那么 $t^n \leq t < x$ 。因此 $t \in E$ ，且 E 不为空。

如果 $t > 1+x$ 那么 $t^n \geq t > x$ ，所以 $t \notin E$ 。因此 $1+x$ 是 E 的一个上界。

所以根据 Theorem 1.19 得出，存在一个

$$y = \sup E$$

而证明 $y^n = x$ 我们需要展示不等式 $y^n < x$ 与 $y^n > x$ 皆会导致矛盾。

当 $0 < a < b$ 时，等式 $b^n - a^n = (b-a)(b^{n-1} + b^{n-2}a + \cdots + a^{n-1})$ 得出不等式

$$b^n - a^n < (b-a)nb^{n-1}$$

假设 $y^n < x$ 。选择 h 使得 $0 < h < 1$ 且

$$h < \frac{x - y^n}{n(y+1)^{n-1}}$$

令 $a = y$, $b = y + h$, 那么就有

$$(y+h)^n - y^n < hn(y+h)^{n-1} < hn(y+1)^{n-1} < x - y^n$$

因此 $(y+h)^n < x$, 且 $y+h \in E$ 。因为 $y+h > y$, 这与 y 是 E 的一个上界相矛盾。

假设 $y^n > x$ 。令

$$k = \frac{y^n - x}{ny^{n-1}}$$

那么 $0 < k < y$ 。如果 $t \geq y - k$, 我们得出以下结论:

$$y^n - t^n \leq y^n - (y-k)^n \leq kny^{n-1} = y^n - x$$

因此 $t^n > x$, 且 $t \notin E$ 。它遵循 $y-k$ 是 E 的一个上界。

但是因为 $y-k < y$, 其与 y 是 E 的最小上界的事实相矛盾。

因此 $y^n = x$, 证明完成。 □

Note

至多存在一个 y 换个角度也就是说但凡有第二个 y 使得 $y_1^n = y_2^n$, 那么 $y_1 = y_2$ 。
等式

$$b^n - a^n = (b-a)(b^{n-1} + b^{n-2}a + \cdots + a^{n-1})$$

左侧可以视为

$$(b-a)(b^{n-1} + b^{n-1}\frac{a}{b} + \cdots + b^{n-1}\frac{a}{b^{n-1}})$$

提取 b^{n-1} 后得

$$(b-a)b^{n-1}(1 + \frac{a}{b} + \cdots + \frac{a^{n-1}}{b^{n-1}})$$

由于有 $0 < a < b$ 这么一个前提, 可以将第三项变为

$$1 + \frac{a}{b} + \cdots + \frac{a^{n-1}}{b^{n-1}} < 1 + 1 + \cdots + 1 = n$$

因此可得不等式

$$b^n - a^n < (b-a)nb^{n-1}$$

至于在证明 $y^n < x$ 不成立时, 选择 h 的 $h < \frac{x-y^n}{n(y+1)^{n-1}}$ 分母为什么是 $n(y+1)^{n-1}$, 是因为这是为了之后处理不等式而特意设置的消除项 (这里利用了函数 $f(x) = x^n$ 是连续的事实, 也就是说分母一定也是实数, 那么就可以将 h 视为小于某实数); 同样的在证明 $y^n > x$ 时的 k 也是如此。

Corollary If a and b are positive real numbers and n is a positive integer, then

$$(ab)^{1/n} = a^{1/n}b^{1/n}$$

Proof.

令 $\alpha = a^{1/n}$, $\beta = b^{1/n}$, 那么有

$$ab = \alpha^n \beta^n = (\alpha\beta)^n$$

而乘法是符合交换律的, 因此

$$(ab)^{1/n} = \alpha\beta = a^{1/n}b^{1/n}$$

□

The Extended Real Number System

1.23 Definition The extended real number system consists of the real field R and two symbols, $+\infty$ and $-\infty$. We preserve the original order in R , and define

$$-\infty < x < +\infty$$

for every $x \in R$.

可以清楚的知道 $+\infty$ 是所有广义实数系子集的一个上界, 且每个非空子集都有一个最小上界。如果 E 是一个实数的非空集合, 且没有上界在 R 中, 那么 $\sup E = +\infty$ 在广义实数系中。下界同理。

广义实数系并不形成一个域, 但它形成了一下惯例:

(a) 如果 x 是实数则

$$x + \infty = +\infty, \quad x - \infty = -\infty, \quad \frac{x}{+\infty} = \frac{x}{-\infty} = 0$$

(b) 如果 $x > 0$ 则 $x \cdot (+\infty) = +\infty$, $x \cdot (-\infty) = -\infty$

(c) 如果 $x < 0$ 则 $x \cdot (+\infty) = -\infty$, $x \cdot (-\infty) = +\infty$

The Complex Field

1.24 Definition A complex number is an ordered pair (a, b) of real numbers. "Ordered" means that (a, b) and (b, a) are regarded as distinct if $a \neq b$.

令 $x = (a, b)$, $y = (c, d)$ 为两个复数。当且仅当 $a = c$ 以及 $b = d$ 时有 $x = y$ 。(注意该定义并非是完全不必要的；考虑有理数的等式，表现为整数的商。) 我们定义：

$$x + y = (a + c, b + d)$$

$$xy = (ac - bd, ad + bc)$$

Note

作为补充（详见该篇文章），对于任意两个复数 $x = (a, b)$, $y = (c, d)$ 的四则运算：

$$(1) \quad x + y = (a + c) + i(b + d)$$

$$(2) \quad x - y = (a - c) + i(b - d)$$

$$(3) \quad xy = (a + ib)(c + id) = ac - bd + i(ad + bc)$$

$$(4) \quad \frac{x}{y} = \frac{(a+ib)(c-id)}{(c+id)(c-id)} = \frac{(ac+bd)+i(bc-ad)}{c^2+d^2}$$

首先，对于任意一个复数 $z = a + ib$ ，可以用复平面上的一点来表示，那么复数加减法可以通过向量来理解：

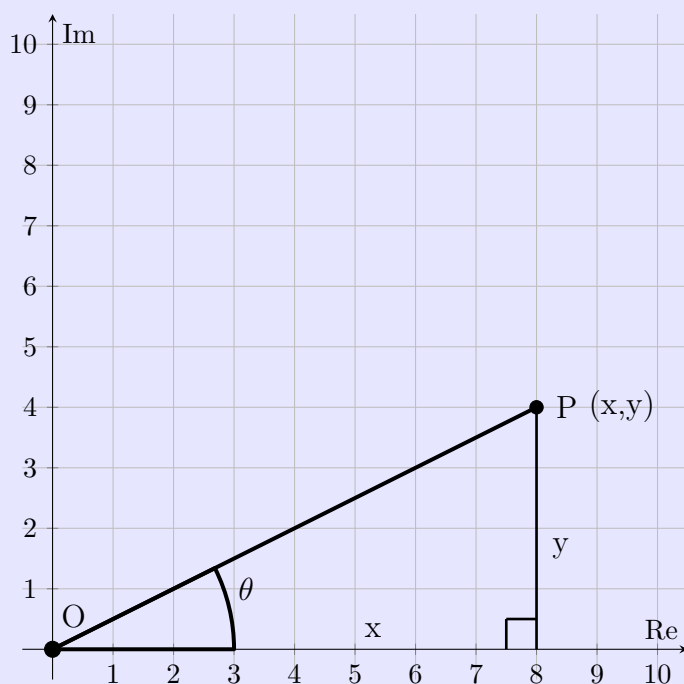




而对于复数的乘除法，需要先引入复数在极坐标上的几何意义 – 对于任意一个复数 $z = a + ib$ 用极坐标来表示：



那么复数的三角表示为:



这里将 OP 的长度作为复数 z 的**模 (Modulus)**，用 $|z|$ 表示；而角 θ 为复数 z 的**幅角 (Argument)**，用 $\arg(z)$ 表示。那么复数的三角表示为：

$$z = x + iy = r(\cos \theta + i \sin \theta), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \tan \theta = \frac{y}{x}$$

接下来是复数乘法的几何意义，使用复数的三角形式计算下列两个复数的乘积：

$$z_1 = r_1(\cos \theta_1 + i \sin \theta_1)$$

$$z_2 = r_2(\cos \theta_2 + i \sin \theta_2)$$

那么有：

$$\begin{aligned} z_1 z_2 &= r_1 r_2 (\cos \theta_1 + i \sin \theta_1)(\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) \\ &= r_1 r_2 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 + i(\sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \theta_1 \sin \theta_2)) \end{aligned}$$

那么根据三角和差公式：

$$z_1 z_2 = r_1 r_2 (\cos(\theta_1 + \theta_2) + i \sin(\theta_1 + \theta_2))$$

可以发现 $z_1 \cdot z_2$ 计算后模为两个复数模的乘积 $|z_1||z_2|$ ，幅角为两个复数幅角之和 $\arg(z_1 z_2) = \arg(z_1) + \arg(z_2)$ 。因此复数的乘积可以理解为**拉伸与旋转**。例如：



因为

$$z_1 = \sqrt{2}(\cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4}), \quad z_2 = 1(\cos \frac{\pi}{2} + i \sin \frac{\pi}{2})$$

所以 $z_1 z_2$ 的模长为 $\sqrt{2}$ 且幅角为 $\frac{3\pi}{4}$ 。而复数的除法只需要将除法写成乘法形式即可

$$\begin{aligned} z^{-1} &= (r(\cos \theta + i \sin \theta))^{-1} \\ &= r^{-1} \frac{1}{\cos \theta + i \sin \theta} \\ &= r^{-1} \frac{\cos \theta - i \sin \theta}{(\cos \theta + i \sin \theta)(\cos \theta - i \sin \theta)} \\ &= r^{-1}(\cos \theta - i \sin \theta) \end{aligned}$$

那么两个复数

$$\begin{aligned} z_1 &= r_1(\cos \theta_1 + i \sin \theta_1) \\ z_2 &= r_2(\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) \end{aligned}$$

的除法便是

$$\begin{aligned} \frac{z_1}{z_2} &= z_1 z_2^{-1} \\ &= \frac{r_1}{r_2}(\cos \theta_1 + i \sin \theta_1)(\cos \theta_1 - i \sin \theta_1) \\ &= \frac{r_1}{r_2}(\cos(\theta_1 - \theta_2) + i \sin(\theta_1 - \theta_2)) \end{aligned}$$

因此, $\frac{z_1}{z_2}$ 的模长为两个模相除 $\frac{|z_1|}{|z_2|}$, 幅角为 $\arg(\frac{z_1}{z_2}) = \arg(z_1) - \arg(z_2)$ 。所以复数的除法也可以理解为**拉伸与旋转**。

综上所述, 复数的加减法就是向量的加减法, 乘除法就是拉伸与旋转变换。

1.25 Theorem *These definitions of addition and multiplication turn the set of all complex numbers into a field, with $(0, 0)$ and $(1, 0)$ in the role of 0 and 1.*

Proof.

我们简单的验证一下域的公理 (Definition 1.12), 使用 R 的域结构。令 $x = (a, b), y = (c, d), z = (e, f)$ 。

(A1) 很清楚。

$$(A2) \quad x + y = (a + c, b + d) = (c + a, d + b) = y + x$$

$$\begin{aligned} (A3) \quad (x + y) + z &= (a + c, b + d) + (e, f) \\ &= (a + c + e, b + d + f) \\ &= (a, b) + (c + e, d + f) \\ &= x + (y + z) \end{aligned}$$

$$(A4) \quad x + 0 = (a, b) + (0, 0) = (a, b) = x$$

$$(A5) \quad \text{令 } -x = (-a, -b), \text{ 那么 } x + (-x) = (0, 0) = 0$$

(M1) 很清楚。

$$(M2) \quad xy = (ac - bd, ad + bc) = (ca - db, da + cb) = yx$$

$$\begin{aligned} (M3) \quad (xy)z &= (ac - bd, ad + bc)(e, f) \\ &= (ace - bde - adf - bef, acf - bdf + ade + bce) \\ &= (a, b)(ce - df, cf + de) \\ &= x(yz) \end{aligned}$$

$$(M4) \quad 1x = (1, 0)(a, b) = (a, b) = x$$

(M5) 如果 $x \neq 0$ 那么 $(a, b) \neq (0, 0)$, 也就是说 a 和 b 至少有一个实数不等于 0。因此 $a^2 + b^2 > 0$, 根据 Proposition 1.18(d), 我们可以定义

$$\frac{1}{x} = \left(\frac{a}{a^2 + b^2}, \frac{-b}{a^2 + b^2} \right)$$

那么

$$x \cdot \frac{1}{x} = (a, b) \left(\frac{a}{a^2 + b^2}, \frac{-b}{a^2 + b^2} \right) = (1, 0) = 1$$

$$\begin{aligned} \text{(D)} \quad x(y + z) &= (a, b)(c + e, d + f) \\ &= (ac + ae - bd - bf, ad + af + bc + be) \\ &= (ac - bd, ad + bc) + (ae - bf, af + be) \\ &= xy + yz \end{aligned}$$

□

1.26 Theorem For any real numbers a and b we have

$$(a, 0) + (b, 0) = (a + b, 0), \quad (a, 0)(b, 0) = (ab, 0)$$

1.27 Definition $i = (0, 1)$

1.28 Theorem $i^2 = -1$

Proof.

$$i^2 = (0, 1)(0, 1) = (-1, 0) = -1$$

□

1.29 Theorem If a and b are real, then $(a, b) = a + bi$

Proof.

$$\begin{aligned} a + bi &= (a, 0) + (b, 0)(0, 1) \\ &= (a, 0) + (0, b) \\ &= (a, b) \end{aligned}$$

□

1.30 Definition If a, b are real and $z = a + bi$, then the complex number $\bar{z} = a - bi$ is called the *conjugate* of z . The numbers a and b are the *real part* and the *imaginary part* of z , respectively. We shall occasionally write

$$a = \operatorname{Re}(z), \quad b = \operatorname{Im}(z)$$

1.31 Theorem If z and w are complex, then

$$(a) \quad \overline{z + w} = \bar{z} + \bar{w}$$

$$(b) \quad \overline{z\bar{w}} = \bar{z} \cdot w$$

$$(c) \quad z + \bar{z} = 2 \operatorname{Re}(z), \quad z - \bar{z} = 2i \operatorname{Im}(z)$$

(d) $z\bar{z}$ is real and positive (except when $z = 0$)

1.32 Definition If z is a complex number, its absolute value $|z|$ is the non-negative square root of $z\bar{z}$; that is, $|z| = (z\bar{z})^{1/2}$.

$|z|$ 的存在 (以及唯一性) 遵循 Theorem 1.12 以及 Theorem 1.31 (d)。

注意当 x 为实数时, 那么 $\bar{x} = x$, 因此 $|x| = \sqrt{x^2}$ 。所以如果 $x \geq 0$ 时 $|x| = x$, 如果 $x < 0$ 时 $|x| = -x$ 。

1.33 Theorem Let z and w be complex numbers. Then

$$(a) |z| > 0 \text{ unless } z = 0, |0| = 0$$

$$(b) |\bar{z}| = |z|$$

$$(c) |zw| = |z||w|$$

$$(d) |\operatorname{Re} z| \leq |z|$$

$$(e) |z + w| \leq |z| + |w|$$

Proof.

(a) 与 (b) 不足为道。令 $z = a + bi$, $w = c + di$, 其 a, b, c, d 皆为实数。那么

$$|zw|^2 = (ac - bd)^2 + (ad + bc)^2 = (a^2 + b^2)(c^2 + d^2) = |z|^2 |w|^2$$

即 $|zw|^2 = (|z||w|)^2$ 。(c) 遵循 Theorem 1.21 所声明的唯一性。

证明 (d), 有 $a^2 \leq a^2 + b^2$, 因此

$$|a| = \sqrt{a^2} \leq \sqrt{a^2 + b^2}$$

证明 (e), 有 $\bar{z}w$ 与 $z\bar{w}$ 是共轭的, 因此 $\bar{z}w + z\bar{w} = 2 \operatorname{Re}(z\bar{w})$ 。因此

$$\begin{aligned} |z + w|^2 &= (z + w)(\bar{z} + \bar{w}) \\ &= z\bar{z} + z\bar{w} + \bar{z}w + w\bar{w} \\ &= |z|^2 + 2 \operatorname{Re}(z\bar{w}) + |w|^2 \\ &\leq |z|^2 + 2|z\bar{w}| + |w|^2 \\ &= |z|^2 + 2|z||w| + |w|^2 \\ &= (|z| + |w|)^2 \end{aligned}$$

两边开根号后即可得 (e)。

□

Note

计算中第一步的 $|z+w|^2 = (z+w)(\bar{z}+\bar{w})$ 是将 $z+w$ 视为整体, 并使用了 Definition 1.32 中的 $|z| = (z\bar{z})^{1/2}$ 转换为 $(z+w)(\bar{z}+\bar{w})$, 而又因为 Theorem 1.31 (a) 可将第二项变为 $(\bar{z}+\bar{w})$; 而第三步到第四步的不等式则利用了 Theorem 1.33 (d), 即 $|\operatorname{Re} z| \leq |z|$; 第四步到第五步则使用了 Theorem 1.33 (c), 即 $|zw| = |z||w|$ 。

1.34 Notation If x_1, \dots, x_n are complex numbers, we write

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = \sum_{j=1}^n x_j$$

我们用一个重要的不等式来结束本节, 它通常被称为 *Schwarz inequality*。

1.35 Theorem If a_1, \dots, a_n and b_1, \dots, b_n are complex numbers, then

$$\left| \sum_{j=1}^n a_j \bar{b}_j \right|^2 \leq \sum_{j=1}^n |a_j|^2 \sum_{j=1}^n |b_j|^2$$

Proof.

令 $A = \sum |a_j|^2$, $B = \sum |b_j|^2$, $C = \sum a_j \bar{b}_j$, 本证明中 j 取值 $1, \dots, n$ 。如果 $B = 0$, 那么就有 $b_1 = \dots = b_n = 0$, 那么结论很清楚。因此假设 $B > 0$ 。根据 Theorem 1.31 有

$$\begin{aligned} \sum |Ba_j - Cb_j|^2 &= \sum (Ba_j - Cb_j)(B\bar{a}_j - \overline{Cb_j}) \\ &= B^2 \sum |a_j|^2 - B\bar{C} \sum a_j \bar{b}_j - BC \sum \bar{a}_j b_j + |C|^2 \sum |b_j|^2 \\ &= B^2 A - B|C|^2 \\ &= B(AB - |C|^2) \end{aligned}$$

因为在首次求和的每个项都是非负的, 可以知道

$$B(AB - |C|^2) \geq 0$$

又因为 $B > 0$, 它遵循 $AB - |C|^2 \geq 0$ 。它便是预期的不等式。 \square

Note

$|Ba_j - Cb_j|^2$ 为构造项, 将其中 $Ba_j - Cb_j$ 视为整体根据 Definition 1.32, 可转换为 $(Ba_j - Cb_j)(\overline{Ba_j - Cb_j})$, 而后者根据 Theorem 1.31 即可写为 $B\bar{a}_j - \overline{Cb_j}$ (这里 $B = \sum |b_j|^2$ 的共轭还是其本身); 根据乘法分配律得出第二步后, 将之前设定的 A, B, C 带入即可得出 $B(AB - |C|^2)$; 最后根据起始的构造项 $|Ba_j - Cb_j|^2$ 必然非负以及之前假设的 $B > 0$ 可以得出 $AB - |C|^2 \geq 0$; 将 A, B, C 原本代表的值带入, 即 $\sum |a_j|^2 \sum |b_j|^2 - |\sum a_j \bar{b}_j|^2 \geq 0$ 。

Euclidean Spaces

1.36 Definitions For each positive integer k , let R^k be the set of all ordered k -tuples

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$$

where x_1, \dots, x_k are real numbers, called the *coordinates* of \mathbf{x} . The elements of R^k are called points, or vectors, especially when $k > 1$. We shall denote vectors by boldfaced letters. If $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_k)$ and if α is a real number, put

$$\mathbf{x} + \mathbf{y} = (x_1 + y_1, \dots, x_k + y_k)$$

$$\alpha\mathbf{x} = (\alpha x_1, \dots, \alpha x_k)$$

so that $\mathbf{x} + \mathbf{y} \in R^k$ and $\alpha\mathbf{x} \in R^k$. This defines addition of vectors, as well as multiplication of a vector by a real number (a scalar). These two operations satisfy the commutative, associative, and distributive laws (the proof is trivial, in view of the analogous for the real numbers) and make R^k into a *vector space over the real field*. The zero element of R^k (sometimes called the *origin* or the *null vector*) is the point $\mathbf{0}$, all of whose coordinates are 0.

We also define the so-called “inner product” (or scalar product) of \mathbf{x} and \mathbf{y} by

$$\mathbf{x} \cdot \mathbf{y} = \sum_{i=1}^k x_i y_i$$

and the *norm* of \mathbf{x} by

$$|\mathbf{x}| = (\mathbf{x} \cdot \mathbf{x})^{1/2} = \left(\sum_{i=1}^k x_i^2 \right)^{1/2}$$

The structure now defined (the vector space R^k with the above inner product and norm) is called euclidean k -space.

1.37 Theorem Suppose $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in R^k$, and α is real. Then

- (a) $|\mathbf{x}| \geq 0$;
- (b) $|\mathbf{x}| = 0$ if and only if $\mathbf{x} = \mathbf{0}$;
- (c) $|\alpha\mathbf{x}| = |\alpha||\mathbf{x}|$;
- (d) $|\mathbf{x} \cdot \mathbf{y}| \leq |\mathbf{x}||\mathbf{y}|$;
- (e) $|\mathbf{x} + \mathbf{y}| \leq |\mathbf{x}| + |\mathbf{y}|$;
- (f) $|\mathbf{x} - \mathbf{z}| \leq |\mathbf{x} - \mathbf{y}| + |\mathbf{y} - \mathbf{z}|$

Proof.

前三项不必赘述，而 (d) 是 Schwarz 不等式的间接结论。通过 (d) 可以有

$$\begin{aligned}
 |\mathbf{x} + \mathbf{y}|^2 &= (\mathbf{x} + \mathbf{y}) \cdot (\mathbf{x} + \mathbf{y}) \\
 &= \mathbf{x} \cdot \mathbf{x} + 2\mathbf{x} \cdot \mathbf{y} + \mathbf{y} \cdot \mathbf{y} \\
 &\leq |\mathbf{x}|^2 + 2|\mathbf{x}||\mathbf{y}| + |\mathbf{y}|^2 \\
 &= (|\mathbf{x}| + |\mathbf{y}|)^2
 \end{aligned}$$

这样 (e) 就被证明了。最后替换 (e) 中的 \mathbf{x} 为 $\mathbf{x} - \mathbf{y}$ 以及 \mathbf{y} 为 $\mathbf{y} - \mathbf{z}$ (f) 可以得出 (f)。 \square

1.38 Remarks Theorem 1.37 (a), (b), and (f) will allow us (see Chap. 2) to regard R^k as a metric space.

R^1 (the set of all real numbers) is usually called the line, or the real line. Likewise, R^2 is called the plane, or the complex plane (compare Definitions 1.24 and 1.36). In these two cases the norm is just the absolute value of the corresponding real or complex number.

2 Basic Topology

Finite, Countable, and Uncountable Sets

本节由函数概念的定义开始。

2.1 Definition Consider two sets A and B , whose elements may be any objects whatsoever, and suppose that with each element x of A there is associated, in some manner, an element of B , which we denote by $f(x)$. Then f is said to be a *function* from A to B (or a *mapping* of A into B). The set A is called the *domain* of f (we also say f is defined on A), and the elements $f(x)$ are called the *values* of f . The set of all values of f is called the *range* of f .

2.2 Definition Let A and B be two sets and let f be a mapping of A into B . If $E \subset A$, $f(E)$ is defined to be the set of all elements $f(x)$, for $x \in E$. We call $f(E)$ the *image* of E under f . In this notation, $f(A)$ is the range of f . It is clear that $f(A) \subset B$. If $f(A) = B$, we say that f maps A *onto* B . (Note that, according to this usage, *onto* is more specific than *into*.)

If $E \subset B$, $f^{-1}(E)$ denotes the set of all $x \in A$ such that $f(x) \in E$. We call $f^{-1}(E)$ the *inverse image* of E under f . If $y \in B$, $f^{-1}(y)$ is the set of all $x \in A$ such that $f(x) = y$. If, for each $y \in B$, $f^{-1}(y)$ consists of at most one element of A , then f is said to be a 1-1 (*one-to-one*) mapping of A into B . This may also be expressed as follows: f is a 1-1 mapping of A into B provided that $f(x_1) \neq f(x_2)$ whenever $x_1 \neq x_2$, $x_1 \in A$, $x_2 \in A$.

(The notation $x_1 \neq x_2$ means that x_1 and x_2 are distinct elements; otherwise we write $x_1 = x_2$.)

Note

简单来说:

1. $f(E)$ 是集合 E 通过 f 得到的像 (image)。
2. $f(A)$ 是 f 的范围。
3. 如果 $f(A) = B$, 那么称 f 将 A 完全映射至 (onto) B 。
4. 而当 $E \subset B$ 且 $x \in A$ 时, 反函数 $f^{-1}(E)$ 是集合 E 通过 f 得到的反像 (inverse image)。
5. $\forall x \in A$ 通过 f 映射后且满足 $\forall f(x) \in B$ 被称为一一映射 (1-1 mapping)。

2.3 Definition If there exists a 1-1 mapping of A *onto* B , we say that A and B can be put in 1-1 *correspondence*, or that A and B have the same *cardinal number*, or, briefly, that A and B are *equivalent*, and we write $A \sim B$. This relation clearly has the following properties:

It is reflexive: $A \sim A$.

It is symmetric: If $A \sim B$, then $B \sim A$.

It is transitive: If $A \sim B$ and $B \sim C$, then $A \sim C$.

Any relation with these three properties is called an *equivalence relation*.

Note

- 基数 Cardinal number。
- 自反性 Reflexive, 维基百科;
- 对称性 Symmetric;
- 传递性 Transitive。

2.4 Definition For any positive integer n , let J_n be the set whose elements are the integers $1, 2, \dots, n$; let J be the set consisting of all positive integers. For any set A , we say:

- (a) A is *finite* if $A \sim J_n$ for some n (the empty set is also considered to be finite).
- (b) A is *infinite* if A is not finite.
- (c) A is *countable* if $A \sim J$.
- (d) A is *uncountable* if A is neither finite nor countable.
- (e) A is *at most countable* if A is finite or countable.

Countable sets are sometimes called *enumerable*, or *denumerable*.

For two finite sets A and B , we evidently have $A \sim B$ if and only if A and B contain the same number of elements. For infinite sets, however, the idea of “having the same number of elements” becomes quite vague, whereas the notion of 1-1 correspondence retains its clarity.

Note

可数集 (countable set), 是指每个元素都能与自然数集 N 的每个元素之间能建立一一对应的集合; 不可数集顾名思义就是无法与自然数集 N 建立一一对应的集合; 至多可数集 (at most countable) 是有限集 (finite) 与可数集 (countable) 的统称。

2.7 Definition By a *sequence*, we mean a function f defined on the set J of all positive integers. If $f(n) = x_n$, for $n \in J$, it is customary to denote the sequence f by the symbol $\{x_n\}$, or sometimes by x_1, x_2, x_3, \dots . The values of f , that is, the elements x_n , are called the *terms* of the sequence. If A is a set and if $x_n \in A$ for all $n \in J$, then $\{x_n\}$ is said to be a *sequence* in A , or a *sequence of elements* of A .

注意一个数列的 x_1, x_2, x_3, \dots 项不需要是独特的。

由于每个可数集合是一个定义在 J 上一一映射的范围, 可将每个可数集合视为一系列不同项的范围。更宽泛来说, 任何可数集合中的原始可以被“排列在一个数列上”。

有时可以将定义中的 J 替换为所有非负整数集合, 这样可能会更加的方便, 例如开始于 0 而不是 1。

2.8 Theorem *Every infinite subset of a countable set A is countable.*

Proof.

假设 $E \subset A$, 且 E 为无限的。排列 A 中的元素 x 构建 $\{x_n\}$ 独特数列。构建一个满足如下的数列 $\{n_k\}$:

令 n_1 为最小的正整数使得 $x_{n_1} \in E$ 。选择 n_1, \dots, n_{k-1} ($k = 2, 3, 4, \dots$), 令 n_k 为最小的大于 n_{k-1} 的整数使得 $x_{n_k} \in E$ 。

令 $f(k) = x_{n_k}$ ($k = 1, 2, 3, \dots$), 我们获取一个 E 与 J 的一一映射关系。

根据定理, 粗略的说可数集合表示了“最小的”无限性: 没有不可数集合可以成为一个可数集合的子集。□

Note

一个可数集合 A 的任意无限子集都是可数的。

2.9 Definition Let A and Ω be sets, and suppose that with each element α of A there is associated a subset of Ω which we denote by E_α .

The set whose elements are the sets E_α will be denoted by $\{E_\alpha\}$. Instead of speaking of sets of sets, we shall sometimes speak of a collection of sets, or a family of sets.

The *union* of the sets E_α is defined to be the set S such that $x \in S$ if and only if $x \in E_\alpha$ for at least one $\alpha \in A$. We use the notation

$$(1) \quad S = \bigcup_{\alpha \in A} E_\alpha.$$

If A consists of the integers $1, 2, \dots, n$, one usually writes

$$(2) \quad S = \bigcup_{m=1}^n E_m$$

or

$$(3) \quad S = E_1 \cup E_2 \cup \cdots \cup E_n.$$

If A is the set of all positive integers, the usual notation is

$$(4) \quad S = \bigcup_{m=1}^{\infty} E_m.$$

The symbol ∞ in (4) merely indicates that the union of a *countable* collection of sets is taken, and should not be confused with the symbols $+\infty$, $-\infty$, introduced in Definition 1.23.

The *intersection* of the sets E_α is defined to be the set P such that $x \in P$ if and only if $x \in E_\alpha$ for every $\alpha \in A$. We use the notation

$$(5) \quad P = \bigcap_{\alpha \in A} E_\alpha,$$

or

$$(6) \quad P = \bigcap_{m=1}^n E_m = E_1 \cap E_2 \cap \cdots \cap E_n,$$

or

$$(7) \quad P = \bigcap_{m=1}^{\infty} E_m,$$

as for unions. If $A \cap B$ is not empty, we say that A and B *intersect*; otherwise they are *disjoint*.

Note

- 元素为 E_α 的集合记为 $\{E_\alpha\}$, 可以称其为集合群 collection of sets 或是类 family of sets。
- S 代表所有 E_α 集合的并集;
- P 代表所有 E_α 集合的交集。

2.11 Remarks Many properties of unions and intersections are quite similar to those of sums and products; in fact, the words sum and product were sometimes used in this connection, and the symbols Σ and Π were written in place of \bigcup and \bigcap .

The commutative and associative laws are trivial:

$$(8) \quad A \cup B = B \cup A; \quad A \cap B = B \cap A.$$

$$(9) \quad (A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C); \quad (A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C).$$

Thus the omission of parentheses in (3) and (6) is justified.

The distributive law also holds:

$$(10) \quad A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C).$$

To prove this, let the left and right members of (10) be denoted by E and F , respectively.

Suppose $x \in E$. Then $x \in A$ and $x \in B \cup C$, that is, $x \in B$ or $x \in C$ (possibly both). Hence $x \in A \cap B$ or $x \in A \cap C$, so that $x \in F$. Thus $E \subset F$.

Next, suppose $x \in F$. Then $x \in A \cap B$ or $x \in A \cap C$. That is, $x \in A$, and $x \in B \cup C$. Hence $x \in A \cap (B \cup C)$, so that $F \subset E$.

It follows that $E = F$.

We list a few more relations which are easily verified:

$$(11) \quad A \subset A \cup B,$$

$$(12) \quad A \cap B \subset A.$$

If 0 denotes the empty set, then

$$(13) \quad A \cup 0 = A, \quad A \cap 0 = 0.$$

If $A \subset B$, then

$$(14) \quad A \cup B = B, \quad A \cap B = A.$$

2.12 Theorem Let $\{E_n\}$, $n = 1, 2, 3, \dots$, be a sequence of countable sets, and put

$$(15) \quad S = \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n.$$

Then S is countable.

Proof.

Let every set E_n be arranged in a sequence $\{x_{nk}\}$, $k = 1, 2, 3, \dots$, and consider the infinite array

$$(16) \quad \begin{array}{ccccccc} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & \dots & & \\ \swarrow & \nearrow & \swarrow & \nearrow & & & \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & \dots & & \\ \swarrow & \nearrow & \swarrow & \nearrow & & & \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} & \dots & & \\ \swarrow & \nearrow & \swarrow & \nearrow & & & \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} & \dots & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & & \end{array}$$

in which the elements of E_n form the n th row. The array contains all elements of S . As indicated by the arrows, these elements can be arranged in a sequence

$$(17) \quad x_{11}; x_{21}, x_{12}; x_{32}, x_{22}, x_{13}; x_{41}, x_{32}, x_{23}, x_{14}; \dots$$

If any two of the sets E_n have elements in common, these will appear more than once in (17). Hence there is a subset T of the set of all positive integers such that $S \sim T$, which shows that S is at most countable (Theorem 2.8). Since $E_1 \subset S$, and E_1 is infinite, S is infinite, and thus countable. \square

Corollary Suppose A is at most countable, and, for every $\alpha \in A$, B_α is at most countable. Put

$$T = \bigcup_{\alpha \in A} B_\alpha.$$

Then T is at most countable.

T 相当于 (15) 的子集。

2.13 Theorem Let A be a countable set, and let B_n be the set of all n -tuples (a_1, \dots, a_n) , where $a_k \in A$ ($k = 1, \dots, n$), and the elements a_1, \dots, a_n need not be distinct. Then B_n is countable.

Proof.

B_1 可数是显而易见的, 因为 $B_1 = A$ 。假设 B_{n-1} 是可数的 ($n = 2, 3, 4, \dots$)。 B_n 的元素形式是

$$(18) \quad (b, a) \quad (b \in B_{n-1}, a \in A).$$

对于每个固定的 b , 成对集合 (set of pairs) b, a 等同于 A , 即是可数的。因此 B_n 是若干可数集合的并集构成的可数集合。根据 Theorem 2.12, B_n 是可数的。 \square

Corollary The set of all rational numbers is countable.

Proof.

我们应用 Theorem 2.13 同时 $n = 2$, 所有有理数 r 都可以表示为 b/a , 其中 a 与 b 都是整数。那么成对集合 (a, b) 就是分数 b/a 的集合, 即是可数的。 \square

实际上, 所有代数集合都是可数的。

然而并不是所有的无限集合是可数的, 详见下个定理。

2.14 Theorem Let A be the set of all sequences whose elements are the digits 0 and 1. This set A is uncountable.

A 集合中的元素数列类似于 $1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, \dots$ 。

Proof.

令 E 为集合 A 中的一个可数子集，且令 E 由数列 s_1, s_2, s_3, \dots 构成。再构建一个满足以下条件的数列 s 。如果在 s_n 中的第 n 个小数是 1，令 s 的第 n 个小数为 0，以此类推。那么数列 s 至少有一处是有别于所有 E 中的成员；因此 $s \notin E$ 。但是陷入 $s \in A$ ，因此 E 是 A 的一个合理子集。

我们证明了所有 A 集合的可数子集是合理的子集。对于 A 是不可数的也同理（否则 A 将会是 A 合理的子集，这是荒谬的）。□

Metric Spaces

2.15 Definition A set X , whose elements we shall call *points*, is said to be a *metric space* if with any two points p and q of X there is associated a real number $d(p, q)$, called the *distance* from p to q , such that

- (a) $d(p, q) > 0$ if $p \neq q$; $d(p, p) = 0$;
- (b) $d(p, q) = d(q, p)$;
- (c) $d(p, q) \leq d(p, r) + d(r, q)$, for any $r \in X$.

任何拥有上述三个性质的函数都被称为距离函数 *distance function*，或者度规 *metric*。

2.16 Examples The most important examples of metric spaces, from our standpoint, are the euclidean spaces R^k , especially R^1 (the real line) and R^2 (the complex plane); the distance in R^k is defined by

$$(19) \quad d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = |\mathbf{x} - \mathbf{y}| \quad (\mathbf{x}, \mathbf{y} \in R^k).$$

Note

- 欧几里得空间的距离概念抽象化后，即度量空间 (Metric Space)。
- (a) 正定性，(b) 对称性，(c) 三角不等式。

2.17 Definition By the *segment* (a, b) we mean the set of all real numbers x such that $a < x < b$.

By the *interval* $[a, b]$ we mean the set of all real numbers x such that $a \leq x \leq b$.

Occasionally we shall also encounter “half-open intervals” $[a, b)$ and $(a, b]$; the first consists of all x such that $a \leq x < b$, the second of all x such that $a < x \leq b$.

If $a_i < b_i$ for $i = 1, \dots, k$, the set of all points $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k)$ in R^k whose coordinates satisfy the inequalities $a_i \leq x_i \leq b_i$ ($1 \leq i \leq k$) is called a *k-cell*. Thus a 1-cell is an interval, a 2-cell is a rectangle, etc.

If $\mathbf{x} \in R^k$ and $r > 0$, the *open (or closed) ball* B with center at \mathbf{x} and radius r is defined to be the set of all $\mathbf{y} \in R^k$ such that $|\mathbf{y} - \mathbf{x}| < r$ (or $|\mathbf{y} - \mathbf{x}| \leq r$).

We call a set $E \subset R^k$ *convex* if

$$\lambda \mathbf{x} + (1 - \lambda) \mathbf{y} \in E$$

whenever $\mathbf{x} \in E$, $\mathbf{y} \in E$, and $0 < \lambda < 1$.

Note

- Segment 开区间 (a, b)
- Interval 闭区间 $[a, b]$
- k -cell k -方格
- R^k 空间定义开/闭球 (**open/closed ball**)
- ball 和 k -cell 都是凸的 (**convex**)



k-cell

2.18 Definition Let X be a metric space. All points and sets mentioned below are understood to be elements and subsets of X .

- A *neighborhood* of p is a set $N_r(p)$ consisting of all q such that $d(p, q) < r$, for some $r > 0$. The number r is called the *radius* of $N_r(p)$.
- A point p is a *limit point* of the set E if *every* neighborhood of p contains a point $q \neq p$ such that $q \in E$.
- If $p \in E$ and p is not a limit point of E , then p is called an *isolated point* of E .
- E is *closed* if every limit point of E is a point of E .
- A point p is an *interior point* of E if there is a neighborhood N of p such that $N \subset E$.

- (f) E is *open* if every point of E is an interior point of E .
- (g) The *complement* of E (denoted by E^c) is the set of all points $p \in X$ such that $p \notin E$.
- (h) E is *perfect* if E is closed and if every point of E is a limit point of E .
- (i) E is *bounded* if there is a real number M and a point $q \in X$ such that $d(p, q) < M$ for all $p \in E$.
- (j) E is *dense* in X if every point of X is a limit point of E , or a point of E (or both).

注意 R^1 的邻域为线段, 而 R^2 的邻域是圆圈的内部点们。

Note

- 邻域 neighborhood: 到 p 点距离小于 r 的集合 ($r > 0$);
- 极限点 limit point: 所有邻域存在一个与 p 不同的点, 无论半径多小 (例如一维空间的开区间 $(a, b]$, $a < b$, $a, b \in R$ 的 a, b 点皆为极限点, a 虽然不属于 $(a, b]$, 但是其右侧总是会有一个点 p 使得 $p - a > 0$, b 同理。二维空间集合的边界点亦是如此, 以此类推所有的边界点皆为极限点);
- 孤立点 isolated point: 例如 $S = \{0\} \cup [1, 2]$ 的 0 点为孤立点;
- 闭 closed: 如果所有极限点都属于 E , 那么 E 为闭 (例如一维空间 $S = [a, b]$, $a < b$, $a, b \in R$, S 为 closed。特例: 在孤立点构成的度量空间中, 任何子集都是即开又闭);
- 内点 interior point: 用一维空间解释就是 $S = [a, b]$, $a < b$, $a, b \in R$ 且 $p \in (a, b)$, 那么 p 为 S 的内点;
- 开 open: 如果 E 中任意一点都是内点, E 为开;
- 补集 complement: $\forall p \in X$ 且 $\forall p \notin E$ 那么 X 为 E 补集;
- 完全 perfect: 一个闭集中每一个点都是它的极限点, 那么该集合为完全;
- 有界的 bounded: 如果集合中任意一点都在某个 r 为实数的邻域内, 那么该集合为有界的;
- 稠密 dense: X 中任意一点都是 E 的一个极限点或者 E 中的一点 (例如有理数在实数上稠密, Theorem 1.20 (b) 中证明了)。

2.19 Theorem *Every neighborhood is an open set.*

Proof.

考虑一个邻域 $E = N_r(p)$, 并令 q 为 E 的任意一点。那么则有一个正实数 h 满足

$$d(p, q) = r - h.$$

对于所有满足 $d(q, s) < h$ 的点 s , 有

$$d(p, s) \leq d(p, q) + d(q, s) < r - h + h = r,$$

使得 $s \in E$ 。因此 q 是 E 的一个内点。 □

Note

所有邻域都是开的。

2.20 Theorem *If p is a limit point of a set E , then every neighborhood of p contains infinitely many points of E .*

Proof.

假设 p 有一个邻域 N , 其仅包含了有限点的 E 。令 q_1, \dots, q_n 为 $N \cap E$ 的这些点, 它们有别与点 p , 且令

$$r = \min_{1 \leq m \leq n} d(p, q_m)$$

(我们使用这个记号来表示最小的 $d(p, q_1), \dots, d(p, q_n)$)。一个有限集的最小值很明显是正数, 因此 $r > 0$ 。

邻域 $N_r(p)$ 包含了除了点 q 的 E 即 $q \neq p$, 使得 p 不是 E 的一个极限点。这与定理自身相悖。 □

Note

简单来说, 假设 p 有一个邻域是有限集合, 那么就一定会有 r 满足 $\min_{1 \leq m \leq n} d(p, q_m)$, 也就是有最小距离存在; 然而这与 Definition 2.18 (b) 相悖, 即与“无论半径多小”的定义相悖, 因此 p 不是一个极限点。因此, 如果 p 是一个极限点, 那么它的任何邻域都有无限个点。

Corollary *A finite point set has no limit points.*

2.21 Examples Let us consider the following subsets of R^2 :

- (a) The set of all complex z such that $|z| < 1$.

- (b) The set of all complex z such that $|z| \leq 1$.
- (c) A nonempty finite set.
- (d) The set of all integers.
- (e) The set consisting of the numbers $1/n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$). Let us note that this set E has a limit point (namely, $z = 0$) but that no point of E is a limit point of E ; we wish to stress the difference between having a limit point and containing one.
- (f) The set of all complex numbers (that is, R^2).
- (g) The segment (a, b) .

Let us note that (d), (e), (g) can be regarded also as subsets of R^1 . Some properties of these sets are tabulated below:

	<i>Closed</i>	<i>Open</i>	<i>Perfect</i>	<i>Bounded</i>
(a)	<i>No</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>
(b)	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>
(c)	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>
(d)	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>
(e)	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>
(f)	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>
(g)	<i>No</i>		<i>No</i>	<i>Yes</i>

In (g), we left the second entry blank. The reason is that the segment (a, b) is not open if we regard it as a subset of R^2 , but it is an open subset of R^1 .

2.22 Theorem *Let $\{E_\alpha\}$ be a (finite or infinite) collection of sets E_α . Then*

$$(20) \quad \left(\bigcup_{\alpha} E_{\alpha} \right)^c = \bigcap_{\alpha} (E_{\alpha}^c).$$

Proof.

令 A 与 B 分别为 (20) 的左右成员。如果 $x \in A$, 那么 $x \notin \bigcup_{\alpha} E_{\alpha}$, 因此对于任何 α 而言 $x \notin E_{\alpha}$, 因此对于所有 α 而言 $x \in E_{\alpha}^c$, 使得 $x \in \bigcap_{\alpha} E_{\alpha}^c$ 。所以 $A \subset B$ 。

相反的, 如果 $x \in B$, 那么对于所有 α 而言 $x \in E_{\alpha}^c$, 因此对于任何 α 而言 $x \notin E_{\alpha}$, 因此 $x \notin \bigcup_{\alpha} E_{\alpha}$, 使得 $x \in (\bigcup_{\alpha} E_{\alpha})^c$ 。所以 $B \subset A$ 。

综上所述 $A = B$ 。

□

2.23 Theorem *A set E is open if and only if its complement is closed.*

Proof.

首先, 假设 E^c 是闭的。选 $x \in E$, 且 $x \notin E^c$, 且 x 不是 E^c 的一个极限点。因此 x 存在一个邻域 N 使得 $E^c \cap N$ 是空集, 也就是说 $N \subset E$ 。因此 x 是 E 的一个内点, 且 E 是开的。

接着, 假设 E 是开的。令 x 为 E^c 的一个极限点。那么 x 的所有邻域包含 E^c 的一个点, 使得 x 不是 E 的一个内点。由于 E 是开的, 这意味着 $x \in E^c$ 。即遵循了 E^c 是闭的。 \square

Corollary *A set F is closed if and only if its complement is open.*

2.24 Theorem

(a) *For any collection $\{G_\alpha\}$ of open sets, $\cup_\alpha G_\alpha$ is open.*

(b) *For any collection $\{F_\alpha\}$ of closed sets, $\cap_\alpha F_\alpha$ is closed.*

(c) *For any finite collection G_1, \dots, G_n of open sets, $\cap_{i=1}^n G_i$ is open.*

(d) *For any finite collection F_1, \dots, F_n of closed sets, $\cup_{i=1}^n F_i$ is closed.*

Proof.

令 $G = \cup_\alpha G_\alpha$ 。如果 $x \in G$ 那么对一些 α 而言, 有 $x \in G_\alpha$ 。因为 x 是 G_α 的一个内点, 同时也是 G 的一个内点, 所以 G 是开的。即证明了 (a)。

根据 Theorem 2.22,

$$(21) \quad \left(\bigcap_\alpha F_\alpha \right)^c = \bigcup_\alpha (F_\alpha^c)$$

且 F_α^c 是开的, 根据 Theorem 2.23。因此 (a) 意为 (21) 是开的, 因此 $\cap_\alpha F_\alpha$ 是闭的。

接着令 $H = \cap_{i=1}^n G_i$ 。对于任何 $x \in H$, 存在 x 半径 r_i 的邻域 N_i , 使得 $N_i \subset G_i$ ($i = 1, \dots, n$)。令

$$r = \min(r_1, \dots, r_n)$$

且令 N 为 x 半径 r 的邻域。那么对于 $i = 1, \dots, n$ 而言 $N \subset G_i$ 使得 $N \subset H$, 所以 H 是开的。

通过获取补集, (d) 遵循 (c):

$$\left(\bigcup_{i=1}^n F_i \right)^c = \bigcap_{i=1}^n (F_i^c)$$

\square

Note

对于 (a) 而言, 利用了开集的定义 Definition 2.18 (f), 也就是说 x 可以是 G 的任意一点, 且因为 $x \in G_\alpha$ 都是内点, 满足开集定义。

对于 (b) 而言, 将 Theorem 2.23 应用在 Theorem 2.22 即可得出结论。

对于 (c) 而言, H 是有限个数开集的交集, 那么对于每个构成 H 的 G_i 而言都有一个 N_i 作为 x 的邻域, 那么在有限个集合内肯定可以找到最小的邻域 (最小半径 r), 又因为该最小的邻域为所有 G_i 的子集, 即 $N \subset G_i, i = 1, \dots, n$, 因此有 $N \subset H$ 。最后因为对于任意 $x \in H$ 而言, 上述论证的 $N_x \subset H$ 都成立, 即符合开集定义。

对于 (d) 而言, 再次将 Theorem 2.23 应用在 (c) 上即可得出结论。

简言之:

- 任意多的开集的并集仍然是开的;
- 任意多的闭集的交集仍然是闭的;
- 有限个的开集的交集仍然是开的;
- 有限个的闭集的并集仍然是闭的。

2.26 Definition If X is a metric space, if $E \subset X$, and if E' 's denotes the set of all limit points of E in X , then the *closure* of E is the set $\overline{E} = E \cup E'$.

Note

E' 为所有极限点的集, 那么 $\overline{E} = E \cup E'$ 为闭包 (例如一维空间 (a, b) , $a < b$, $a, b \in \mathbb{R}$ 有极限点 a, b , 那么 $\overline{E} = (a, b) \cup a \cup b = [a, b]$)。

2.27 Theorem If X is a metric space and $E \subset X$, then

- (a) \overline{E} is closed,
- (b) $E = \overline{E}$ if and only if E is closed,
- (c) $\overline{E} \subset F$ for every closed set $F \subset X$ such that $E \subset F$.

By (a) and (c), \overline{E} is the smallest closed subset of X that contains E .

Proof.

- (a) 如果 $p \in X$ 且 $p \notin \overline{E}$, 那么 p 既不是 E 的点也不是 E 的极限点。因此 p 有一个邻域不与 E 相交。那么 \overline{E} 的补集是开的。因此 \overline{E} 是闭的。

(b) 如果 $E = \overline{E}$, 那么 (a) 意味着 E 是闭的。如果 E 是开的, 那么 $E' \subset E$ (根据 Definitions 2.18 (d) 与 2.26), 因此 $\overline{E} = E$ 。

(c) 如果 F 是闭的且 $F \supset E$, 那么 $F \supset F'$, 因此 $F \supset E'$ 。所以 $F \supset \overline{E}$ 。

□

Note

对于 (c) 而言, 如果 $E \subset F$, 那么 E 的极限点要么属于 F 的内点, 要么属于 F 的极限点; 而根据闭集的定义, 闭集中所有的极限点都属于闭集, 所以 $E \cup E' \subset F$, 即 $\overline{E} \subset F$ 。

2.28 Theorem *Let E be a nonempty set of real numbers which is bounded above. Let $y = \sup E$. Then $y \in \overline{E}$. Hence $y \in E$ if E is closed.*

Proof.

如果 $y \in E$ 那么 $y \in \overline{E}$ 。假设 $y \notin E$ 。那么对于所有的 $h > 0$ 存在一个点 $x \in E$ 使得 $y - h < x < y$, 不然的话 $y - h$ 会是 E 的一个上界。因此 y 是 E 的一个极限点, 所以 $y \in \overline{E}$ 。□

Note

如果 E 是闭集, 而 $y \notin E$ 时, 那么总会有 $h > 0$ 使得 $y - h < y$ 为 E 的上界, 那么与 $y = \sup E$ 相悖。

2.29 Remark Suppose $E \subset Y \subset X$, where X is a metric space. To say that E is an open subset of X means that to each point $p \in E$ there is associated a positive number r such that the conditions $d(p, q) < r$, $q \in X$ imply that $q \in E$. But we have already observed (Examples 2.16) that Y is also a metric space, so that our definitions may equally well be made within Y . To be quite explicit, let us say that E is *open relative to Y* if to each $p \in E$ there is associated an $r > 0$ such that $q \in E$ whenever $d(p, q) < r$ and $q \in Y$. Examples 2.21(g) showed that a set may be open relative to Y without being an open subset of X . However, there is a simple relation between these concepts, which we now state.

Note

根据 Examples 2.16 与 2.21 (g) 引入相对开集这个概念, 在下面的定理中证明相对开集 E 与 Y 和 X 的关系。

2.30 Theorem *Suppose $Y \subset X$. A subset E of Y is open relative to Y if and only if $E = Y \cap G$ for some open subset G of X .*

Proof.

假设 E 是相对 Y 是开。每个 $p \in E$ 都存在一个正数 r_p 满足 $d(p, q) < r_p$, $q \in Y$ 意味着 $q \in E$ 。令 V_p 为所有 $q \in X$ 的集, 使得 $d(p, q) < r_p$, 并且定义

$$G = \bigcup_{p \in E} V_p$$

那么根据 Theorems 2.19 与 2.24 可知 G 是 X 的一个子开集。

因为对于所有 $p \in E$ 而言 $p \in V_p$, 即 $E \subset G \cap Y$ 。

对于 V_p 而言, 对于每个 $p \in E$ 有 $V_p \cap Y \subset E$, 使得 $G \cap Y \subset E$ 。因此 $E = G \cap Y$, 这样该定理的一半被证明了。

相反的, 如果 G 在 X 中是开的, 且对于每个 $x \in E$ 而言 $E = G \cap Y$ 有一个邻域 $V_p \subset G$ 。那么 $V_p \cap Y \subset E$, 使得 E 相对 Y 是开的。□

Note

证明的一开始“假设 E 是相对 Y 是开”利用了 Remark 2.29 的结论 (而 Remark 2.29 的前半结论是由 Examples 2.16 所得出的): “to each point $p \in E$ there is associated a positive number r such that the conditions $d(p, q) < r$, $q \in X$ imply that $q \in E$ ”。接下来, Theorem 2.19 说的是“所有邻域都是开集”, 而证明中 Theorem 2.24 (a) 说的是若干开集的并集也是开集。简言之 p 在 X 上有邻域, 且对所有 $p \in E$ 有效, 那么 $G = \bigcup_{p \in E} V_p$ 在 X 中是开的。

又因为对于所有的 $p \in E$ 都有 $p \in V_p$, 那么就有 $E \subset G$; 同时 $E \subset Y$, 所以有 $E \subset G \cap Y$ 。

而证明中设定的 V_p 本身就是 p 点在 Y 上的邻域, 即 $V_p \cap Y \subset E$; 这又对于所有 $p \in E$ 生效, 即 $G \cap Y \subset E$ 。结合上面的结论有 $E \subset G \cap Y \subset E$, 即 $E = G \cap Y$ 。

而 E 相对 Y 为开的证明就简单多了, 因为 $p \in E$ 在 G 上的邻域有 $V_p \subset G$, 而 $G \cap Y = E$ 且 $V_p \subset G$ 可知 $V_p \cap Y \subset E$, 即 $p \in E$ 在 Y 上的邻域满足 Theorem 2.19, 再结合 Theorem 2.24 (a), 可得结论。

性质: 集合的开性质是相对的。相对 Y 的开集 E , 对于更大的 X 来说不一定是开的。要证明对于更大的 X 是开, 就必须引入 X 的开子集 G 。

Compact Sets

2.31 Definition By an *open cover* of a set E in a metric space X we mean a collection $\{G_\alpha\}$ of open subsets of X such that $E \subset \bigcup_\alpha G_\alpha$.

Note

开覆盖 open cover。

2.32 Definition A subset K of a metric space X is said to be *compact* if every open cover of K contains a *finite* subcover.

More explicitly, the requirement is that if $\{G_\alpha\}$ is an open cover of K , then there are finitely many indices $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ such that

$$K \subset G_{\alpha_1} \cup \dots \cup G_{\alpha_n}.$$

紧性 compactness 这个概念在数学分析中非常的重要,特别是它连接了连续性这个概念(第四章)。

很明显所有的有限集都是紧的。 \mathbb{R}^k 上存在大类无限紧集将会在 Theorem 2.41 中提及。

我们之前观察到的 (Remark 2.29) 如果 $E \subset Y \subset X$, 那么 E 有可能相对 Y 是开的, 而不需要相对 X 是开的。开这个属性因此取决于 E 所嵌入的空间, 对于闭这个属性亦是如此。

Note

- 紧集 compact set: 任何开覆盖都存在有限的子覆盖。
- 若一个集合是紧集, 可以称这个集合具有紧性 compact。
- 紧性实际上是一种拓扑性质。

2.33 Theorem Suppose $K \subset Y \subset X$. Then K is compact relative to X if and only if K is compact relative to Y .

凭借这个定理, 在许多情况下, 我们能够将紧集本身视为度量空间, 而无需关注任何嵌入空间。尽管讨论开空间, 或者闭空间的意义不大 (每个度量空间 X 是其自身的一个开子集, 以及一个闭子集), 但是讨论紧度量空间却是很有意义的。

Proof.

假设 K 是相对 X 紧的, 且令 $\{V_\alpha\}$ 为相对 Y 是开的集合类, 使得 $K \subset \bigcup_\alpha V_\alpha$ 。根据 Theorem 2.30, 存在若干相对 X 是开的集合 G_α , 使得对于所有 α 有 $V_\alpha = Y \cap G_\alpha$; 又因为 K 是相对 X 紧的, 我们有

$$(22) \quad K \subset G_{\alpha_1} \cup \dots \cup G_{\alpha_n}$$

对于一些有限数量索引 $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ 。因为 $K \subset Y$, (22) 意味着

$$(23) \quad K \subset V_{\alpha_1} \cup \dots \cup V_{\alpha_n}$$

这证明了 K 是相对 Y 紧的。

相反的,假设 K 是相对 Y 紧的,令 $\{G_\alpha\}$ 为 X 开子集的类,其覆盖了 K ,且令 $V_\alpha = Y \cap G_\alpha$ 。那么 (23) 将包含一些 $\alpha_1, \dots, \alpha_n$; 又因为 $V_\alpha \subset G_\alpha$, (23) 意味着 (22)。

证明结束。 \square

Note

首先是证明 K 相对 Y 紧: 假设 K 相对 X 紧。根据条件 $K \subset Y$ 可以设定 V_α 为 K 在 Y 上的子覆盖, 那么根据开覆盖的定义有 $K \subset \bigcup_\alpha V_\alpha$; 利用 Theorem 2.30 – Y 上的子集 V 当且仅当 $V = Y \cap G$ 且 G 为 X 的开集时, V 相对 Y 开, 那么对于所有的 α 则有 $V_\alpha = Y \cap G_\alpha$; 根据假设 K 相对 X 紧, 那么在 X 上存在有限的子覆盖, 即 $K \subset G_{\alpha_1} \cup \dots \cup G_{\alpha_n}$; 而先前的设定的 V_α 与 G_α 因为子覆盖是有限的, 那么可以建立 $V_{\alpha_1} = Y \cap G_{\alpha_1}, \dots, V_{\alpha_n} = Y \cap G_{\alpha_n}$ 这样一一对应的关系, 对于 $K \subset G_{\alpha_1} \cup \dots \cup G_{\alpha_n}$ 可以在子集符两边做与 Y 的交集, 即

$$\begin{aligned} Y \cap K &\subset Y \cap (G_{\alpha_1} \cup \dots \cup G_{\alpha_n}) \\ &\subset (Y \cap G_{\alpha_1}) \cup \dots \cup (Y \cap G_{\alpha_n}) \\ &\subset V_{\alpha_1} \cup \dots \cup V_{\alpha_n} \end{aligned}$$

又因为 $K \subset Y$ 那么 $Y \cap K = K$, 所以上述简化为 $K \subset V_{\alpha_1} \cup \dots \cup V_{\alpha_n}$, 也就是说 V_α 是 K 在 Y 上有限的子覆盖, 即证明了 K 是相对 Y 紧的。

其次是证明 K 相对 X 紧: 假设 K 相对 Y 紧。令 $\{G_\alpha\}$ 为 K 在 X 上的开覆盖子集的类, 利用 Theorem 2.30 有 $V_\alpha = Y \cap G_\alpha$, 那么根据 (23) 可以推导出 (22)。即证明了 K 是相对 X 紧的。

2.34 Theorem Compact subsets of metric spaces are closed.

Proof.

令 K 为度量空间 X 的一个紧子集。我们应该证明 K 的补集是 X 上的一个子开集。

假设 $p \in X, p \notin K$ 。如果 $q \in K$, 令 V_q 与 W_q 分别为 p 与 q 的邻域, 它们的半径小于 $\frac{1}{2}d(p, q)$ (详见 Definition 2.18 (a))。由于 K 是紧的, 那么在 K 中存在有限数量的点 q_1, \dots, q_n 使得

$$K \subset W_{q_1} \cup \dots \cup W_{q_n} = W.$$

如果 $V = V_{q_1} \cup \dots \cup V_{q_n}$, 那么 V 是 p 的一个邻域, 且不与 W 相交。因此 $K \subset K^c$, 所以 p 是 K^c 的一个内点。 \square

Note

度量空间的紧子集是闭的; 度量空间的紧集都是有界的。

2.35 Theorem *Closed subsets of compact sets are compact.**Proof.*

假设 $F \subset K \subset X$, F 是闭的 (相对于 X), 且 K 是紧的。令 $\{V_\alpha\}$ 为 F 的一个开覆盖。如果 F^c 临近 $\{V_\alpha\}$, 我们得到一个 K 的开覆盖 Ω 。由于 K 是紧的, 那么存在一个有限的子类 Φ 覆盖 K , 也覆盖了 F 。如果 F^c 是 Φ 的一个成员, 我们将其从 Φ 中移除并保持 F 的一个开覆盖。综上所述, $\{V_\alpha\}$ 的一个有限的子类覆盖了 F 。 \square

Note

紧集的子闭集是紧的。

Corollary *If F is closed and K is compact, then $F \cap K$ is compact*

Proof.

Theorem 2.24 (b) 以及 2.34 展示了 $F \cap K$ 是闭的; 由于 $F \cap K \subset K$ 。Theorem 2.35 展示了 $F \cap K$ 是紧的。 \square

Note

闭集与紧集的交集是紧的。

2.36 Theorem *If $\{K_\alpha\}$ is a collection of compact subsets of a metric space X such that the intersection of every finite subcollection of $\{K_\alpha\}$ is nonempty, then $\bigcap K_\alpha$ is nonempty.*

Proof.

从 $\{K_\alpha\}$ 中固定一个成员 K_1 并令 $G_\alpha = K_\alpha^c$ 。假设 K_1 中没有点属于任何的 K_α 。那么集合 G_α 形成了 K_1 的一个开覆盖; 又因为 K_1 是紧的, 存在有限数量的索引 $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ 使得 $K_1 \subset G_{\alpha_1} \cup \dots \cup G_{\alpha_n}$ 。但是这就意味着

$$K_1 \cap K_{\alpha_1} \cap \dots \cap K_{\alpha_n}$$

为空, 与假设相悖。 \square

Note

证明中的假设是拿出一个子紧集 $\{K_1\}$ 作为特例, 假设其不与任何其他 $\{K_\alpha\}$ 相交, 那么它则会属于其他 K_α 并集的补集, 也就是说后者成为了前者的开覆盖; 又因为紧集的性质, K_1 开覆盖的子集是有限的, 这意味后者是有限的, 即证明中的

$$K_1 \subset G_{\alpha_1} \cup \dots \cup G_{\alpha_n}$$

成立, 那么就有

$$\begin{aligned} K_1 &\not\subset K_{\alpha_1} \cap \cdots \cap K_{\alpha_n} \\ &\cap K_{\alpha_1} \cap \cdots \cap K_{\alpha_n} \\ &= \emptyset \end{aligned}$$

与假设相悖。

Corollary *If $\{K_n\}$ is a sequence of nonempty compact sets such that $K_n \supset K_{n+1}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), then $\bigcap_1^\infty K_n$ is not empty.*

Note

如果 $\{K_n\}$ 是一个非空紧集的数列, 使得 $K_n \supset K_{n+1}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), 那么 $\bigcap_1^\infty K_n$ 不为空。

2.37 Theorem *If E is an infinite subset of a compact set K , then E has a limit point in K .*

Proof.

如果 K 中没有点是 E 的极限点, 那么每个 $q \in K$ 将会有有一个邻域 V_q , 其包含了 E 中至多一个点 (命名 q , 如果 $q \in E$)。很明显 $\{V_q\}$ 没有有限子类可以覆盖 E ; 对 K 也是同理, 因为 $E \subset K$ 。这与 K 的紧性相悖。 \square

Note

如果 E 是紧集 K 的无限子集, 那么 E 在 K 中存在极限点。证明中的 “ $\{V_q\}$ 没有有限子类可以覆盖 E ” 是因为 E 是无限子集。

2.38 Theorem *If $\{I_n\}$ is a sequence of intervals in R^1 , such that $I_n \supset I_{n+1}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), then $\bigcap_1^\infty I_n$ is not empty.*

Proof.

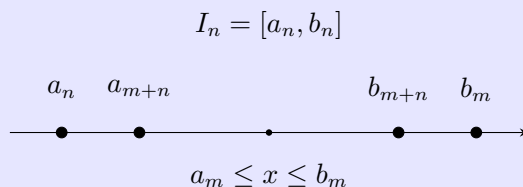
如果 $I_n = [a_n, b_n]$, 令 E 为所有 a_n 的集合。那么 E 是非空且有上界的 (为 b_1)。令 x 称为 E 的上确界。如果 m 与 n 是正整数, 那么

$$a_n \leq a_{m+n} \leq b_{m+n} \leq b_m,$$

使得对每个 m 有 $x \leq b_m$ 。很显然 $a_m \leq x$, 可知对 $m = 1, 2, 3, \dots$ 有 $x \in I_m$ 。 \square

Note

证明中所设置的 m 作为增量, 记 $m = 1, 2, 3, \dots$, 这是为了满足定理中的 $I_n \supset I_{n+1}$ 。



集合 E 在最开始有明确的上界, 即 b_1 , 随着 m 增加 $a_m \le x \le b_m$ 始终成立。

2.39 Theorem *Let k be a positive integer. If $\{I_n\}$ is a sequence of k -cells such that $I_n \supset I_{n+1}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), then $\bigcap_1^\infty I_n$ is not empty.*

Proof.

令 I_n 包含所有点 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k)$ 使得

$$a_{n,j} \leq x_j \leq b_{n,j} \quad (1 \leq j \leq k; n = 1, 2, 3, \dots)$$

且令 $I_{n,j} = [a_{n,j}, b_{n,j}]$ 。对于每个 j , 数列 $\{I_{n,j}\}$ 满足 Theorem 2.38 的假设。因此存在实数 $x_j^* (1 \leq j \leq k)$ 使得

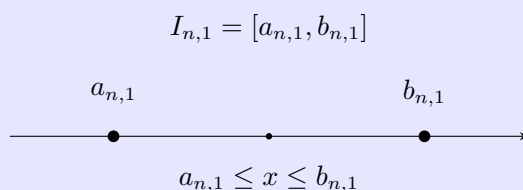
$$a_{n,j} \leq x_j^* \leq b_{n,j} \quad (1 \leq j \leq k; n = 1, 2, 3, \dots)$$

设置 $\mathbf{x}^* = (x_1^*, \dots, x_k^*)$, 得 $\mathbf{x}^* \in I_n$ 其中 $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

□

Note

本定理作为 Theorem 2.38 在更高的度量空间上的延伸, 与 2.38 不同的是 I_n 的构成是每个 k -cell 中符合条件的中间值, 即



...



对于每个 j 而言都满足 Theorem 2.38, 因此证明中所给的某实数集 x_j^* ($1 \leq j \leq k$) 也满足定理。

2.40 Theorem Every k -cell is compact.

Proof.

令 I 为一个 k -方格, 由所有点 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k)$ 构成, 使得 $a_j \leq x_j \leq b_j$ ($1 \leq j \leq k$)。令

$$\delta = \left\{ \sum_{j=1}^k (b_j - a_j)^2 \right\}^{1/2}$$

那么 $|\mathbf{x} - \mathbf{y}| \leq \delta$, 如果 $\mathbf{x} \in I, \mathbf{y} \in I$ 。

假设为了得到一个悖论, 存在一个 I 的开覆盖 $\{G_\alpha\}$ 不包含 I 的有限子覆盖。令 $c_j = (a_j + b_j)/2$ 。那么区间 $[a_j, c_j]$ 以及 $[c_j, b_j]$ 决定了 2^k k -方格 Q_i 的并集为 I 。在 Q_i 中至少有一个称为 I_1 的集合, 不能被 $\{G_\alpha\}$ 的任何有限子类覆盖 (否则 I 就被覆盖了)。接下来再细分 I_1 并继续上述步骤。我们获得一个具有以下属性的数列 $\{I_n\}$:

- (a) $I \supset I_1 \supset I_2 \supset I_3 \supset \dots$;
- (b) I_n 没有被 $\{G_\alpha\}$ 任何的有限子类覆盖;
- (c) 如果 $\mathbf{x} \in I_n$ 且 $\mathbf{y} \in I_n$, 那么 $|\mathbf{x} - \mathbf{y}| \leq 2^{-n}\delta$ 。

通过 (a) 与 Theorem 2.39 可知, 点 \mathbf{x}^* 存在于每个 I_n 中。对于某些 α 有 $\mathbf{x}^* \in G_\alpha$ 。因为 $\{G_\alpha\}$ 是开的, 存在 $r > 0$ 使得 $|\mathbf{y} - \mathbf{x}^*| < r$ 推导出 $\mathbf{y} \in G_\alpha$ 。如果 n 很大使得 $2^{-n}\delta < r$ (这个 n 是存在的, 否则对于所有正整数 n 有 $2^n \leq \delta/r$, 这就与有理数 R 的阿基米德性质相悖), 那么 (c) 意为 $I_n \subset G_\alpha$, 即与 (b) 相悖。

证明完成。 □

下一个定理中的与 (a) 和 (b) 相等部分又被称作海涅-博雷尔定理 Heine-Borel theorem。

Note

简单来说 $1 \leq j \leq k$ 的 j 代表着每个维度，那么其所设定的 $a_j \leq x_j \leq b_j$ 可视为每个维度都有“闭区间”对 x 进行约束。那么 $\delta = \left\{ \sum_1^k (b_j - a_j)^2 \right\}^{1/2}$ 很明显就是一个距离公式（例如二维情况下的 $d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ ）。那么对于任意 $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in I$ 有 $|\mathbf{x} - \mathbf{y}| \leq \delta$ 的意思就是任意两点之间的距离永远小于等于这个最大边界范围 δ 。

那么为了证明 k -方格是紧的，可以利用紧性的定理来做悖论的假设，即假设 I 不存在有限个开覆盖。随后的“determine 2^k k -cells”看起来比较抽象，但是从其设定的 $c_j = (a_j + b_j)/2$ 可以看得出来 c_j 是 a_j 与 b_j 的中点。那么 c_j 所分隔的“两边”为 $[a_j, c_j]$ 与 $[c_j, b_j]$ 构成了 2^k 个 k -方格（带入到一维空间就是分隔成了两个线段，而带入到二维则是被分隔成四个象限，三维则是八个象限）。那么对于 2^k 的 k -方格而言，设其为 Q_i ，而其本质还是 I ，因此说 Q_i 的并集为 I 。为了得到悖论，将其中一个称为 I_1 的 Q_i ，假设为不紧的，即不存在有限的子覆盖。接下来就是对该 I_1 进行分解，利用了 Theorem 2.39 的结论将其转换为数列 $\{I_n\}$ 并附上证明中的三个性质。由 (a) 和 Theorem 2.39 得出总有 $\mathbf{x}^* \in G_\alpha$ 。而因为 G_α 是开集，总会有 $r > 0$ 使得 $|\mathbf{y} - \mathbf{x}^*| < r$ ，所以 $\mathbf{y} \in G$ 。

这其中 (c) 的 $|\mathbf{x} - \mathbf{y}| \leq 2^{-n}\delta$ 可视为在 I_n 中的两点，它们之间的距离小于 $\frac{1}{2^n}\delta$ 。这里最简单的几何理解就是在一维空间下的：



也就是说，根据之前 c_j 的分隔动作，将 I 分成了 2^1 个 1-方格的 Q_i 。那么证明中说的至少其中一个不会被 $\{G_\alpha\}$ 中任何有限的子类所覆盖，那么如图所示， I_1 要么是在左侧的 $[a_1, c_1]$ 处，要么是在右侧的 $[c_1, b_1]$ 处。因此图示中 \mathbf{x} 与 \mathbf{y} 的距离要小于等于 $\delta/2$ ，即小于 $\frac{|b_1 - a_1|}{2}$ 。

之后根据第一章的阿基米德性质“给出任何正数，总能够挑选出一个整数其倒数小过原来的数”，可以很轻松的得出 (c) 与 (b) 相悖。

2.41 Theorem *If a set E in R^k has one of the following three properties, then it has the other two:*

- (a) E is closed and bounded.
- (b) E is compact.
- (c) Every infinite subset of E has a limit point in E .

Proof.

如果 (a) 成立, 那么对于一些 k -方格有 $E \subset I$, 那么 (b) 遵循 Theorems 2.40 与 2.34。Theorem 2.37 展示 (b) 推导 (c)。现在剩下 (c) 如何推导 (a)。

如果 E 没有边界, 那么 E 包含了点 \mathbf{x}_n 且

$$|\mathbf{x}_n| > n \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

由这些点 \mathbf{x}_n 构成的集合 S 是无限的, 且明显在 R^k 中没有极限点, 因此在 E 中也不存在极限点。因此 (c) 推导出 E 是有界的。

如果 E 不是闭的, 那么存在一个点 $\mathbf{x}_0 \in R^k$ 是 E 的极限点且不在 E 中。对于 $n = 1, 2, 3, \dots$ 存在点 $\mathbf{x}_n \in E$ 使得 $|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0| < 1/n$ 。令 S 成为这些点 \mathbf{x}_n 的集合。那么 S 是无限的 (否则 $|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0|$ 将有一个常量正数, 对于无限多的 n)。 S 拥有 \mathbf{x}_0 作为一个极限点, 且 S 没有其他的极限点在 R^k 中。那么如果 $\mathbf{y} \in R^k$, $\mathbf{y} \neq \mathbf{x}_0$, 则

$$\begin{aligned} |\mathbf{x}_n - \mathbf{y}| &\geq |\mathbf{x}_0 - \mathbf{y}| - |\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0| \\ &\geq |\mathbf{x}_0 - \mathbf{y}| - \frac{1}{n} \\ &\geq \frac{1}{2}|\mathbf{x}_0 - \mathbf{y}| \end{aligned}$$

满足所有且有限多的 n ; 这证明 \mathbf{y} 不是 S 的极限点 (Theorem 2.20)。

因此 S 在 E 中没有极限点; 因此如果 (c) 成立, 那么 E 必须是闭的。 \square

值得注意, 这里的 (b) 和 (c) 等同于任何度量空间; 但是 (a) 不是, 通常来说用于推导 (b) 与 (c)。

2.42 Theorem (Weierstrass) *Every bounded infinite subset of R^k has a limit point in R^k .*

Proof.

因为有界, 集合 E 是 k -方格 $I \subset R^k$ 的一个子集。根据 Theorem 2.40, I 是紧的, 因此根据 Theorem 2.37, E 在 I 中拥有一个极限点。 \square

Perfect Sets

2.43 Theorem *Let P be a nonempty perfect set in R^k . Then P is uncountable.*

Proof.

因为 P 有极限点, P 必须是无限的。假设 P 是可数的, 那么通过 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \dots$ 来表示 P 。随之可以构建一个数列 $\{V_n\}$ 来表示邻域。

令 V_1 为 \mathbf{x}_1 的任意邻域, 使得 $V_n \cap P$ 不为空。如果 V_1 包含了所有的 $\mathbf{y} \in R^k$ 使得 $|\mathbf{y} - \mathbf{x}_1| < r$, V_1 的闭包 \bar{V}_1 则是所有 $\mathbf{y} \in R^k$ 的集合使得 $|\mathbf{y} - \mathbf{x}_1| \leq r$ 。

假设 V_n 被构建了, 那么 $V_n \cap P$ 不为空。因为 P 的所有点是 P 的极限点, 存在一个邻域 V_{n+1} 使得 (i) $\overline{V_{n+1}} \subset V_n$, (ii) $\mathbf{x} \notin \overline{V_{n+1}}$, (iii) $V_{n+1} \cap P$ 非空。根据 (iii), V_{n+1} 满足我们的归纳假设, 同时构建可以进行。

令 $K_n = \overline{V_n} \cap P$ 。因为 $\overline{V_n}$ 是闭且有界的, \overline{V} 是紧的。因为 $\mathbf{x}_n \notin K_{n+1}$, P 里没有点在 $\cap_1^\infty K_n$ 中。因为 $K_n \subset P$, 这意为 $\cap_1^\infty K_n$ 是空的。但是根据 (iii), 每个 K_n 是非空的, 且根据 (i), $K_n \subset K_{n+1}$; 这与 Theorem 2.36 的 Corollary 相悖。□

Note

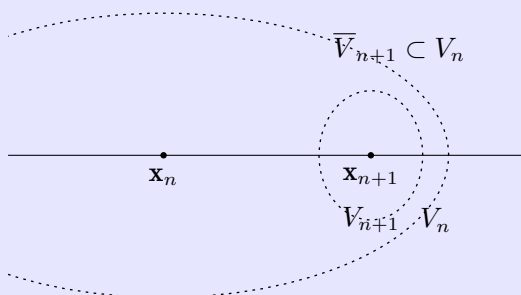
定理 P 为 R^k 内的非空完全集, 那么 P 是不可数的。

回顾 完全性 perfect 在 Definition 2.18 (h) 中提到, “ E is perfect if E is closed and if every point of E is a limit point of E ”。根据 Wikipedia 对完全集的表述:

In general topology, a subset of a topological space is **perfect** if it is closed and has no isolated points. Equivalently: the set S is perfect if $S = S'$, where S' denotes the set of all limit points of S , also known as the derived set of S .

相较于闭集, 完全集多了一条定义, 即集合上的点都是集合的极限点。

证明 完全集也是闭集, 因此有极限点; 又根据 Theorem 2.20 衍生的 Corollary, “A finite point set has no limit points”, 即完全集不是有限集合。构建的 $\{V_n\}$ 邻域数列与假设中的可数集 P 的 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \dots$ 一一对应。那么对于 V_1 这个邻域而言, 其中包含的 $\mathbf{y} \in R^k$ 点满足 $|\mathbf{y} - \mathbf{x}_1| < r$ (用二维空间对 V_1 邻域与 \mathbf{x}_1 的关系理解就很简单了: 某一点 x 为圆心 r 为半径构成的圆, 圆中所有的点构成了 V ; 那么闭包 \overline{V}_1 则是包含了圆周上的所有点)。如果在一维空间来表示 $\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n+1}$ 与 V_n, V_{n+1} 之间的关系, 那么如图所示:



即表示出了 $\overline{V_{n+1}} \subset V_n$, 且 $\mathbf{x}_n \notin \overline{V_{n+1}}$ 。当令 $K_n = \overline{V_n} \cap P$, 那么有 $K_{n+1} = \overline{V_{n+1}} \cap P$ 。同时, 根据 Theorem 2.41, 当一个集合既闭又有界时, 该集合为紧集。因此 $\overline{V_n}$ 为紧集。由上面的 $\mathbf{x}_n \notin \overline{V_{n+1}}$ 与 $K_{n+1} = \overline{V_{n+1}} \cap P$ 可知 $\mathbf{x}_n \notin K_{n+1}$ 。那么在一维的图中可知

$K_n \cap K_{n+1} = K_{n+1}$, 那么当 n 趋近无穷时, 可知 $\mathbf{x} \notin \cap_1^\infty K_n$, 即证明中的 P 中没有点在 \cap_1^∞ ; 而又因 $K_n \subset P$, 那么 $\cap_1^\infty K_n$ 只能为空。然而根据 (iii) 与 (i) 所知 K_n 不是空集, 那么根据 Theorem 2.36 的 Corollary, “如果 $\{K_n\}$ 是非空紧集的数列且 $K_n \supset K_{n+1}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), 那么 $\cap_1^\infty K_n$ 不为空”, 与推导相悖, 因此 P 是不可数的, 证明完毕。

Corollary Every interval $[a, b]$ ($a < b$) is uncountable. In particular, the set of all real numbers is uncountable.

Note

任何区间都是不可数的, 尤其是所有实数的集合都是不可数的。

2.44 The Cantor set The set which we are now going to construct shows that there exist perfect sets in R^1 which contain no segment.

Let E_0 be the interval $[0, 1]$. Remove the segment $(\frac{1}{3}, \frac{2}{3})$, and let E_1 be the union of the intervals

$$[0, \frac{1}{3}] \cup [\frac{2}{3}, 1].$$

Remove the middle thirds of these intervals, and let E_2 be the union of the intervals

$$[0, \frac{1}{9}], [\frac{2}{9}, \frac{3}{9}], [\frac{6}{9}, \frac{7}{9}], [\frac{8}{9}, 1].$$

Continuing in this way, we obtain a sequence of compact sets E_n , such that

- (a) $E_1 \supset E_2 \supset E_3 \supset \dots$;
- (b) E_n is the union of 2^n intervals, each of length 3^{-n} .

The set

$$P = \bigcap_{n=1}^{\infty} E_n$$

is called the *Cantor set*. P is clearly compact, and Theorem 2.36 shows that P is not empty.

No segment of the form

$$(24) \quad \left(\frac{3k+1}{3^m}, \frac{3k+2}{3^m} \right),$$

where k and m are positive integers, has a point in common with P . Since every segment (α, β) contains a segment of the form (24), if

$$3^{-m} < \frac{\beta - \alpha}{6},$$

P contains no segment.

To show that P is perfect, it is enough to show that P contains no isolated point. Let $x \in P$, and let S be any segment containing x . Let I_n be that interval of E_n which contains x . Choose n large enough, so that $I_n \subset S$. Let x_n be an endpoint of I_n , such that $x_n \neq x$.

It follows from the construction of P that $x_n \in P$. Hence x is a limit point of P , and P is perfect.

One of the most interesting properties of the Cantor set is that it provides us with an example of an uncountable set of measure zero (the concept of measure will be discussed in Chap. 11).

Note

Cantor 集说明了 R^1 中存在没有区间的完全集。Cantor 集在构造的过程中, 每次去掉的都是开区间。重要性质 (实分析 & 泛函分析):

1. Cantor 集的 Lebesgue 测定是 0
2. Cantor 集是非空有界闭集
3. Cantor 集完全集
4. Cantor 集是无处稠密集 (疏朗集)
5. Cantor 集是不可数集

Connected Sets

2.45 Definition Two subsets A and B of a metric space X are said to be *separated* if both $A \cap \bar{B}$ and $\bar{A} \cap B$ are empty, i.e., if no point of A lies in the closure of B and no point of B lies in the closure of A .

A set $E \subset X$ is said to be *connected* if E is *not* a union of two nonempty separated sets.

Note

度量空间 X 的两个子集 A 与 B 被称为分离的 **separated** 如果 $A \cap \bar{B}$ 与 $\bar{A} \cap B$ 皆为空集; 与分离相反的概念为连通的 **connected**。

2.46 Remark Separated sets are of course disjoint, but disjoint sets need not be separated. For example, the interval $[0, 1]$ and the segment $(1, 2)$ are *not* separated, since 1 is a limit point

of $(1, 2)$. However, the segments $(0, 1)$ and $(1, 2)$ are separated.

Note

分离的两个集是不相交的，但不相交的集合不一定是分离的。例如 $[0, 1]$ 与 $(1, 2)$ 不是分离的。

线的连通子集拥有一个特殊的简单结构：

2.47 Theorem *A subset E of the real line R^1 is connected if and only if it has the following property: If $x \in E, y \in E$, and $x < z < y$, then $z \in E$.*

Proof.

如果存在 $x \in E, y \in E$ ，以及某些 $z \in (x, y)$ 使得 $z \notin E$ ，那么有 $E = A_z \cup B_z$ 其中

$$A_z = E \cap (-\infty, z), \quad B_z = E \cap (z, \infty)$$

因为 $x \in A_z$ 以及 $y \in B_z$ ， A 与 B 为非空。因为 $A_z \subset (-\infty, z)$ 以及 $B_z \subset (z, \infty)$ ，它们是分开的。因此 E 不为连接。

接下来是反着证明，假设 E 不为连接。那么不存在非空并分开的集合 A 与 B 使得 $A \cup B = E$ 。令 $x \in A, y \in B$ ，且假设（而不失去普遍性） $x < y$ 。定义

$$z = \sup(A \cap [x, y])$$

根据 Theorem 2.28, $z \in \overline{A}$ ；因此 $z \notin B$ 。特别是 $x \leq z < y$ 。

如果 $z \notin A$ ，它遵循 $x < z < y$ 且 $z \notin E$ 。

如果 $z \in A$ ，那么 $z \notin \overline{B}$ ，因此存在 z_1 使得 $z < z_1 < y$ 且 $z_1 \notin B$ 。那么 $x < z_1 < y$ 且 $z_1 \notin E$ 。□

Note

实数集 R^1 的子集 E 是连通的，当且仅当：如果 $x \in E, y \in E$ 且 $x < z < y$ ，那么 $z \in E$ 。

3 Numerical Sequences and Series

Convergent Sequences

3.1 Definition A sequence $\{P_n\}$ in a metric space X is said to *converge* if there is a point $p \in X$ with the following property: For every $\varepsilon > 0$ there is an integer N such that $n \geq N$ implies that $d(p_n, p) < \varepsilon$. (Here d denotes the distance in X .)

In this case we also say that $\{p_n\}$ converges to p , or that p is the limit of $\{p_n\}$ [see Theorem 3.2(b)], and we write $p_n \rightarrow p$, or

$$\lim_{n \rightarrow \infty} p_n = p.$$

If $\{P_n\}$ does not converge, it is said to *diverge*.

It might be well to point out that our definition of “convergent sequence” depends not only on $\{p_n\}$ but also on X ; for instance, the sequence $1/n$ converges in R^1 (to 0), but fails to converge in the set of all positive real numbers [with $d(x, y) = |x - y|$]. In cases of possible ambiguity, we can be more precise and specify “convergent in X ” rather than “convergent”.

We recall that the set of all point $p_n (n = 1, 2, 3, \dots)$ is the *range* of $\{p_n\}$. The range of a sequence may be a finite set, or it may be infinite. The sequence $\{p_n\}$ is said to be *bounded* if its range is bounded.

As examples, consider the following sequences of complex numbers (that is, $X = R^2$):

- (a) If $s_n = 1/n$, then $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = 0$; the range is infinite, and the sequence is bounded.
- (b) If $s_n = n^2$, the sequence $\{s_n\}$ is unbounded, is divergent, and has infinite range.
- (c) If $s_n = 1 + [(-1)^n/n]$, the sequence $\{s_n\}$ converges to 1, is bounded, and has infinite range.
- (d) If $s_n = i^n$, the sequence $\{s_n\}$ is divergent, is bounded, and has finite range.
- (e) If $s_n = 1$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), then $\{s_n\}$ converges to 1, is bounded, and has finite range.

Note

度量空间 X 中的序列 $\{p_n\}$ 叫做**收敛的 converged**, 如果有一个下述性质的点 $p \in X$: 对每个 $\varepsilon > 0$, 有一个正整数 N , 使得 $n \geq N$ 时, $d(p_n, p) < \varepsilon$. 也可以说 $\{p_n\}$ 收敛于 p , 或者说 p 是 $\{p_n\}$ 的极限, 写作 $p_n \rightarrow p$ 或 $\lim_{n \rightarrow \infty} p_n = p$. 如果不收敛, 则是**发散的 diverged**.

收敛的定义不仅依赖于数列还依赖于 X , 例如 $1/n$ 在 R^1 中收敛于 0, 但在正实数集合中不收敛. 所以要强调 “在 X 中收敛”.

一切点 p_n 的集合是 $\{p_n\}$ 的**值域 range**，序列的值域可以是有限的，也可以使无限的。如果值域是有界的，那么序列是有界的。

(a) 值域无限，且数列有界：



(b) 值域无限，且数列无界，同时为发散的：



(c) 值域无限，且数列有界，同时收敛于 1：



(d) 值域有限，且数列有界，同时为发散的：



(e) 值域有限，且数列有界，同时收敛于 1。

我们现在来总结收敛数列在度量空间中的一些重要特性。

3.2 Theorem Let $\{p_n\}$ be a sequence in a metric space X .

- (a) $\{p_n\}$ converges to $p \in X$ if and only if every neighborhood of p contains p_n **for** all but finitely many n .
- (b) If $p \in X, p' \in X$, and if $\{p_n\}$ converges to p and to p' , then $p' = p$.
- (c) If $\{p_n\}$ converges, then $\{p_n\}$ is bounded.

(d) If $E \subset X$ and if p is a limit point of E , then there is a sequence p_n in E such that $p = \lim_{n \rightarrow \infty} p_n$.

Proof.

(a) 假设 $p_n \rightarrow p$ 且令 V 为 p 的一个邻域。对于某些 $\varepsilon > 0$ 而言, 条件 $d(q, p) < \varepsilon, q \in X$ 意味着 $q \in V$ 。与该 ε 关联的, 存在 N 使得 $n \geq N$ 满足 $d(p_n, p) < \varepsilon$ 。因此 $n \geq N$ 表明 $p_n \in V$ 。

相反的, 假设 p 的每个邻域包含所有的, 且是有限个的 p_n 。令 $\varepsilon > 0$ 且 V 为 $d(p, q) < \varepsilon$ 的集合, 其中 $q \in X$ 。根据假设, 存在 N (与该 V 关联) 使得 $n \geq N$ 时有 $p_n \in V$ 。因此如果 $n \geq N$ 时, 有 $d(p_n, p) < \varepsilon$; 因此 $p_n \rightarrow p$ 。

(b) 令 $\varepsilon > 0$ 。存在整数 N, N' 使得

$$n \geq N \text{ 表明 } d(p_n, p) < \frac{\varepsilon}{2}$$

$$n \geq N' \text{ 表明 } d(p_n, p') < \frac{\varepsilon}{2}$$

那么如果 $n \geq \max(N, N')$, 我们有

$$d(p, p') \leq d(p, p_n) + d(p_n, p') < \varepsilon$$

因为 ε 是任意的, 我们得出结论 $d(p, p') = 0$ 。

(c) 假设 $p_n \rightarrow p$ 。存在一个整数 N 使得 $n > N$ 表明 $d(p_n, p) < 1$ 。令

$$r = \max\{1, d(p_1, p), \dots, d(p_N, p)\}$$

那么对于 $n = 1, 2, 3, \dots$ 有 $d(p_n, p) \leq r$ 。

(d) 对于每个正整数 n , 有一个点 $p \in E$ 使得 $d(p_n, p) < 1/n$ 。给定 $\varepsilon > 0$, 选择 N 使得 $N_\varepsilon > 1$ 。如果 $n > N$, 它遵循 $d(p_n, p) < \varepsilon$ 。因此 $p_n \rightarrow p$ 。

证明完毕。 □

对于在 R^k 中的数列, 我们可以学习收敛之间的关系, 另一方面, 可以学习代数的运算。我们首先考虑复数的数列。

Note

度量空间 X 中的序列 $\{p_n\}$:

- (a) $\{p_n\}$ 收敛于 $p \in X$, 当且仅当 p 的每个邻域, 能包含除了有限项以外的一切项;
- (b) 如果数列同时收敛于 p, p' , 那么 $p' = p$;
- (c) 数列收敛必有界;
- (d) 如果 $E \subset X$, 而 p 是 E 的极限点, 那么在 E 中有一个序列收敛到 p 。

3.3 Theorem Suppose $\{s_n\}, \{t_n\}$ are complex sequences, and $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = s, \lim_{n \rightarrow \infty} t_n = t$. Then

- (a) $\lim_{n \rightarrow \infty} (s_n + t_n) = s + t$;
- (b) $\lim_{n \rightarrow \infty} cs_n = cs, \lim_{n \rightarrow \infty} (c + s_n) = c + s$, for any number c ;
- (c) $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n t_n = st$;
- (d) $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{s_n} = \frac{1}{s}$, provided $s_n \neq 0$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), and $s \neq 0$.

Proof.

- (a) 给定 $\varepsilon > 0$, 存在正整数 N_1, N_2 使得

$$n \geq N_1 \text{ implies } |s_n - s| < \frac{\varepsilon}{2},$$

$$n \geq N_2 \text{ implies } |t_n - t| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

如果 $N = \max(N_1, N_2)$, 那么 $n \geq N$ 表明

$$|(s_n + t_n) - (s + t)| \leq |s_n - s| + |t_n - t| < \varepsilon$$

- (a) 证明完毕。
 - (b) 很简单, 跳过。
 - (c) 使用等式
- (1) $s_n t_n - st = (s_n - s)(t_n - t) + s(t_n - t) + t(s_n - s)$

给定 $\varepsilon > 0$, 存在整数 N_1, N_2 使得

$$n \geq N_1 \text{ 表明 } |s_n - s| < \sqrt{\varepsilon}$$

$$n \geq N_2 \text{ 表明 } |t_n - t| < \sqrt{\varepsilon}$$

如果选取 $N = \max(N_1, N_2)$, $n \geq N$ 表示

$$|(s_n - s)(t_n - t)| < \varepsilon$$

使得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (s_n - s)(t_n - t) = 0$$

现在将 (a) 与 (b) 应用到等式 (1) 上, 可以得出结论

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (s_n t_n - st) = 0$$

(d) 选择 m 使得 $|s_n - s| < \frac{1}{2}|s|$ 如果 $n \geq m$, 可以得出

$$|s_n| > \frac{1}{2}|s| \quad (n \geq m)$$

给定 $\varepsilon > 0$, 存在一个整数 $N > m$ 使得 $n \geq N$ 表明

$$|s_n - s| < \frac{1}{2}|s|^2 \varepsilon$$

因此, 对于 $n \geq N$ 有

$$\left| \frac{1}{s_n} - \frac{1}{s} \right| = \left| \frac{s_n - s}{s_n s} \right| < \frac{2}{|s|^2} |s_n - s| < \varepsilon$$

□

Note

假定 s_n, t_n 是复序列, 且极限为 s, t , 那么 (a) $\lim_{n \rightarrow \infty} (s_n + t_n) = s + t$, (b) 对任何数 c , $\lim_{n \rightarrow \infty} cs_n = cs$, (c) $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n t_n = st$; (d) $\lim_{n \rightarrow \infty} (c + s_n) = c + s$.

3.4 Theorem (a) Suppose $\mathbf{x}_n \in R^k (n = 1, 2, 3, \dots)$ and

$$\mathbf{x}_n = (\alpha_{1,n}, \dots, \alpha_{k,n}).$$

Then $\{\mathbf{x}_n\}$ converges to $\mathbf{x} = (\alpha_1, \dots, \alpha_k)$ if and only if

$$(2) \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_{j,n} = \alpha_j \quad (1 \leq j \leq k).$$

(b) Suppose $\{\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n\}$ are sequences in R^k , $\{\beta_n\}$ is a sequence of real numbers, and $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}, \mathbf{y}_n \rightarrow \mathbf{y}, \beta_n \rightarrow \beta$. Then

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\mathbf{x}_n + \mathbf{y}_n) = \mathbf{x} + \mathbf{y}, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} (\mathbf{x}_n \cdot \mathbf{y}_n) = \mathbf{x} \cdot \mathbf{y}, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \beta_n \mathbf{x}_n = \beta \mathbf{x}.$$

Proof.

如果 $|\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}|$, 那么不等式

$$|\alpha_{j,n} - \alpha_j| \leq |\mathbf{x}_n - \mathbf{x}|$$

遵循 R^k 的定理, 即 (2) 成立。

反过来, 如果 (2) 成立, 那么每个 $\varepsilon > 0$ 存在一个关联的整数 N 使得 $n \geq N$ 满足

$$|\alpha_{j,n} - \alpha_j| < \frac{\varepsilon}{\sqrt{k}} \quad (1 \leq j \leq k)$$

因此 $n \geq N$ 表明

$$|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}| = \left\{ \sum_{j=1}^k |\alpha_{j,n} - \alpha_j|^2 \right\}^{1/2} < \varepsilon$$

使得 $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}$ 。(a) 证明完毕。

根据 (a) 与 Theorem 3.3 可得 (b)。

□

Note

在通过 (2) 证明 $\{\mathbf{x}_n\}$ 收敛于 $\{\mathbf{x}\}$ 时, 不等式 $|\alpha_{j,n} - \alpha_j| < \frac{\varepsilon}{\sqrt{k}}$ 右侧的 $\frac{\varepsilon}{\sqrt{k}}$ 用于构建接下来的欧式距离公式。以下为构建过程:

$$\begin{aligned} |\alpha_{j,n} - \alpha_j| &< \frac{\varepsilon}{\sqrt{k}} \\ |\alpha_{j,n} - \alpha_j| \cdot \sqrt{k} &< \varepsilon \\ (|\alpha_{j,n} - \alpha_j| \cdot \sqrt{k})^2 &< \varepsilon^2 \\ |\alpha_{j,n} - \alpha_j|^2 \cdot k &< \varepsilon^2 \end{aligned}$$

那么对于 $1 \leq j \leq k$ 而言, 有:

$$|\alpha_{1,n} - \alpha_1|^2 \cdot k + |\alpha_{2,n} - \alpha_2|^2 \cdot k + \cdots + |\alpha_{k,n} - \alpha_k|^2 \cdot k < \varepsilon^2 + \varepsilon^2 + \cdots + \varepsilon^2$$

即:

$$\begin{aligned}
 \sum_k^{j=1} |\alpha_{j,n} - \alpha_j|^2 \cdot k &< k \cdot \varepsilon^2 \\
 k \cdot \sum_k^{j=1} |\alpha_{j,n} - \alpha_j|^2 &< k \cdot \varepsilon^2 \\
 \sum_k^{j=1} |\alpha_{j,n} - \alpha_j|^2 &< \varepsilon^2 \\
 \left(\sum_k^{j=1} |\alpha_{j,n} - \alpha_j|^2 \right)^{1/2} &< \varepsilon
 \end{aligned}$$

该不等式左侧即为欧式距离公式, 因此有:

$$|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}| = \left(\sum_k^{j=1} |\alpha_{j,n} - \alpha_j|^2 \right)^{1/2}$$

那么根据 Definition 3.1, 即收敛的定义:

$$|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}| < \varepsilon$$

可得:

$$\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}$$

Subsequences

3.5 Definition Given a sequence $\{p_n\}$, consider a sequence $\{n_k\}$ of positive integers, such that $n_1 < n_2 < n_3 < \dots$. Then the sequence $\{p_{n_i}\}$ is called a subsequence of $\{p_n\}$. If $\{p_{n_i}\}$ converges, its limit is called a *subsequential limit* of $\{p_n\}$.

It is clear that $\{p_n\}$ converges to p if and only if every subsequence of $\{p_n\}$ converges to p .

Note

有序列 $\{p_n\}$ 取正整数序列 $\{n_k\}$ 使 $n_1 < n_2 < \dots$, 那么序列 $\{p_{n_i}\}$ 便叫做子序列, 如果 $\{p_{n_i}\}$ 收敛, 那么它的极限叫做 $\{p_n\}$ 的部分极限。序列收敛于 p 当且仅当它的任何子序列收敛于 p 。

3.6 Theorem (a) If $\{p_n\}$ is a sequence in a compact metric space X , then some subsequence of $\{p_n\}$ converges to a point of X .

(b) Every bounded sequence in R^k contains a convergent subsequence.

Proof.

(a) 令 E 为 $\{p_n\}$ 的值域。如果 E 是有限的, 那么存在一个 $p \in E$ 及一个序列 $\{n_i\}$ 且 $n_1 < n_2 < n_3 < \cdots$ 满足

$$p_{n_1} = p_{n_2} = \cdots = p$$

而子序列 $\{p_{n_i}\}$ 因此收敛于 p 。

如果 E 是无限的, 根据 Theorem 2.37 所提的 E 拥有一个极限点 $p \in X$ 。选取 n_1 使得 $d(p, p_{n_1}) < 1$ 。选取 n_1, \dots, n_{i-1} , 根据 Theorem 2.20 所提的, 存在一个整数 $n_i > n_{i-1}$ 满足 $d(p, p_{n_i}) < 1/i$ 。那么 $\{p_{n_i}\}$ 收敛于 p 。

(b) 遵循 (a), 因为 Theorem 2.41 推导每个有界的 R^k 子集存在于 R^k 的一个紧集中。

□

Note

如果 $\{p_n\}$ 是紧度量空间 X 中的序列, 那么 $\{p_n\}$ 有某个子序列收敛到 X 中的某个点; R^k 中的每个有界序列包含收敛的子序列。

(a) 值域是有限的情况下, 其某个点 p 可以成为某序列的收敛点; 值域是无限的情况下, 利用 Theorem 2.37 存在的极限点再加上 Theorem 2.20 所描述的极限点的邻域存在无限点可以证明子序列 $\{p_{n_i}\}$ 收敛于该极限点。

(b) 而 (b) 则是作为 (a) 在 R^k 度量空间上的延伸: E 作为序列的值域, 根据 Theorem 2.41 (a) 可知 (c), 即存在极限点。

3.7 Theorem The subsequential limits of a sequence $\{p_n\}$ in a metric space X form a closed subset of X .

Proof.

令 E^* 为 $\{p_n\}$ 所有子序列极限的集合, 同时令 q 为 E^* 的一个极限点。我们需要证明 $q \in E^*$ 。

选取 n_1 满足 $p_{n_1} \neq q$ 。(如果没有这样的 n_1 存在, 那么 E^* 只有一个点, 这样便没有必要证明了。) 令 $\delta = d(q, p_{n_1})$ 。假设选取了 n_1, \dots, n_{i-1} 。因为 q 是 E^* 的一个极限点, 那么存在一个 $x \in E^*$ 满足 $d(x, q) < 2^{-i}\delta$ 。因为 $x \in E^*$, 存在一个 $n_i > n_{i-1}$ 满足 $d(x, p_{n_i}) < 2^{-i}\delta$ 。因此

$$d(q, p_{n_i}) \leq 2^{1-i}\delta$$

对于 $i = 1, 2, 3, \dots$ 。这意味着 $\{p_{n_i}\}$ 收敛于 q 。因此 $q \in E^*$ 。 \square

Note

度量空间 X 里的序列 $\{p_n\}$ 的部分极限组成 X 的闭子集。

证明中所构建的不等式 $d(x, p_{n_i}) < \frac{1}{2^i}\delta$ 与 $d(q, p_{n_i}) < \frac{1}{2^i}\delta$ 两者相加可得

$$d(x, p_{n_i}) + d(q, p_{n_i}) < 2 \cdot \frac{1}{2^i}\delta$$

而新的不等式左侧可知 $d(x, p_{n_i}) + d(q, p_{n_i}) \leq d(q, p_{n_i})$, 即 $d(q, p_{n_i}) \leq 2^{1-i}\delta$ 。随着 i 逐渐增大 $2^{1-i}\delta$ 越小, 即证明 $\{p_{n_i}\}$ 收敛于 q 。

Cauchy Sequences

3.8 Definition A sequence $\{p_n\}$ in a metric space X is said to be a *Cauchy* sequence if for every $\varepsilon > 0$ there is an integer N such that $d(p_n, p_m) < \varepsilon$ if $n \geq N$ and $m \geq N$.

Note

度量空间 X 中的序列 $\{p_n\}$ 叫做 **柯西序列 Cauchy**，如果对于任何 $\varepsilon > 0$ 存在正整数 N ，只要 $m, n \geq N$ 就有 $d(p_n, p_m) < \varepsilon$ 。

根据 Wikipedia:



一个柯西序列 $\{x_n\}$ 相对于 n 的绘图（蓝色）。如果包含这个序列的空间是完备的，则这个序列的有一个极限。



一个非柯西序列。这个序列的元素不能随着序列前进而相互靠近。

3.9 Definition Let E be a nonempty subset of a metric space X , and let S be the set of all real numbers of the form $d(p, q)$, with $p \in E$ and $q \in E$. The sup of S is called the *diameter* of E .

如果 $\{p_n\}$ 是 X 中的一个序列，且如果 E_n 包含所有点 $p_N, p_{N+1}, p_{N+2}, \dots$ ，那么从前两个定义中可以清楚的得到 $\{p_n\}$ 是一个**柯西序列**当且仅当

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \text{diam } E_N = 0$$

Note

设 E 是度量空间 X 中的非空子集, 又设 S 是一切形式为 $d(p, q)$ 的实数集, $p, q \in E$ 。 $\sup S$ 叫做 E 的直径, 记为 $\text{diam } E$ 。

3.10 Theorem

(a) If \overline{E} is the closure of a set E in a metric space X , then

$$\text{diam } \overline{E} = \text{diam } E.$$

(b) If K_n is a sequence of compact sets in X such that $K_n \supset K_{n+1}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) and if

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \text{diam } K_n = 0,$$

then $\bigcap_1^\infty K_n$ consists of exactly one point.

Proof.

(a) 因为 $E \subset \overline{E}$, 那么可以清楚的知道

$$\text{diam } E \leq \text{diam } \overline{E}$$

选取 $\varepsilon > 0, p \in \overline{E}, q \in \overline{E}$ 。根据 \overline{E} 的定义, E 中存在点 p', q' , 满足 $d(p, p') < \varepsilon, d(q, q') < \varepsilon$ 。因此

$$\begin{aligned} d(p, q) &\leq d(p, p') + d(p', q') + d(q', q) \\ &< 2\varepsilon + d(p', q') \\ &\leq 2\varepsilon + \text{diam } E. \end{aligned}$$

它遵循

$$\text{diam } \overline{E} \leq 2\varepsilon + \text{diam } E,$$

且因为 ε 是随机的, (a) 则被证明。

(b) 令 $K = \bigcap_1^\infty K_n$ 。根据 Theorem 2.36, K 为非空。如果 K 包含一个以上的点, 那么 $\text{diam } K > 0$ 。但是对于每个 n 而言, $K_n \supset K$, 所以 $\text{diam } K_n \geq \text{diam } K$ 。这与假设的 $\text{diam } K_n \rightarrow 0$ 相悖。

□

Note

(a) 如果 E 是度量空间 X 中的集, 那么闭包满足 $\text{diam } \overline{E} = \text{diam } E$; (b) 如果 $\{K_n\}$ 是 X 中的紧集的序列, 且 $K_n \supset K_{n+1}$ 又若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \text{diam } K_n = 0$, 那么 $\bigcap_1^\infty K_n$ 由一个点组成。

3.11 Theorem

1. In any metric space X , every convergent sequence is a Cauchy sequence.
2. In X is a compact metric space and if $\{p_n\}$ is a Cauchy sequence in X , then $\{p_n\}$ converges to some point of X .
3. In R^k , every Cauchy sequence converges.

注意: 收敛的定义与柯西序列定义的不同在于前者明确存在极限, 后者未必。因此 Theorem 3.11(b) 可以判定一个序列是否收敛, 而不需知道其收敛的极限。事实 (包含于 Theorem 3.11) 上, 一个序列收敛在 R^k , 当且仅当它是一个柯西序列, 这通常被称为收敛的柯西标准。

Proof.

- (a) 如果 $p_n \rightarrow p$ 且 $\varepsilon > 0$, 存在一个整数 N 对于所有的 $n \geq N$ 满足 $d(p, p_n) < \varepsilon$ 。因此只要 $n \geq N$ 同时 $m \geq N$, 那么

$$d(p_n, p_m) \leq d(p_n, p) + d(p, p_m) < 2\varepsilon$$

因此 $\{p_n\}$ 是一个柯西序列。

- (b) 令 $\{p_n\}$ 为一个在紧空间 x 的柯西序列。对于 $N = 1, 2, 3, \dots$, 令 E_N 为一个包含了 $p_N, p_{N+1}, p_{N+3}, \dots$ 的集合。那么根据 Definition 3.9 与 Theorem 3.10(a), 有

$$(3) \quad \lim_{N \rightarrow \infty} \text{diam } \overline{E}_N = 0$$

作为紧空间 X 中的一个闭集, 每个 \overline{E}_N 都是紧的 (Theorem 2.35)。又因为 $E_N \supset E_{N+1}$, 因此有 $\overline{E}_N \supset \overline{E}_{N+1}$ 。

Theorem 3.10(b) 说明存在一个唯一的 $p \in X$ 位于每个 \overline{E}_N 中。

令 $\varepsilon > 0$, 根据 (3) 存在一个整数 N_0 当 $N \geq N_0$ 时, 满足 $\overline{E}_N < \varepsilon$ 。又因为 $p \in \overline{E}_N$, 对于每个 $q \in \overline{E}_N$ 它遵循 $d(p, q) < \varepsilon$, 所以对于每个 $q \in E_n$ 也成立。换言之, 如果 $n \geq N_0$, 那么就有 $d(p, p_n) < \varepsilon$ 。即 $p_n \rightarrow p$ 。

- (c) 令 $\{\mathbf{x}_n\}$ 为一个在 R^k 上的柯西序列。如同 (b) 那样定义 E_N , 用 \mathbf{x}_i 替换 p_i 。对于某些 N 而言, $\text{diam } E_N < 1$ 。 $\{\mathbf{x}_n\}$ 的值域是 E_N 与有限集 $\{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{N-1}\}$ 的并集。因此 $\{\mathbf{x}_n\}$ 是有界的。因为每个 R^k 的有界子集在 R^k 中拥有紧闭包 (Theorem 2.41), (c) 遵循了 (b)。

□

3.12 Definition A metric space in which every Cauchy sequence converges is said to be **complete**.

因此 Theorem 3.11 说的所有紧度量空间以及所有欧几里得空间是完备的。Theorem 3.11 同样说明了一个完备度量空间 X 中的每个闭子集 E 都是完备的。(每个在 E 中的柯西序列也是 X 中的柯西序列, 因此它收敛于某 $p \in X$, 且实际上 $p \in E$, 因为 E 是闭的)。一个度量空间中不具完备性质的例子是, 所有符合 $d(x, y) = |x - y|$ 的有理数。

Theorem 3.2(c) 与 Definition 3.1 中的 example(d) 说明了收敛的序列是有界的, 而在 R^k 上有界的序列并不需要收敛。不过这里有一个重要的例子, 收敛等同于有界; 这发生在 R^1 中的单调序列。

3.13 Definition A sequence $\{s_n\}$ of real numbers is said to be

(a) *monotonically increasing* if $s_n \leq s_{n+1}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$);

(b) *monotonically decreasing* if $s_n \geq s_{n+1}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$);

单调序列的类由递增以及递减序列所构成。

Note

实数序列的**单调递增** ($s_n \leq s_{n+1}$) 和**单调递减**。

3.14 Theorem Suppose $\{s_n\}$ is monotonic. Then $\{s_n\}$ converges if and only if it is bounded.

Proof.

假设 $s_n \leq s_{n+1}$ (另一方向的证明类似)。令 E 为 $\{s_n\}$ 的值域。如果 $\{s_n\}$ 有界, 令 s 为 E 的最小上界。那么有

$$s_n \leq s \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

对于每个 $\varepsilon > 0$, 有一个整数 N 满足

$$s - \varepsilon < s_N \leq s$$

否则 $s - \varepsilon$ 将会变为 E 的一个上界。由于 $\{s_n\}$ 递增, $n \geq N$ 因此说明

$$s - \varepsilon < s_n \leq s$$

即 $\{s_n\}$ 收敛 (于 s)。

另一方向的证明遵从 Theorem 3.2(c)。

□

Note

单调序列收敛，当且仅当它是有界的。

Upper and Lower Limits

3.15 Definition Let $\{s_n\}$ be a sequence of real numbers with the following property: For every real M there is an integer N such that $n \geq N$ implies $s_n \geq M$. We then write

$$s_n \rightarrow +\infty$$

Similarly, if for every real M there is an integer N such that $n \geq N$ implies $s_n \leq M$, we write

$$s_n \rightarrow -\infty$$

值得注意的是我们现在使用的符号 \rightarrow (在 Definition 3.1 中提出) 用于特定类型的发散序列以及收敛序列，但是对于收敛以及极限的定义 (Definition 3.1) 并没有改变。

Note

$s_n \rightarrow \pm\infty$ 的定义。

3.16 Definition Let $\{s_n\}$ be a sequence of real numbers. Let E be the set of numbers x (in the extended real number system) such that $s_{n_k} \rightarrow x$ for some subsequence $\{s_{n_k}\}$. This set E contains all subsequential limits as defined in Definition 3.5, plus possibly the numbers $+\infty, -\infty$.

我们现在回忆 Definitions 1.8 与 1.23 且令

$$s^* = \sup E$$

$$s_* = \inf E$$

数字 s^*, s_* 分别被称为 $\{s_n\}$ 的上极限与下极限；使用以下标记

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} s_n = s^*, \quad \liminf_{n \rightarrow \infty} s_n = s_*$$

3.17 Theorem Let $\{s_n\}$ be a sequence of real numbers. Let E and s^* have the same meaning as in Definition 3.16. Then s^* has the following two properties:

(a) $s^* \in E$.

(b) If $x > s^*$, there is an integer N such that $n \geq N$ implies $s_n < x$.

Moreover, s^* is the only number with the properties (a) and (b). Of course, an analogous result is true for s_* .

Proof.

(a) 如果 $s^* = +\infty$, 那么 E 则没有上界; 因此 $\{s_n\}$ 没有上界, 且存在一个子序列 $\{s_{n_k}\}$ 满足 $s_{n_k} \rightarrow +\infty$ 。

如果 s^* 是实数, 那么 E 则有上界, 且至少存在一个子序列的极限, 因此 (a) 遵循 Theorems 3.7 与 3.8。

如果 $s^* = -\infty$, 那么 E 仅包含一个元素, 即 $-\infty$, 且没有子序列极限。因此对于任何实数 $M, s_n > M$, 至多有一个为 n 的有限数, 满足 $s_n \rightarrow -\infty$ 。

上述构成了 (a) 的所有条件。

(b) 假设存在一个数 $x > s^*$, 对于无限多个的 n 满足 $s_n \geq x$ 。这种情况下, 存在一个数 $y \in E$ 满足 $y \geq x > s^*$, 与 s^* 的定义相悖。

因此 s^* 满足 (a) 与 (b)。

而对于唯一性, 假设存在两个数, p 与 q , 满足 (a) 与 (b), 且假设 $p < q$ 。选择 x 满足 $p < x < q$ 。由于 p 满足 (b), 则对于 $n \geq N$, 有 $s_n < x$ 。但是这样 q 就无法满足 (a) 了。

□

3.18 Examples

(a) Let $\{s_n\}$ be a sequence containing all rationals. Then every real number is a subsequential limit, and

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} s_n = +\infty, \quad \liminf_{n \rightarrow \infty} s_n = -\infty$$

.

(b) Let $s_n = (-1^n)/[1 + (1/n)] = 1$. Then

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} s_n = 1, \quad \liminf_{n \rightarrow \infty} s_n = -1$$

(c) For a real-valued sequence $\{s_n\}$, $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = s$ if and only if

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} s_n = \liminf_{n \rightarrow \infty} s_n = s$$

本节由一个有用的 theorem 作为完结:

3.19 Theorem If $s_n \leq t_n$ for $n \geq N$, where N is fixed, then

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \inf s_n \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \inf t_n,$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup s_n \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \sup t_n.$$

Some Special Sequences

我们现在可以计算一些常见序列的极限了。这些证明都将基于以下观察：如果对于 $n \geq N$ 有 $0 \leq x_n \leq s_n$ ，这里 N 为某固定的数，那么如果 $s_n \rightarrow 0$ 则有 $x_n \rightarrow 0$ 。

3.20 Theorem

- (a) If $p > 0$, then $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^p} = 0$.
- (b) If $p > 0$, then $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[p]{p} = 1$.
- (c) $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$.
- (d) If $p > 0$ and α is real, then $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^\alpha}{(1+p)^n} = 0$.
- (e) If $|x| < 1$, then $\lim_{n \rightarrow \infty} x^n = 0$.

Proof.

- (a) 取 $n > (1/\varepsilon)^{1/p}$ 。(注意这里使用了实数系统的阿基米德性质。)
- (b) 如果 $p > 1$ ，令 $x_n = \sqrt[p]{p} - 1$ 。那么 $x_n > 0$ ，且根据二项式定理，

$$1 + nx_n \leq (1 + x_n)^n = p$$

使得

$$0 < x_n \leq \frac{p-1}{n}$$

因此 $x_n \rightarrow 0$ 。如果 $p = 1$ ，(b) 则无需证明，如果 $0 < p < 1$ ，则通过倒数可以得出结论。

- (c) 令 $x_n = \sqrt[n]{n} - 1$ 。那么当 $x_n \geq 0$ ，且根据二项式定理，

$$n = (1 + x_n)^n \geq \frac{n(n-1)}{2} x_n^2$$

因此

$$0 \leq x_n \leq \sqrt{\frac{2}{n-1}} \quad (n \geq 2)$$

(d) 令 k 为一个整数, 满足 $k > \alpha, k > 0$ 。对于 $n > 2k$,

$$(1+p)^n > \binom{n}{k} p^k = \frac{n(n-1)\cdots(n-k+1)}{k!} p^k > \frac{n^k p^k}{2^k k!}$$

因此

$$0 < \frac{n^\alpha}{(1+p)^n} < \frac{2^k k!}{p^k} n^{\alpha-k} \quad (n > 2k)$$

由于 $\alpha - k < 0$, 那么根据 (a) 有 $n^{\alpha-k} \rightarrow 0$ 。

(e) 在 (d) 中取 $\alpha = 0$ 。

□

Note

(b) 中的 $0 < p < 1$ 的情况下, 利用倒数即令 $x_n = \frac{1}{\sqrt[n]{p}} - 1$, 那么

$$\begin{aligned} (x_n + 1)^n &= \frac{1}{p} \\ nx_n + 1 &\leq (x_n + 1)^n = \frac{1}{p} \\ nx_n + 1 &\leq \frac{1}{p} \\ x_n &\leq \frac{\frac{1}{p} - 1}{n} \\ x_n &\leq \frac{1-p}{np} \end{aligned}$$

随着 n 增大 x_n 趋近于 0, 即 $x_n \rightarrow 0$ 。

(d) 中的假设 $(1+p)^n > \binom{n}{k} p^k$ 可以分别将 $k = 1$ 以及 $k = n$ 带入, 对不等式进行验证。当 $k = 1$ 时

$$(1+p)^n > \binom{n}{1} p^1 = np$$

显然不等式成立; 当 $k = n$ 时

$$(1+p)^n > \binom{n}{n} p^n = p^n$$

不等式也同样成立。那么在 $\binom{n}{k}p^k$ 展开后的分子满足

$$\begin{aligned} n &> \frac{n}{2} \\ (n-1) &> \frac{n}{2} \\ &\dots \\ (n-k+1) &> \frac{n}{2} \end{aligned}$$

其中最后一项可以简化为 $n > 2k - 2$ ，而证明中给定的假设是 $n > 2k$ ，因此同样满足不等式。将上述不等式相乘即

$$(n)(n-1)\cdots(n-k+1) > \left(\frac{n}{2}\right)^k$$

即

$$\frac{(n)(n-1)\cdots(n-k+1)}{k!}p^k > \frac{n^k p^k}{2^k k!}$$

那么可以得到

$$\begin{aligned} (1+p)^n &> \frac{n^k p^k}{2^k k!} \\ \frac{2^k k!}{p^k} &> \frac{n^k}{(1+p)^n} \end{aligned}$$

将不等式右侧的 n^k 转换为 $n^{k+\alpha-\alpha}$ ，也就是

$$\begin{aligned} \frac{2^k k!}{p^k} &> \frac{n^{k+\alpha-\alpha}}{(1+p)^n} \\ \frac{2^k k!}{p^k} &> \frac{n^\alpha}{(1+p)^n} \cdot n^{k-\alpha} \\ \frac{n^\alpha}{(1+p)^n} &< \frac{2^k k!}{p^k} n^{\alpha-k} \end{aligned}$$

又因为假设了 $k > \alpha$ ，最后通过 (a) 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} n^{\alpha-k} = 0$ 。

Series

在本章的剩余部分中，所有的序列与级数都被视作复数，除了显式的声明不为复数的情况。

3.21 Definition Given a sequence $\{a_n\}$, we use the notation

$$\sum_{n=p}^q a_n \quad (p \leq q)$$

to denote the sum $a_p + a_{p+1} + \cdots + a_q$. With $\{a_n\}$ we associate a sequence $\{s_n\}$, where

$$s_n = \sum_{k=1}^n a_k.$$

For $\{s_n\}$ we also use the symbolic expression

$$a_1 + a_2 + a_3 + \cdots$$

or, more concisely,

$$(4) \quad \sum_{n=1}^{\infty} a_n.$$

The symbol (4) we call an *infinite series*, or just a *series*. The numbers s_n are called the *partial sums* of the series. If $\{s_n\}$ converges to s , we say that the series *converges*, and write

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n = s.$$

The number s is called the sum of the series; but it should be clearly understood that s is the *limit of a sequence of sums*, and is not obtained simply by addition.

If $\{s_n\}$ diverges, the series is said to diverge.

Sometimes, for convenience of notation, we shall consider series of the form

$$(5) \quad \sum_{n=0}^{\infty} a_n.$$

And frequently, when there is no possible ambiguity, or when the distinction is immaterial, we shall simply write $\sum a_n$ in place of (4) or (5).

It is clear that every theorem about sequences can be stated in terms of series (putting $a_1 = s_1$, and $a_n = s_n - s_{n-1}$ for $n > 1$), and vice versa. But it is nevertheless useful to consider both concepts.

Note

级数的 Wiki 定义。

通常来说, 级数的项都由一个环而来, 通常是实数域 \mathbb{R} 或者是复数域 \mathbb{C} 。这种情况下, 所有级数的集其自身就是一个环 (甚至是一个结合代数), 其中加法就是每项级数的相加, 而乘法则是柯西乘积。

Note

对序列 a_n , 令 $s_n = \sum_{k=1}^n a_k$ 为**部分和**, $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 叫做无穷级数 (*infinite series*), 简称级数 (*series*)。

如果 s_n 收敛, 那么级数收敛并记为 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = s$; 如果 s_n 发散, 那么级数发散。

3.22 Theorem $\sum a_n$ converges if and only if for every $\varepsilon > 0$ there is an integer N such that

$$(6) \quad \left| \sum_{k=n}^m a_k \right| \leq \varepsilon$$

if $m \geq n \geq N$.

Note

柯西准则 Theorem 3.11 可以重新表述为, $\sum a_n$ 收敛, 当且仅当, 对于任意 $\varepsilon > 0$, 存在级数 N , 使得 $m \geq n \geq N$ 时 $\left| \sum_{k=n}^m a_k \right| \leq \varepsilon$ 。

尤其是在取值 $m = n$ 的时候 (6) 则会变为

$$|a_n| \leq \varepsilon \quad (n \geq N).$$

换言之:

3.23 Theorem If $\sum a_n$ converges, then $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$.

然而其中 $a_n \rightarrow 0$ 并不能完全确保 $\sum a_n$ 的收敛。例如级数

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$$

是发散的; 我们将在 Theorem 3.28 中进行证明。

Theorem 3.14 中所提出的单调序列, 也有着与级数所直接对应的部分。

Note

如果 Σa_n 收敛, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ 。

3.24 Theorem *A series of nonnegative terms converges if and only if its partial sums form a bounded sequence.*

Note

各项为非负的级数收敛, 当且仅当其部分和构成有界数列。

我们从现在开始, 将收敛测试统一称为“比较测试”。

3.25 Theorem

- (a) *If $|a_n| \leq c_n$ for $n \geq N_0$, where N_0 is some fixed integer, and if Σc_n converges, then Σa_n converges.*
- (b) *If $a_n \geq d_n \geq 0$ for $n \geq N_0$, and if Σd_n diverges, then Σa_n diverges.*

注意 (b) 仅作用于级数的非负部分 a_n 。

Proof.

给定 $\varepsilon > 0$, 根据柯西准则, 存在 $N \geq N_0$ 满足 $m \geq n \geq N$ 使得

$$\sum_{k=n}^m c_k \leq \varepsilon$$

因此

$$\left| \sum_{k=n}^m a_k \right| \leq \sum_{k=n}^m |a_k| \leq \sum_{k=n}^m c_k \leq \varepsilon$$

且 (a) 成立。

接着, (b) 遵循 (a), 如果 Σa_n 收敛, 所以 Σd_n (注意 (b) 同样遵循 Theorem 3.24)。□

比较测试是非常有用的; 为了更高效的使用, 我们需要熟悉一些级数的非负项是否为收敛或者发散。

Note

- 如果 N_0 是某个固定的正整数。 $n \geq N_0$ 时 $|a_n| \leq c_n$, 而且 Σc_n 也收敛, 那么 Σa_n 也收敛;
- 如果当 $n \geq N_0$ 时 $a_n \geq d_n \geq 0$, 而且 Σd_n 发散, 那么 Σa_n 也发散。

对于 (a) 而言, 当 $n \geq N_0$ 之后的所有 n 都满足 $|a_n| \leq c_n$, 那么往后的每个 n 即为

$$|a_{n+1}| \leq c_{n+1}$$

$$|a_{n+2}| \leq c_{n+2}$$

...

$$|a_m| \leq c_m$$

那么将上述所有不等式相加以后得到的便是

$$\sum_{k=n}^m |a_k| \leq \sum_{k=n}^m c_k$$

而又因为柯西标准的缘故有 $\sum_{k=n}^m c_k \leq \varepsilon$, 同时 $\left| \sum_{k=n}^m a_k \right|$ 意为和之绝对值, 是肯定小于或等于绝对值之和的, 因此有了证明中

$$\left| \sum_{k=n}^m a_k \right| \leq \sum_{k=n}^m |a_k| \leq \sum_{k=n}^m c_k \leq \varepsilon$$

这样的不等式。

Series of Nonnegative Terms

3.26 Theorem *If $0 \leq x < 1$, then*

$$\sum_{n=0}^{\infty} x^n = \frac{1}{1-x}.$$

If $x \geq 1$, the series diverges.

Proof.

如果 $x \neq 1$,

$$s_n = \sum_{k=0}^n x^k = \frac{1 - x^{n+1}}{1 - x}$$

如果令 $n \rightarrow \infty$, 对于 $x = 1$ 而言, 有

$$1 + 1 + 1 + \cdots$$

即明显是发散的。 □

在应用中出现的很多案例, 级数部分是单调递减的。下面的柯西定理因此特别有趣。该定理显著的特征是 $\{a_n\}$ 的一个相当“薄”的子序列决定了 Σa_n 的收敛或发散。

Note

如果 $x \neq 1$, 那么 s_n 作为部分和即为 $\sum_{k=0}^n x^k$, 而对于 x^k 而言可以写成 $\frac{(1-x)x^k}{1-x}$, 即证明中的 $\frac{1-x^{n+1}}{1-x}$ 。

3.27 Theorem Suppose $a_1 \geq a_2 \geq a_3 \geq \cdots \geq 0$. Then the series $\Sigma_{n=1}^{\infty} a_n$ converges if and only if the series

$$(7) \quad \sum_{k=0}^{\infty} 2^k a_{2^k} = a_1 + 2a_2 + 4a_4 + 8a_8 + \cdots$$

converges.

Proof.

根据 Theorem 3.24, 足够考虑部分和的边界。令

$$\begin{aligned} s_n &= a_1 + a_2 + \cdots + a_n, \\ t_k &= a_1 + 2a_2 + \cdots + 2^k a_{2^k}. \end{aligned}$$

对于 $n < 2^k$, 有

$$\begin{aligned} s_n &\leq a_1 + (a_2 + a_3) + \cdots + (a_{2^k} + \cdots + a_{2^{k+1}-1}) \\ &\leq a_1 + 2a_2 + \cdots + 2^k a_{2^k} \\ &= t_k, \end{aligned}$$

因此

$$(8) \quad s_n \leq t_k$$

另一方面, 如果 $n > 2^k$,

$$\begin{aligned} s_n &\geq a_1 + a_2 + (a_3 + a_4) + \cdots + (a_{2^{k-1}+1} + \cdots + a_{2^k}) \\ &\geq \frac{1}{2}a_1 + a_2 + 2a_4 + \cdots + 2^{k-1}a_{2^k} \\ &= \frac{1}{2}t_k, \end{aligned}$$

因此

$$(9) \quad 2s_n \geq t_k.$$

根据 (8) 与 (9), 序列 $\{s_n\}$ 与 $\{t_k\}$ 要么同时是有界的, 要么是同时是无界的。证明完毕。 \square

Note

令 $a_1 \geq a_2 \geq a_3 \geq \cdots \geq 0$, 那么 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 当且仅当 $\sum_{n=0}^{\infty} 2^k a_{2^k}$ 收敛。

3.28 Theorem $\sum \frac{1}{n^p}$ converges if $p > 1$ and diverges if $p \leq 1$.

Proof.

如果 $p \leq 0$, 遵循 Theorem 3.23 收敛。如果 $p > 0$, 则 Theorem 3.27 是适当的, 且将带来级数

$$\sum_{k=0}^{\infty} 2^k \cdot \frac{1}{2^{kp}} = \sum_{k=0}^{\infty} 2^{(1-p)k}$$

现在, $2^{1-p} < 1$ 当且仅当 $1-p < 0$, 那么该结果咋遵循了几何级数的比较测试 (在 Theorem 3.26 中取 $x = 2^{1-p}$)。 \square

Note

若 $p > 1$, $\sum \frac{1}{n^p}$ 收敛; 若 $p \leq 1$, 它就发散。

3.29 Theorem If $p > 1$,

$$(10) \quad \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n(\log n)^p}$$

converges; if $p \leq 1$, the series diverges.

“log n” 意味着 n 在基 e 的对数; e 将在后续 Definition 3.30 中进行定义。我们令级数从 $n = 2$ 开始, 因为 $\log 1 = 0$ 。

Proof.

对数函数的单调性（将会在第八章中做详细的讨论）表明 $\{\log n\}$ 递增。因此 $\{1/n \log n\}$ 递减，可以应用 Theorem 3.27 在 (10) 上；这将给我们一个级数

$$(11) \quad \sum_{k=1}^{\infty} 2^k \cdot \frac{1}{2^k (\log 2^k)} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(k \log 2)^p} = \frac{1}{(\log 2)^p} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^p}$$

且 Theorem 3.29 遵循 Theorem 3.28.

该过程很明显是连续的。例如，

$$(12) \quad \sum_{n=3}^{\infty} \frac{1}{n \log n \log \log n}$$

是发散的，而

$$(13) \quad \sum_{n=3}^{\infty} \frac{1}{n \log n (\log \log n)^2}$$

是收敛的。 □

The Number e

3.30 Definition

$$e = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!}$$

这里 $n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots n$ 如果 $n \geq 1$ ，且 $0! = 1$ 。

因为

$$\begin{aligned} s_n &= 1 + 1 + \frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \cdots + \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot n} \\ &< 1 + 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \cdots + \frac{1}{2^{n-1}} \\ &< 3 \end{aligned}$$

级数收敛，因此定理成立。实际上，该级数收敛的非常迅速，使得我们可以计算 e 时获得很大的精确度。

同样 e 也可以被其他的极限过程所定义：

3.31 Theorem

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

Proof.

令

$$s_n = \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!}, \quad t_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$$

根据二项式定理,

$$\begin{aligned} t_n = 1 + 1 + \frac{1}{2!} \left(1 - \frac{1}{n}\right) + \frac{1}{3!} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 - \frac{2}{n}\right) + \cdots \\ + \frac{1}{n!} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 - \frac{2}{n}\right) \cdots \left(1 - \frac{n-1}{n}\right) \end{aligned}$$

因此 $t_n \leq s_n$, 所以根据 Theorem 3.19 有

$$(14) \quad \limsup_{n \rightarrow \infty} t_n \leq e,$$

接下来如果 $n \geq m$,

$$t_n \geq 1 + 1 + \frac{1}{2!} \left(1 - \frac{1}{n}\right) + \cdots + \frac{1}{m!} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdots \left(1 - \frac{m-1}{n}\right)$$

令 $n \rightarrow \infty$, 保持 m 固定。我们有

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} t_n \geq 1 + 1 + \frac{1}{2!} + \cdots + \frac{1}{m!}$$

使得

$$s_m \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} t_n$$

令 $m \rightarrow \infty$, 我们最终可以获得

$$(15) \quad e \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} t_n$$

定理遵循 (14) 以及 (15)。

那么级数 $\sum \frac{1}{n!}$ 的急速收敛可以被如下估计: 如果 s_n 具有上述的意义, 则有

$$\begin{aligned} e - s_n &= \frac{1}{(n+1)!} + \frac{1}{(n+2)!} + \frac{1}{(n+3)!} + \cdots \\ &< \frac{1}{(n+1)!} \left\{ 1 + \frac{1}{n+1} + \frac{1}{(n+1)^2} + \cdots \right\} = \frac{1}{n!n} \end{aligned}$$

使得

$$(16) \quad 0 < e - s_n < \frac{1}{n!n}$$

因此比如说 s_{10} , 近似 e 的错误小于 10^{-7} 。不等式 (16) 也具有理论上的意义, 因为它让我们更容易证明 e 的无理性。 \square

3.32 Theorem *e is irrational.**Proof.*

假设 e 是有理的。那么有 $e = p/q$, 且 p 与 q 是正整数。根据 (16),

$$(17) \quad 0 < q!(e - s_q) < \frac{1}{q}$$

根据假设, $q!e$ 是一个整数。由于

$$q!s_q = q!(1 + 1 + \frac{1}{2!} + \cdots + \frac{1}{q!})$$

是一个整数, 可知 $q!(e - s_q)$ 是一个整数。

由于 $q \geq 1$, (17) 表明存在一个位于 0 与 1 之间的整数, 有此得到了悖论。 □

The Root and Ratio Tests

3.33 Theorem (Root Test) *Given $\sum a_n$, put $\alpha = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$. Then*

- (a) *if $\alpha < 1$, $\sum a_n$ converges;*
- (b) *if $\alpha > 1$, $\sum a_n$ diverges;*
- (c) *if $\alpha = 1$, the test gives no information.*

Proof.

如果 $\alpha < 1$, 我们可以选择 β 使得 $\alpha < \beta < 1$, 以及一个整数 N 满足

$$\sqrt[n]{|a_n|} < \beta$$

其中 $n \geq N$ (根据 Theorem 3.17(b))。即, $n \geq N$ 说明

$$|a_n| < \beta^n$$

。因为 $0 < \beta < 1$, $\sum \beta^n$ 收敛, 其收敛遵循比较测试。

如果 $\alpha > 1$, 那么在此根据 Theorem 3.17, 存在一个序列 $\{n_k\}$ 满足

$$\sqrt[n_k]{|a_{n_k}|} \rightarrow \alpha$$

因此 $|a_n| > 1$ 对于无穷的 n , 条件 $a_n \rightarrow 0$ 对于 $\sum a_n$ 的收敛而言是必要的, 即不成立 (Theorem 3.23)。

证明 (c), 考虑以下级数

$$\sum \frac{1}{n}, \sum \frac{1}{n^2}$$

对于这些级数 $\alpha = 1$, 但是前者发散, 后者收敛。 □

Note**根值审敛法****3.34 Theorem (Ratio Test)** *The series Σa_n*

(a) *converges if $\limsup_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| < 1$,*

(b) *diverges if $\left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| \geq 1$ for all $n \geq n_0$, where n_0 is some fixed integer.*

Proof.

如果条件 (a) 成立, 我们可以找到 $\beta < 1$, 以及一个整数 N , 满足

$$\left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| < \beta$$

其中 $n \geq N$ 。尤其是,

$$\begin{aligned} |a_{N+1}| &< \beta |a_N|, \\ |a_{N+2}| &< \beta |a_{N+1}| < \beta^2 |a_N|, \\ &\dots \\ |a_{N+p}| &< \beta^p |a_N|. \end{aligned}$$

即

$$|a_n| < |a_N| \beta^{-N} \cdot \beta^n$$

其中 $n \geq N$, 且 (a) 遵循比较测试, 因为 $\Sigma \beta^n$ 收敛。

如果 $|a_{n+1}| \geq |a_n|$ 其中 $n \geq n_0$, 很容易得出条件 $a_n \rightarrow 0$ 并不成立, 因此 (b) 成立。

注: $\lim a_{n+1}/a_n = 1$ 说明不了 Σa_n 是收敛的, 级数 $\Sigma 1/n$ 与 $\Sigma 1/n^2$ 可以证明。 \square

Note**比值审敛法****3.35 Examples**

(a) 考虑级数

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{2^3} + \frac{1}{3^3} + \frac{1}{2^4} + \frac{1}{3^4} + \dots$$

其拥有

$$\begin{aligned}\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2}{3}\right)^n = 0, \\ \liminf_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[2n]{\frac{1}{3^n}} = \frac{1}{\sqrt{3}}, \\ \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[2n]{\frac{1}{2^n}} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \\ \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \left(\frac{3}{2}\right)^n = +\infty.\end{aligned}$$

根植审敛法表明收敛；而比值审敛法并不。

(b) 同样对下面级数成立

$$\frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{8} + \frac{1}{4} + \frac{1}{32} + \frac{1}{16} + \frac{1}{128} + \frac{1}{64} + \cdots$$

满足

$$\begin{aligned}\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} &= \frac{1}{8}, \\ \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_2} &= 2,\end{aligned}$$

但是

$$\lim \sqrt[n]{a_n} = \frac{1}{2}$$

3.37 Theorem For any sequence $\{c_n\}$ of positive numbers,

$$\begin{aligned}\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{c_{n+1}}{c_n} &\leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{c_n}, \\ \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{c_n} &\leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{c_{n+1}}{c_n}.\end{aligned}$$

Proof.

我们应该证明第二个不等式；第一个不等式非常的类似。令

$$\alpha = \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{c_{n+1}}{c_n}$$

如果 $\alpha = +\infty$ ，则无需证明。如果 α 是有限的，选择 $\beta > \alpha$ 。存在一个整数 N 满足

$$\frac{c_{n+1}}{c_n} \leq \beta$$

其中 $n \geq N$ 。特别是对于任何 $p > 0$,

$$c_{N+k+1} \leq \beta c_{N+k} \quad (k = 0, 1, \dots, p-1)$$

将这些不等式相乘我们获得

$$c_{N+p} \leq \beta^p c_N$$

或者

$$c_n \leq c_N \beta^{-N} \cdot \beta^n \quad (n \geq N)$$

因此

$$\sqrt[n]{c_n} \leq \sqrt[n]{c_N \beta^{-N}} \cdot \beta$$

根据 Theorem 3.20(b), 有

$$(18) \quad \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{c_n} \leq \beta$$

又因为 (18) 对于任何 $\beta > \alpha$ 而言都成立, 因此有

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{c_n} \leq \alpha$$

□

Power Series

3.38 Definition Given a sequence $\{c_n\}$ of complex numbers, the series

$$(19) \quad \sum_{n=0}^{\infty} c_n z^n$$

is called a *power series*. The numbers c_n are called the *coefficients* of the series; z is a complex number.

通常而言, 级数的收敛或发散取决于 z 的选择。更确切的来说, 每个幂级数都有一个关联圆, 称为**收敛圆**, 如果 z 在圆内, 幂级数就收敛, 如果在圆外则发散 (这里把平面看做半径无限大的圆的内部, 把一点看作是半径为零的圆)。级数在收敛圆上的性质不能简单的叙述。

Note

对于复数序列 $\{c_n\}$, 级数 $\sum_{n=0}^{\infty} c_n z^n$ 叫做**幂级数**, c_n 叫做这个级数的**系数**。
单变量的幂级数是一个拥有下列形式的无限级数:

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - c)^n = a_0 + a_1 (x - c) + a_2 (x - c)^2 + \dots$$

其中 a_n 代表第 n 项的系数, c 为一个常数。

3.39 Theorem Given the power series $\sum c_n z^n$, put

$$\alpha = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|c_n|}, \quad R = \frac{1}{\alpha}.$$

(If $\alpha = 0, R = +\infty$; if $\alpha = +\infty, R = 0$.) Then $\sum c_n z^n$ converges if $|z| < R$, and diverges if $|z| > R$.

Proof.

令 $a_n = c_n z^n$, 并且应用根值审敛法:

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = |z| \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|c_n|} = \frac{|z|}{R}$$

注意: R 被称为 $\sum c_n z^n$ 收敛的半径。 □

3.40 Examples

- (a) The series $\sum n^n z^n$ has $R = 0$.
- (b) The series $\sum \frac{z^n}{n!}$ has $R = +\infty$. (In this case the ratio test is easier to apply than the root test.)
- (c) The series $\sum z^n$ has $R = 1$. If $|z| = 1$, the series diverges, since $\{z^n\}$ does not tend to 0 as $n \rightarrow \infty$.
- (d) The series $\sum \frac{z^n}{n}$ has $R = 1$. It diverges if $z = 1$. It converges for all other z with $|z| = 1$. (The last assertion will be proved in Theorem 3.44.)
- (e) The series $\sum \frac{z^n}{n^2}$ has $R = 1$. It converges for all z with $|z| = 1$, by the comparison test, since $|z^n/n^2| = 1/n^2$.

Summation by Parts

3.41 Theorem Given two sequences $\{a_n\}$, $\{b_n\}$, put

$$A_n = \sum_{k=0}^n a_k$$

if $n \geq 0$; put $A_{-1} = 0$. Then, if $0 \leq p \leq q$, we have

$$(20) \quad \sum_{n=p}^q a_n b_n = \sum_{n=p}^{q-1} A_n (b_n - b_{n+1}) + A_q b_q - A_{p-1} b_p$$

Proof.

$$\sum_{n=p}^q a_n b_n = \sum_{n=p}^q (A_n - A_{n-1}) b_n = \sum_{n=p}^q A_n b_n - \sum_{n=p-1}^{q-1} A_n b_{n+1}$$

式 (20), 被称为“部分和式 partial summation formula”, 在探索带有 $\Sigma a_n b_n$ 项的级数时非常有用, 特别是当 $\{b_n\}$ 是单调的情况下。 \square

Note

$$\begin{aligned} \sum_{n=p}^q a_n b_n &= \sum_{n=p}^q (A_n - A_{n-1}) b_n \\ &= \sum_{n=p}^q A_n b_n - \sum_{n=p}^q A_{n-1} b_n \\ &= \sum_{n=p}^{q-1} A_n b_n + A_q b_q - \sum_{n=p}^q A_{n-1} b_n \\ &= \sum_{n=p}^{q-1} A_n b_n + A_q b_q - \sum_{n=p-1}^{q-1} A_n b_{n+1} \\ &= \sum_{n=p}^{q-1} A_n b_n + A_q b_q - \sum_{n=p}^{q-1} A_n b_{n+1} - A_{p-1} b_p \\ &= \sum_{n=p}^{q-1} A_n (b_n + b_{n+1}) + A_q b_q - A_{p-1} b_p \end{aligned}$$

其中第 3 步的第三项 $\sum_{n=p}^q A_{n-1} b_n$ 转换至第四步的过程中, 可将 n 视为 $m+1$, 那么就有

$$\begin{aligned} \sum_{n=p}^q A_{n-1} b_n &= \sum_{m+1=p}^q A_{m+1-1} b_{m+1} \\ &= \sum_{m=p-1}^{q-1} A_m b_{m+1} \end{aligned}$$

3.42 Theorem Suppose

- (a) the partial sums A_n of Σa_n form a bounded sequence;
- (b) $b_0 \geq b_1 \geq b_2 \geq \cdots$;

(c) $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = 0$.

Then $\sum a_n b_n$ converges.

Proof.

选取 M 对所有 n 满足 $|A_n| \leq M$ 。给定 $\varepsilon > 0$ ，存在一个整数 N 使得 $b_N \leq (\varepsilon/2M)$ 。对于 $N \leq p \leq q$ ，有

$$\begin{aligned} \left| \sum_{n=p}^q a_n b_n \right| &= \left| \sum_{n=p}^{q-1} A_n (b_n - b_{n+1}) + A_q b_q - A_{p-q} b_p \right| \\ &\leq M \left| \sum_{n=p}^{q-1} (b_n - b_{n+1}) + b_q + b_p \right| \\ &= 2M b_p \leq 2M b_N \leq \varepsilon \end{aligned}$$

收敛现在遵循柯西准则。注意第一个不等式中依赖了 $b_n - b_{n+1} \geq 0$ 。 \square

3.43 Theorem Suppose

(a) $|c_1| \geq |c_2| \geq |c_3| \geq \cdots$;

(b) $c_{2m-1} \geq 0, c_{2m} \leq 0 \quad (m = 1, 2, 3, \cdots)$;

(c) $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = 0$.

Then $\sum c_n$ converges.

满足 (b) 的级数也被称为“交错级数 *alternating series*”；该定理也熟知为莱布尼兹定理。

Proof.

应用 Theorem 3.42，以及 $a_n = (-1)^{n+1}$ ， $b_n = |c_n|$ 。 \square

3.44 Theorem Suppose the radius of convergence of $\sum c_n z^n$ is 1, and suppose $c_0 \geq c_1 \geq c_2 \geq \cdots, \lim_{n \rightarrow \infty} c_n = 0$. Then $\sum c_n z^n$ converges at every point on the circle $|z| = 1$, except possibly at $z = 1$.

Proof.

令 $a_n = z^n$ ， $b_n = c_n$ 。Theorem 3.42 的假设满足了，因为

$$|A_n| = \left| \sum_{m=0}^n z^m \right| = \left| \frac{1 - z^{n+1}}{1 - z} \right| \leq \frac{2}{|1 - z|}$$

如果 $|z| = 1, z \neq 1$ \square

Absolute Convergence

当级数 $\sum |a_n|$ 收敛, 那么级数 $\sum a_n$ 则被称为绝对收敛。

3.45 Theorem *If $\sum a_n$ converges absolutely, then $\sum a_n$ converges.*

Proof.

该声明遵循不等式

$$\left| \sum_{k=n}^m a_k \right| \leq \sum_{k=n}^m |a_k|$$

再加上柯西准则。

□

Note

绝对收敛必收敛。

3.46 Remarks For series of positive terms, absolute convergence is the same as convergence.

If $\sum a_n$ converges, but $\sum |a_n|$ diverges, we say that $\sum a_n$ converges *non-absolutely*.

Addition and Multiplication of Series

3.47 Theorem *If $\sum a_n = A$, and $\sum b_n = B$, then $\sum (a_n + b_n) = A + B$, and $\sum ca_n = cA$, for any fixed c .*

Proof.

令

$$A_n = \sum_{k=0}^n a_k, \quad B_n = \sum_{k=0}^n b_k.$$

那么有

$$A_n + B_n = \sum_{k=0}^n (a_k + b_k).$$

又因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} A_n = A$ 以及 $\lim_{n \rightarrow \infty} B_n = B$, 可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (A_n + B_n) = A + B$$

而第二个声明更简单, 此处省略。

因此两个收敛的级数或许可以逐项相加, 而得到的级数收敛于两个级数之和。当考虑级数相乘时的情况, 则会变得更复杂。这可以有几种方法完成; 我们应该考虑“柯西乘法 Cauchy product”。

□

3.48 Definition Given Σa_n and Σb_n , we put

$$c_n = \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

and call Σc_n the *product* of the two given series.

This definition may be motivated as follows. If we take two power series $\Sigma a_n z^n$ and $\Sigma b_n z^n$, multiply them term by term, and collect terms containing the same power of z , we get

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n \cdot \sum_{n=0}^{\infty} b_n z^n &= (a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots)(b_0 + b_1 z + b_2 z^2 + \dots) \\ &= a_0 b_0 + (a_0 b_1 + a_1 b_0)z + (a_0 b_2 + a_1 b_1 + a_2 b_0)z^2 + \dots \\ &= c_0 + c_1 z + c_2 z^2 + \dots \end{aligned}$$

Setting $z = 1$, we arrive at the above definition.

3.49 Example If

$$A_n = \sum_{k=0}^n a_k, \quad B_n = \sum_{k=0}^n b_k, \quad C_n = \sum_{k=0}^n c_k,$$

and $A_n \rightarrow A$, $B_n \rightarrow B$, then it is not at all clear that $\{C_n\}$ will converge to AB , since we do not have $C_n = A_n B_n$. The dependence of $\{C_n\}$ on $\{A_n\}$ and $\{B_n\}$ is quite a complicated one (see the proof of Theorem 3.50). We shall now show that the product of two convergent series may actually diverge.

The series

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n+1}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{\sqrt{4}} + \dots$$

converges (Theorem 3.43). We form the product of this series with itself and obtain

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} c_n &= 1 - \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}\right) + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \\ &\quad - \left(\frac{1}{\sqrt{4}} + \frac{1}{\sqrt{3}\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{4}}\right) + \dots \end{aligned}$$

so that

$$c_n = (-1)^n \sum_{k=0}^n \frac{1}{\sqrt{(n-k+1)(k+1)}}$$

Since

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

we have

$$|c_n| \geq \sum_{k=0}^n \frac{2}{n+2} = \frac{2(n+1)}{n+2}$$

so that the condition $c_n \rightarrow 0$, which is necessary for the convergence of Σc_n , is not satisfied.

Note

级数 $\Sigma \frac{(-1)^n}{\sqrt{n+1}}$ 与自身的乘积, 以下 a_n 与 b_n 皆为 $\Sigma \frac{(-1)^n}{\sqrt{n+1}}$:

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=0}^{\infty} c_n &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \sum_{n=0}^{\infty} b_n \\
 &= a_0 b_0 + (a_0 b_1 + a_1 b_0) + (a_0 b_2 + a_1 b_1 + a_2 b_0) + \cdots \quad (\text{a}) \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n+1}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n+1}} \\
 &= \frac{(-1)^0}{\sqrt{0+1}} \cdot \frac{(-1)^0}{\sqrt{0+1}} + \left(\frac{(-1)^0}{\sqrt{0+1}} \cdot \frac{(-1)^1}{\sqrt{1+1}} + \frac{(-1)^1}{\sqrt{1+1}} \cdot \frac{(-1)^0}{\sqrt{0+1}} \right) + \\
 &\quad \left(\frac{(-1)^0}{\sqrt{0+1}} \cdot \frac{(-1)^2}{\sqrt{2+1}} + \frac{(-1)^1}{\sqrt{1+1}} \cdot \frac{(-1)^1}{\sqrt{1+1}} + \frac{(-1)^2}{\sqrt{2+1}} \cdot \frac{(-1)^0}{\sqrt{0+1}} \right) + \cdots \\
 &= 1 - \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{4}} + \frac{1}{\sqrt{3}\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{4}} \right) \\
 &\quad + \cdots
 \end{aligned}$$

那么根据 Definition 3.48,

$$\begin{aligned}
 c_n &= \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} \\
 &= \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{\sqrt{k+1}} \cdot \frac{(-1)^{n-k}}{\sqrt{n-k+1}} \\
 &= \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^n}{\sqrt{(k+1)(n-k+1)}} \\
 &\geq (-1)^n \sum_{k=0}^n \frac{2}{n+2} \quad (\text{b})
 \end{aligned}$$

那么取绝对值后有

$$|c_n| \geq \sum_{k=0}^n \frac{2}{n+2}$$

显然 $c_n \rightarrow 0$ 不成立, 那么 Σc_n 则无法收敛 (Theorem 3.23)。

注: (a): Definition 3.48 中, $z = 1$ 的情况; (b): 根据 $(n-k+1)(k+1) = (\frac{n}{2}+1)^2 - (\frac{n}{2}-k)^2 \leq (\frac{n}{2}+1)^2$ 。

3.50 Theorem *Suppose*

- (a) $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$ converges absolutely,
- (b) $\sum_{n=0}^{\infty} a_n = A$,
- (c) $\sum_{n=0}^{\infty} b_n = B$,
- (d) $c_n = \sum_{k=0}^{\infty} a_k b_{n-k} \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$.

Then

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n = AB.$$

That is, the product of two convergent series converges, and to the right value, if at least one of the two series converges absolutely.

Proof.

令

$$A_n = \sum_{k=0}^n a_k, \quad B_n = \sum_{k=0}^n b_k, \quad C_n = \sum_{k=0}^n c_k, \quad \beta_n = B_n - B$$

那么有

$$\begin{aligned} C_n &= a_0 b_0 + (a_0 b_1 + a_1 b_0) + \cdots + (a_0 b_n + a_1 b_{n-1} + \cdots + a_n b_0) \\ &= a_0 B_n + a_1 B_{n-1} + \cdots + a_n B_0 \\ &= a_0 (B + \beta_n) + a_1 (B + \beta_{n-1}) + \cdots + a_n B + \beta_0 \\ &= A_n B + a_0 \beta_n + a_1 \beta_{n-1} + \cdots + a_n \beta_0 \end{aligned}$$

令

$$\gamma_n = a_0 \beta_n + a_1 \beta_{n-1} + \cdots + a_n \beta_0$$

我们希望得到 $C_n \rightarrow AB$ 。由于 $A_n B \rightarrow AB$ ，它足够得到

$$(21) \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \gamma_n = 0$$

令

$$\alpha = \sum_{n=0}^{\infty} |a_n|$$

【这里用到了 (a)。】给定 $\varepsilon > 0$ 。根据 (c)， $\beta_n \rightarrow 0$ 。因此我们可以选择 N 使得对于 $n \geq N$ 满足 $|\beta_n| \leq \varepsilon$ ，其中

$$\begin{aligned} |\gamma_n| &\leq |\beta_0 a_n + \cdots + \beta_N a_{n-N}| + |\beta_{N+1} a_{n-N-1} + \cdots + \beta_n a_0| \\ &\leq |\beta_0 a_n + \cdots + \beta_N a_{n-N}| + \varepsilon \alpha \end{aligned}$$

保持 N 固定, 令 $n \rightarrow \infty$, 得到

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} |\gamma_n| \leq \varepsilon \alpha$$

因为 $k \rightarrow \infty$ 时有 $a_k \rightarrow 0$ 。而 ε 是随机的, 式 (21) 成立。 \square

Note

重点: AB 至少一个绝对收敛。

关于 C_n 的计算:

$$\begin{aligned} C_n &= \underline{a_0}b_0 + (\underline{a_0}b_1 + \underline{a_1}b_0) + \cdots + (\underline{a_0}b_n + \underline{a_1}b_{n-1} + \cdots + a_nb_0) \\ &= \underline{a_0}(b_0 + b_1 + \cdots + b_n) + \underline{a_1}(b_0 + \cdots + b_{n-1}) + \cdots + a_n(b_0) \\ &= a_0B_n + a_1B_{n-1} + \cdots + a_nB_0 \\ &= \underline{a_0}(B + \beta_n) + \underline{a_1}(B + \beta_{n-1}) + \cdots + \underline{a_n}B + \beta_0 \\ &= \underline{A_n}B + a_0\beta_n + a_1\beta_{n-1} + \cdots + a_n\beta_0 \end{aligned}$$

关于 γ_n 的计算:

$$\begin{aligned} \gamma_n &= a_0\beta_n + a_1\beta_{n-1} + \cdots + a_n\beta_0 \\ &= \beta_0a_n + \beta_1a_{n-1} + \cdots + \beta_Na_{n-N} + \beta_{N-1}a_{n-(N+1)} + \cdots + \beta_na_0 \\ |\gamma_n| &= |\beta_0a_n + \beta_1a_{n-1} + \cdots + \beta_Na_{n-N}| + |\beta_{N-1}a_{n-(N+1)} + \cdots + \beta_na_0| \\ &\leq |\beta_0a_n + \beta_1a_{n-1} + \cdots + \beta_Na_{n-N}| + \varepsilon\alpha \end{aligned}$$

3.51 Theorem If the series $\Sigma a_n, \Sigma b_n, \Sigma c_n$ converge to A, B, C , and $c_n = a_0b_n + \cdots + a_nb_0$, then $C = AB$.

这里没有关于绝对收敛的假设。我们将在 Theorem 8.2 完成之后给到一个简单的证明（其依赖于幂级数的连续性）。

Rearrangements

3.52 Definition Let $\{k_n\}$, $n = 1, 2, 3, \dots$, be a sequence in which every positive integer appears once and only once (that is, $\{k_n\}$ is a 1-1 function from \mathbf{J} onto \mathbf{J} , in the notation of Definition 2.2). Putting

$$a'_n = a_{k_n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

we say that $\Sigma a'_n$ is a **rearrangement** of Σa_n .

如果 $\{s_n\}$, $\{s'_n\}$ 分别为 Σa_n , $\Sigma a'_n$ 部分和的序列, 那么很容易知道这两个序列有完全不同的成员所组成。因此问题就被引导到: 在什么条件下, 一个收敛级数的所有重排会收敛, 以及总和是否一定相同。

3.53 Example Consider the convergent series

$$(22) \quad 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \frac{1}{5} - \frac{1}{6} + \cdots$$

and one of its rearrangements

$$(23) \quad 1 + \frac{1}{3} - \frac{1}{2} + \frac{1}{5} + \frac{1}{7} - \frac{1}{4} + \frac{1}{9} + \frac{1}{11} - \frac{1}{6} + \cdots$$

in which two positive terms are always followed by one negative. If s is the sum of (22), then

$$s < 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} = \frac{5}{6}$$

Since

$$\frac{1}{4k-3} + \frac{1}{4k-1} - \frac{1}{2k} > 0$$

for $k \geq 1$, we see that $s'_3 < s'_6 < s'_9 < \cdots$, where s'_n is n th partial sum of (23). Hence

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} s'_n > s'_3 = \frac{5}{6}$$

so that (23) certainly does not converge to s .

3.54 Theorem Let Σa_n be a series of real numbers which converges, but not absolutely. Suppose

$$-\infty \leq \alpha \leq \beta \leq \infty$$

Then there exists a rearrangement $\Sigma a'_n$ with partial sums s'_n such that

$$(24) \quad \liminf_{n \rightarrow \infty} s'_n = \alpha, \quad \limsup_{n \rightarrow \infty} s'_n = \beta.$$

Proof.

令

$$p_n = \frac{|a_n| + a_n}{2}, \quad q_n = \frac{|a_n| - a_n}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

那么 $p_n - q_n = a_n$, $p_n + q_n = |a_n|$, $p_n \geq 0$, $q_n \geq 0$ 。级数 Σp_n , Σq_n 必须皆为发散。

如果皆为收敛, 那么

$$\Sigma(p_n + q_n) = \Sigma|a_n|$$

将会收敛, 这与假设相悖。又因为

$$\sum_{n=1}^N a_n = \sum_{n=1}^N (p_n - q_n) = \sum_{n=1}^N p_n - \sum_{n=1}^N q_n$$

若 Σp_n 发散而 Σq_n 收敛（或者反过来）说明 Σa_n 发散，同样与假设相悖。

现在令 P_1, P_2, P_3, \dots 顺序代表 Σa_n 的非负项，令 Q_1, Q_2, Q_3, \dots 顺序代表 Σa_n 负数项的绝对值。

级数 $\Sigma P_n, \Sigma Q_n$ 与 $\Sigma p_n, \Sigma q_n$ 仅不同于为零的项，因此是发散的。

接着构建序列 $\{m_n\}, \{k_n\}$ 满足级数

$$(25) \quad P_1 + \dots + P_{m_1} - Q_1 - \dots - Q_{k_1} + P_{m_1+1} + \dots + P_{m_2} - Q_{k_1+1} - \dots - Q_{k_2} + \dots$$

即显然是 Σa_n 的重排，满足式 (24)。

选择实数序列 $\{\alpha_n\}, \{\beta_n\}$ 满足 $\alpha_n \rightarrow \alpha, \beta_n \rightarrow \beta, \alpha_n < \beta, \beta_1 > 0$ 。

令 m_1, k_1 为最小的整数满足

$$P_1 + \dots + P_{m_1} > \beta_1, \\ P_1 + \dots + P_{m_1} - Q_1 - \dots - Q_{k_1} < \alpha_1;$$

令 m_2, k_2 为最小的整数满足

$$P_1 + \dots + P_{m_1} - Q_1 - \dots - Q_{k_1} + P_{m_1+1} + \dots + P_{m_2} > \beta_2, \\ P_1 + \dots + P_{m_1} - Q_1 - \dots - Q_{k_1} + P_{m_1+1} + \dots + P_{m_2} - Q_{k_1+1} - \dots - Q_{k_2} < \alpha_2;$$

并持续这个过程。由于 ΣP_n 与 ΣQ_n 是发散的，因此上述过程成立。

如果 x_n, y_n 代表式 (25) 的部分和，其最终项为 $P_{m_n}, -Q_{k_n}$ ，那么

$$|x_n - \beta_n| \leq P_{m_n}, \quad |y_n - \alpha_n| \leq Q_{k_n}$$

由于在 $n \rightarrow \infty$ 时有 $P_n \rightarrow 0$ 以及 $Q_n \rightarrow 0$ ，可得 $x_n \rightarrow \beta, y_n \rightarrow \alpha$ 。

最后，很明显没有小于 α 或是大于 β 的数可以成为式 (25) 部分和子序列的极限。 \square

Note

论证关键：

1. 证明 $\Sigma p_n, \Sigma q_n$ 皆为发散；
2. 证明式 (25) 为 Σa_n 的重排；
3. 不断取 m, k 最小整数，重复步骤证明式 (25) 被约束在 (α, β) 之内。

关于式 (25):

$$[(P_1 + \cdots) + \underline{P_{m_1}} + (P_{m_1+1} + \cdots) + \underline{P_{m_2}} + (P_{m_2+1} + \cdots) + \cdots] \quad (1)$$

$$-[(Q_1 + \cdots) + \underline{Q_{k_1}} + (Q_{k_1+1} + \cdots) + \underline{Q_{k_2}} + (Q_{k_2+1} + \cdots) + \cdots] \quad (2)$$

显然 (1) - (2) 为 Σa_n 的重排。

那么对于 m_1, k_1 而言:

$$\underline{(P_1 + \cdots) + P_{m_1}} > \beta_1$$

$$[(P_1 + \cdots) + P_{m_1}] - [(Q_1 + \cdots) + Q_{k_1}] < \alpha_1$$

对于 m_2, k_2 而言:

$$\underline{(P_1 + \cdots) + P_{m_1}} + \underline{(P_{m_1+1} + \cdots) + P_{m_2}} > \beta_2$$

$$\begin{aligned} &[(P_1 + \cdots) + P_{m_1} + (P_{m_1+1} + \cdots) + P_{m_2}] - \\ &[(Q_1 + \cdots) + Q_{k_1} + (Q_{k_1+1} + \cdots) + Q_{k_2}] < \alpha_2 \end{aligned}$$

ΣP_n 与 ΣQ_n 发散, 上述过程可一直重复。

3.55 Theorem *If Σa_n is a series of complex numbers which converges absolutely, then every rearrangement of Σa_n converges, and they all converge to the same sum.*

Proof.

令 $\Sigma a'_n$ 作为重排, 其部分和为 s'_n 。给定 $\varepsilon > 0$, 存在一个整数 N 使得 $m \geq n \geq N$ 满足

$$(26) \quad \sum_{i=n}^m |a_i| \leq \varepsilon$$

选择 p 使得整数 $1, 2, \dots, N$ 都包含在 k_1, k_2, \dots, k_p 集中 (使用 Definition 3.52)。那么如果 $n > p$, 那么 a_1, \dots, a_N 将取消差值 $s_n - s'_n$, 根据 (26) 满足 $|s_n - s'_n| \leq \varepsilon$ 。因此 $\{s'_n\}$ 与 $\{s_n\}$ 一样收敛。 \square

4 Continuity

函数与其相关的术语在 Definition 2.1 与 2.2 中有过介绍。尽管我们更应该（在之后的章节中）关注实数与复数函数（例如函数中值为实数或复数），同样讨论向量化值的函数（例如函数的值在 R^k 中）以及在任意的度量空间中的函数。在这些范畴内讨论的定理并不会比仅约束在实数函数中讨论更容易，这例如实际上简化了以及区分了场景，以抛弃不必要的假设并在更适当且普遍的上下文中陈述以及证明定理。

函数定义的领域同样是在度量空间上，适用于不同特化的实例。

Limits of Functions

4.1 Definition Let X and Y be metric spaces; suppose $E \subset X$, f maps E into Y , and p is a limit point of E . We write $f(x) \rightarrow q$ as $x \rightarrow p$, or

$$(1) \quad \lim_{x \rightarrow p} f(x) = q$$

if there is a point $q \in Y$ with the following property: For every $\varepsilon > 0$ there exists a $\delta > 0$ such that

$$(2) \quad d_Y(f(x), q) < \varepsilon$$

for all points $x \in E$ for which

$$(3) \quad 0 < d_X(x, p) < \delta$$

此处的 d_X 与 d_Y 分别代表 X 与 Y 中的距离。

如果 X 以及/或者 Y 被替换成实数线，复数平面，或者是欧式空间 R^k ，那么距离 d_X, d_Y 也被替换为绝对值，或者是距离（详见 Sec 2.16）。

需要注意的是 $p \in X$ ，这里的 p 需要是上述定义中，非 E 上的任何一点。除此之外，即使如果 $p \in E$ ，我们很容易得到 $f(p) \neq \lim_{x \rightarrow p} f(x)$ 。

Note

函数的极限：令 $f: E \subset X \rightarrow Y$ ， X, Y 为度量空间，且 p 是 E 的极限点。凡是当 $x \rightarrow p$ 时 $f(x) \rightarrow q$ ，或 $\lim_{x \rightarrow p} f(x) = q$ 时，存在 $q \in Y$ 具有以下性质：对每个 $\varepsilon > 0$ ，存在 $\delta > 0$ ，使 $d_Y(f(x), q) < \varepsilon$ 对满足 $0 < d_X(x, p) < \delta$ 的一切点 $x \in E$ 成立。

我们可以将上述定义重新表现为序列的极限形式:

4.2 Theorem Let X, Y, E, f , and p be as in Definition 4.1. Then

$$(4) \quad \lim_{x \rightarrow p} f(x) = q$$

if and only if

$$(5) \quad \lim_{n \rightarrow \infty} f(p_n) = q$$

for every sequence $\{p_n\}$ in E such that

$$(6) \quad p_n \neq p, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} p_n = p$$

Proof.

假设 (4) 成立。在 E 中选择 $\{p_n\}$ 满足 (6)。令 $\varepsilon > 0$, 那么如果 $x \in E$ 以及 $0 < d_X(x, p) < \varepsilon$ 存在 $\delta > 0$ 使得 $d_Y(f(x), q) < \varepsilon$ 。同样的, 存在 N 使得 $n > N$ 有 $0 < d_X(p_n, p) < \delta$ 。因此, 对于 $n > N$ 有 $d_Y(f(p_n), q) < \varepsilon$, 即证明了 (5) 成立。

相反的, 假设 (4) 不成立。那么存在某些 $\varepsilon > 0$, 对于每个 $\delta > 0$ 存在一个点 $x \in E$ (依赖 δ), 满足 $d_Y(f(x), q) \geq \varepsilon$ 但是 $0 < d_X(x, p) < \delta$ 。选取 $\delta_n = 1/n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), 因此找到一个在 E 中的序列满足 (6) 而 (5) 却不成立。□

Corollary If f has a limit at p , this limit is unique.

Note

如果 f 在 p 点有极限, 那么它是唯一的。

4.3 Definition Suppose we have two complex functions, f and g , both defined on E . By $f + g$ we mean the function which assigns to each point x of E the number $f(x) + g(x)$. Similarly we define the difference $f - g$, the product fg , and the quotient f/g of the two functions, with the understanding that the quotient is defined only at those points x of E at which $g(x) \neq 0$. If f assigns to each point x of E the same number c , then f is said to be a constant functions, and if $f(x) \geq g(x)$ for every $x \in E$, we shall sometimes write $f \geq g$, for brevity.

Similarly, if \mathbf{f} and \mathbf{g} map E into R^k , we define $\mathbf{f} + \mathbf{g}$ and $\mathbf{f} \cdot \mathbf{g}$ by

$$(\mathbf{f} + \mathbf{g})(x) = \mathbf{f}(x) + \mathbf{g}(x), \quad (\mathbf{f} \cdot \mathbf{g})(x) = \mathbf{f}(x) \cdot \mathbf{g}(x);$$

and if λ is a real number, $(\lambda \mathbf{f})(x) = \lambda \mathbf{f}(x)$.

4.4 Theorem Suppose $E \subset X$, a metric space, p is a limit point of E , f and g are complex functions on E , and

$$\lim_{x \rightarrow p} f(x) = A, \quad \lim_{x \rightarrow p} g(x) = B.$$

Then

$$(a) \lim_{x \rightarrow p} (f + g)(x) = A + B;$$

$$(b) \lim_{x \rightarrow p} (fg)(x) = AB$$

$$(c) \lim_{x \rightarrow p} \left(\frac{f}{g} \right)(x) = \frac{A}{B}, \text{ if } B \neq 0.$$

Proof.

根据 Theorem 4.2, 上述声明遵循了类似序列的属性 (Theorem 3.3)。 \square

Remark 如果 f 与 g 映射 E 至 R^k , 那么 (a) 仍然为真, 而 (b) 则变为 (b') $\lim_{x \rightarrow p} (\mathbf{f} \cdot \mathbf{g})(x) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ 。

Continuous Functions

4.5 Definition Suppose X and Y are metric spaces, $E \subset X$, $p \in E$, and f maps E into Y . Then f is said to be *continuous at p* if for every $\varepsilon > 0$ there exists a $\delta > 0$ such that

$$d_Y(f(x), f(p)) < \varepsilon$$

for all points $x \in E$ for which $d_X(x, p) < \delta$.

If f is continuous at every point of E , then f is said to be *continuous on E* .

需要注意的是 f 必须定义在点 p 上才可在 p 上连续 (将此与 Definition 4.1 后的 remark 进行比较)。

如果 p 是 E 上的独立点, 那么通过上述定义可得: 所有拥有 E 作为其领域的函数 f 在点 p 上连续。无论选取何值 $\varepsilon > 0$, 可以选取 $\delta > 0$ 使得 $x \in E$ 对于 $d_X(x, p) < \delta$ 而言有 $x = p$; 那么

$$d_Y(f(x), f(p)) = 0 < \delta$$

4.6 Theorem In the situation given in Definition 4.5, assume also that p is a limit point of E . Then f is continuous at p if and only if $\lim_{x \rightarrow p} f(x) = f(p)$.

Proof.

将 Definition 4.1 与 4.5 相比较即可得出结论。 \square

Note

连续性: $\lim_{x \rightarrow p} f(x) = f(p)$

现在开始函数组合的部分。以下定理的一个简单声明：一个连续函数的函数若是连续的，那么该函数仍然是连续的。

4.7 Theorem Suppose X, Y, Z are metric spaces, $E \subset X$, f maps E into Y , g maps the range of f , $f(E)$, into Z , and h is the mapping of E into Z defined by

$$h(x) = g(f(x)) \quad (x \in E).$$

If f is continuous at a point $p \in E$ and if g is continuous at the point $f(p)$, then h is continuous at p .

This function h is called the composition or the composite of f and g . The notation

$$h = g \circ f$$

is frequently used in this context.

Proof.

给定 $\varepsilon > 0$ 。因为 g 在 $f(p)$ 上连续，存在 $\eta > 0$ 使得

$$d_Z(g(y), g(f(p))) < \varepsilon \text{ if } d_Y(y, f(p)) < \eta \text{ and } y \in f(E).$$

因为 f 在 p 上连续，存在 $\delta > 0$ 使得

$$d_Y(f(x), f(p)) < \eta \text{ if } d_X(x, p) < \delta \text{ and } x \in E.$$

如果 $d_X(x, p) < \delta$ 以及 $x \in E$ ，那么就有

$$d_Z(h(x), h(p)) = d_Z(g(f(x)), g(f(p))) < \varepsilon$$

因此 h 在 p 上连续。 □

4.8 Theorem A mapping f of a metric space X into a metric space Y is continuous on X if and only if $f^{-1}(V)$ is open in X for every open set V in Y .

(相反的镜像定义于 Definition 2.2) 对于连续性而言，这是一个非常有用的特性。

Proof.

假设 f 在 X 上连续，同时 V 是 Y 上的一个开集。我们需要展示 $f^{-1}(V)$ 的每个点都是 $f^{-1}(V)$ 的一个内点。假设 $p \in X$ 以及 $f(p) \in V$ 。由于 V 为开，存在 $\varepsilon > 0$ 满足 $y \in V$ 如果

$d_Y(f(p), y) < \varepsilon$; 又因为 f 在 p 上连续, 存在 $\delta > 0$ 满足 $d_Y(f(x), f(p)) < \varepsilon$ 如果 $d_X(x, p) < \delta$ 。因此一旦 $d_X(x, p) < \delta$ 则有 $x \in f^{-1}(V)$ 。

相反的, 假设对于在 Y 上的每个开集 V 有 $f^{-1}(V)$ 在 X 上为开。固定 $p \in X$ 以及 $\varepsilon > 0$, 令 V 为所有 $y \in Y$ 的集合, 满足 $d_Y(y, f(p)) < \varepsilon$ 。那么 V 为开; 因此 $f^{-1}(V)$ 为开; 因此存在 $\delta > 0$ 一旦 $d_X(p, x) < \delta$ 则有 $x \in f^{-1}(V)$ 。但是若 $x \in f^{-1}(V)$, 那么 $f(x) \in V$, 使得 $d_Y(f(x), f(p)) < \varepsilon$ 。

证明完毕。 \square

Note

度量空间 X, Y 的函数 $f: X \rightarrow Y$ 连续, 当且仅当对 Y 的每个开集 V , $f^{-1}(V)$ 是 X 中的开集。这个是连续性的一个极为有用的特征。

Corollary *A mapping f of a metric space X into a metric space Y is continuous if and only if $f^{-1}(C)$ is closed in X for every closed set C in Y .*

此条推论遵循了上述定理, 因为一个集为闭, 当且仅当其补集为开, 且因为对于每个 $E \subset Y$ 有 $f^{-1}(E^c) = [f^{-1}(E)]^c$ 。

Note

推论: 度量空间 X, Y 的函数 $f: X \rightarrow Y$ 连续, 当且仅当对 Y 的每个闭集 C , $f^{-1}(C)$ 是 X 中的闭集。

现在更进一步到复数与向量函数, 以及定义在 R^k 上的子集。

4.9 Theorem *Let f and g be complex continuous functions on a metric space X . Then $f + g$, fg , and f/g are continuous on X .*

最后一个情况, 需要假设 $g(x) \neq 0$, 对于所有 $x \in X$ 。

Proof.

若是 X 的独立点, 则无需进行证明。对于极限点, 此声明遵循 Theorems 4.4 与 4.6。 \square

Note

设 f, g 为度量空间 X 上的复连续函数, 那么 $f + g$, fg 与 f/g 在 X 上连续。

4.10 Theorem

(a) Let f_1, \dots, f_k be real functions on a metric space X , and let \mathbf{f} be the mapping of X into R^k defined by

$$(7) \quad \mathbf{f}(x) = (f_1(x), \dots, f_k(x)) \quad (x \in X);$$

then \mathbf{f} is continuous if and only if each of the functions f_1, \dots, f_k is continuous.

(b) If \mathbf{f} and \mathbf{g} are continuous mappings of X into R^k , then $\mathbf{f} + \mathbf{g}$ and $\mathbf{f} \cdot \mathbf{g}$ are continuous on X .

函数 f_1, \dots, f_k 被称为 \mathbf{f} 的分量 *components* 函数。注意 $\mathbf{f} + \mathbf{g}$ 是一个至 R^k 的映射，而 $\mathbf{f} \cdot \mathbf{g}$ 则是在 X 上的实 *real* 函数。

Proof.

对于 $j = 1, \dots, k$ 而言，(a) 遵循不等式

$$|f_j(x) - f_j(y)| \leq |\mathbf{f}(x) - \mathbf{f}(y)| = \left\{ \sum_{i=1}^k |f_i(x) - f_i(y)|^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

而 (b) 遵循 (a) 以及 Theorem 4.9。 □

Note

\mathbf{f} 将一个度量空间映射至实数多维空间。

对于 (a) 而言， $|\mathbf{f}(x) - \mathbf{f}(y)|$ 可视为 x 与 y 之间的距离，那么有：

$$\begin{aligned} |\mathbf{f}(x) - \mathbf{f}(y)| &= \sqrt{[f_1(x) - f_1(y)]^2 + [f_2(x) - f_2(y)]^2 + \dots + [f_k(x) - f_k(y)]^2} \\ &= \left\{ \sum_{i=1}^k |f_i(x) - f_i(y)|^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

4.11 Examples If x_1, \dots, x_k are the coordinates of the point $\mathbf{x} \in R^k$, the functions ϕ_i defined by

$$(8) \quad \phi_i(\mathbf{x}) = x_i \quad (\mathbf{x} \in R^k)$$

are continuous on R^k , since the inequality

$$|\phi_i(\mathbf{x}) - \phi_i(\mathbf{y})| \leq |\mathbf{x} - \mathbf{y}|$$

shows that we may take $\delta = \varepsilon$ in Definition 4.5. The functions ϕ_i are sometimes called the *coordinate functions*.

Repeated application of Theorem 4.9 then shows that every monomial

$$(9) \quad x_1^{n_1} x_2^{n_2} \cdots x_k^{n_k}$$

where n_1, \dots, n_k are nonnegative integers, is continuous on R^k . The same is true of constant multiples of (9), since constants are evidently continuous. It follows that every polynomial P , given by

$$(10) \quad P(\mathbf{x}) = \sum c_{n_1 \dots n_k} x_1^{n_1} \cdots x_k^{n_k} \quad (\mathbf{x} \in R^k),$$

is continuous on R^k . Here the coefficients $c_{n_1 \dots n_k}$ are complex numbers, n_1, \dots, n_k are nonnegative integers, and the sum in (10) has finitely many terms.

Furthermore, every rational function in x_1, \dots, x_k , that is, every quotient of two polynomials of the form (10), is continuous on R^k wherever the denominator is different from zero.

From the triangle inequality one sees easily that

$$(11) \quad ||\mathbf{x}| - |\mathbf{y}|| \leq |\mathbf{x} - \mathbf{y}| \quad (\mathbf{x}, \mathbf{y} \in R^k).$$

Hence the mapping $\mathbf{x} \rightarrow |\mathbf{x}|$ is a continuous real function on R^k .

If now \mathbf{f} is a continuous mapping from a metric space X into R^k , and if ϕ is defined on X by setting $\phi(p) = |\mathbf{f}(p)|$, it follows, by Theorem 4.7, that ϕ is a continuous real function on X .

4.12 Remark 我们定义了在一个度量空间 X 中子集 E 上的函数连续性这个概念。然而在 X 上 E 的补集并没有定义（注意该情况与函数的极限稍有不同）。因此，通过丢弃 f 域的补集，我们并不会丢失关注点。这意味着我们仅需关心一个度量空间到另一个度量空间的连续映射，而不是子集的映射。这节省了声明以及一些定理的证明。实际上我们已经在 Theorems 4.8 至 4.10 上利用了这个原理，同样也将在后面关于紧 compactness 的小节中运用上。

Continuity and Compactness

4.13 Definition A mapping \mathbf{f} of a set E into R^k is said to be *bounded* if there is a real number M such that $|\mathbf{f}(x)| \leq M$ for all $x \in E$.

Note

有界: $\mathbf{f}(x) \leq M$ 。

4.14 Theorem Suppose f is a continuous mapping of a compact metric space X into a metric space Y . Then $f(X)$ is compact.

Proof.

令 $\{V_\alpha\}$ 为 $f(X)$ 的一个开覆盖。由于 f 是连续的, Theorem 4.8 展示了每个 $f^{-1}(V_\alpha)$ 集合皆为开。由于 X 是紧的, 拥有有限个索引, 假设 $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ 满足

$$(12) \quad X \subset f^{-1}(V_{\alpha_1}) \cup \dots \cup f^{-1}(V_{\alpha_n})$$

又因为对于任何 $E \subset Y$ 有 $f(f^{-1}(E)) \subset E$, (12) 说明

$$(13) \quad f(X) \subset V_{\alpha_1} \cup \dots \cup V_{\alpha_n}$$

证明完毕。 \square

注意: 这里使用了 $f(f^{-1}(E)) \subset E$ 的关系, 对于 $E \subset Y$ 有效。如果是 $E \subset X$, 那么则是 $f^{-1}(f(E)) \supset E$; 等式在任何一种情况下都不需要相等。

Note

若紧度量空间 X 到度量空间 Y 的函数 $f: X \rightarrow Y$ 是连续的, 那么 $f(X)$ 是紧的。

现在来推导一下 Theorem 4.14 的某些结果。

4.15 Theorem *If \mathbf{f} is a continuous mapping of a compact metric space X into R^k , then $\mathbf{f}(X)$ is closed and bounded. Thus, \mathbf{f} is bounded.*

上述定理遵循了 Theorem 2.41。当 f 为实 (real) 时, 其结果特别重要:

Note

如果 \mathbf{f} 是把紧度量空间 X 映入 R^k 内的连续映射, 那么 $\mathbf{f}(X)$ 是闭合有界的。因此 \mathbf{f} 是有界的。

4.16 Theorem *Suppose f is a continuous real function on a compact metric space X , and*

$$(14) \quad M = \sup_{p \in X} f(p), \quad m = \inf_{p \in X} f(p).$$

Then there exist points $p, q \in X$ such that $f(p) = M$ and $f(q) = m$.

式 (14) 意味着 M 是集合中所有数 $f(p)$ 的最小上界, 而 p 的范围超过 X , 而 m 则是这些数的最大下界。

该结论同样也可以这样表述: 在 X 中存在点 p 与 q 对所有 $x \in X$ 有 $f(q) \leq f(x) \leq f(p)$; 即, f (在 p) 达到最大, (在 q) 达到最小。

Proof.

根据 Theorem 4.15, $f(X)$ 是一个闭且有界的实数集合; 因此根据 Theorem 2.28, $f(X)$ 包含

$$M = \sup f(X) \quad \text{and} \quad m = \inf f(X)$$

□

Note

如果 f 是紧度量空间 X 上的连续实函数, 且 $M = \sup_{p \in X} f(p)$, $m = \inf_{p \in X} f(p)$, 那么一定存在 $r, s \in X$ 使 $f(r) = M$ 以及 $f(s) = m$ 。

4.17 Theorem Suppose f is a continuous 1-1 mapping of a compact metric space X onto a metric space Y . Then the inverse mapping f^{-1} defined on Y by

$$f^{-1}(f(x)) = x \quad (x \in X)$$

is a continuous mapping of Y onto X .

Proof.

将 Theorem 4.8 应用至 f^{-1} 代替 f , 足够证明对于每个在 X 中的开集 V 而言, $f(V)$ 在 Y 上是一个开集。

V 的补集 V^c 在 X 中为闭, 因此是紧的 (Theorem 2.35); 因此 $f(V^c)$ 是一个 Y 上的紧子集 (Theorem 4.14) 并在 Y 上为闭 (Theorem 2.34)。因为 f 是一对一的映射, $f(V)$ 是 $f(V^c)$ 的补集。因此 $f(V)$ 是开的。 □

Note

设 f 是把紧度量空间 X 映满度量空间 Y 的连续 1-1 映射, 那么逆映射 f^{-1} 是 Y 映满 X 的连续映射。

4.18 Definition Let f be a mapping of a metric space X into a metric space Y . We say that f is *uniformly continuous* on X if for every $\varepsilon > 0$ there exists $\delta > 0$ such that

$$(15) \quad f_Y(f(p), f(q)) < \varepsilon$$

for all p and q in X for which $d_X(p, q) < \delta$.

Note

对度量空间 X, Y 的函数 $f: X \rightarrow Y$, 称 f 在 X 上一致连续, 若对每个 $\varepsilon > 0$ 总存在 $\delta > 0$ 对一切满足 $d_X(p, q) < \delta$ 的 $p, q \in X$ 都能使 $d_Y(f(p), f(q)) < \varepsilon$ 。

让我们来讨论一下连续性与一致连续性概念的区别。首先, 一致连续性是函数在集合上的属性, 且连续性可以被定义在单一个点上。在某个点上讨论一致连续性是无意义的。其次, 如果 f 在 X 上连续, 那么可以找到, 对于每个 $\varepsilon > 0$ 以及对于每个 X 上的 p , 具有 Definition 4.5 所定义的 $\delta > 0$ 。该 δ 依赖 ε 与 p 。而如果 f 在 X 上一致连续, 那么对于每个 $\varepsilon > 0$, 找到一个 $\delta > 0$ 满足所有 X 的点 p 是可能的。

显然的, 每个一致连续函数都是连续的。而根据下面的定理, 可知这两个概念在紧集上是相等的。

4.19 Theorem *Let f be a continuous mapping of a compact metric space X into a metric space Y . Then f is uniformly continuous on X .*

Proof.

给定 $\varepsilon > 0$ 。由于 f 是连续的, 我们可以为每个点 $p \in X$ 关联一个正数 $\phi(p)$ 满足

$$(16) \quad q \in X, d_X(p, q) < \phi(p) \quad \text{implies} \quad d_Y(f(p), f(q)) < \frac{\varepsilon}{2}$$

令 $J(p)$ 为所有 $q \in X$ 的集合, 有

$$(17) \quad d_X(p, q) < \frac{1}{2}\phi(p)$$

因为 $p \in J(p)$, 所有 $J(p)$ 集合的集合群是 X 的一个开覆盖; 而又因为 X 是紧的, 在 X 中存在点 p_1, \dots, p_n 的一个有限集合满足

$$(18) \quad X \subset J(p_1) \cup \dots \cup J(p_n)$$

令

$$(19) \quad \delta = \frac{1}{2} \min[\phi(p_1), \dots, \phi(p_n)]$$

那么有 $\delta > 0$ 。(这是从紧性定义中继承的重要一点: 覆盖的有限性。有限正数集的最小值是正数, 而无限正数集的 \inf 很可能为 0。)

现在令 q 与 p 为 X 上的点, 满足 $d_X(p, q) < \delta$ 。根据 (18), 存在一个整数 $m, 1 \leq m \leq n$, 满足 $p \in J(p_m)$; 因此

$$(20) \quad d_X(p, p_m) < \frac{1}{2}\phi(p_m)$$

同样有

$$d_X(q, p_m) \leq d_X(p, q) + d_X(p, p_m) < \delta + \frac{1}{2}\phi(p_m) \leq \phi(p_m)$$

最后, (16) 可得

$$d_Y(f(p), f(q)) \leq d_Y(f(p), f(p_m)) + d_Y(f(q), f(p_m)) < \varepsilon$$

证明完毕。 □

Note

设 f 是把紧度量空间 X 映入度量空间 Y 的连续映射, 那么 f 在 X 上一致连续。

4.20 Theorem *Let E be a non-compact set in R^1 . Then*

(a) *there exists a continuous function on E which is not bounded;*

(b) *there exists a continuous and bounded function on E which has no maximum.*

If, in addition, E is bounded, then

(c) *there exists a continuous function on E which is not uniformly continuous.*

Proof.

首先假设 E 是有界的, 那么 E 存在一个不属于 E 的极限点 x_0 。假设

$$(21) \quad f(x) = \frac{1}{x - x_0} \quad (x \in E)$$

该函数在 E 上连续 (Theorem 4.9), 且显然无界的。为了验证 (21) 不是一致连续的, 令 $\varepsilon > 0$ 且 $\delta > 0$ 为任意数, 且选择一个点 $x \in E$ 满足 $|x - x_0| < \delta$ 。取 t 趋近于 x_0 , 那么可以使差值 $|f(t) - f(x)|$ 大于 ε , 即使 $|t - x| < \delta$ 。由于对所有 $\delta > 0$ 都成立, f 在 E 上不为一一致连续。

给定函数 g

$$(22) \quad g(x) = \frac{1}{1 + (x - x_0)^2} \quad (x \in E)$$

在 E 上连续, 且有界, 因为 $0 < g(x) < 1$ 。那么很明显

$$\sup_{x \in E} g(x) = 1$$

且对于所有 $x \in E$ 有 $g(x) < 1$ 。因此 g 在 E 上没有最大值。

为有界集 E 证明了定理, 现在假设 E 是无界的。那么 $f(x) = x$ 构建 (a), 而

$$(23) \quad h(x) = \frac{x^2}{1 + x^2} \quad (x \in E)$$

构建 (b), 因为

$$\sup_{x \in E} h(x) = 1$$

且对于所有 $x \in E$ 有 $h(x) < 1$ 。

如果界不在假设中, (c) 则不成立。令 E 为包含了所有正数的集, 那么每个在 E 上定义的函数都在 E 上一致连续。验证上述仅需要 Definition 4.18 中令 $\delta < 1$ 。□

Note

设 E 为 R^1 中的非紧集, 那么 (a) 有在 E 上连续却无界的函数, (b) 有在 E 上连续且有界, 却没有最大值的函数, (c) 如果 E 是有界的, 有在 E 上连续却不一致连续的函数。

4.21 Example Let X be the half-open interval $[0, 2\pi)$ on the real line, and let \mathbf{f} be the mapping of X onto the circle Y consisting of all points whose distance from the origin is 1, given by

$$(24) \quad \mathbf{f}(t) = (\cos t, \sin t) \quad (0 \leq t \leq 2\pi).$$

The continuity of the trigonometric function cosine and sine, as well as their periodicity properties, will be established in Chap. 8. These results show that \mathbf{f} is a continuous 1-1 mapping of X onto Y .

However, the inverse mapping (which exists, since \mathbf{f} is one-to-one and onto) fails to be continuous at the point $(1, 0) = \mathbf{f}(0)$. Of course, X is not compact in this example. (It may be of interest to observe the \mathbf{f}^{-1} fails to be continuous in spite of the fact that Y is compact!)

Continuity and Connectedness

4.22 Theorem If f is a continuous mapping of a metric space X into a metric space Y , and if E is a connected subset of X , then $f(E)$ is connected.

Proof.

按照相反的来假设, $f(E) = A \cup B$, 且 A 与 B 为 Y 的非空分离子集。令 $G = E \cap f^{-1}(A)$, $H = E \cap f^{-1}(B)$ 。

那么 $E = G \cup H$, 且 G 与 H 皆不为空。

因为 $A \subset \overline{A}$ (即 A 的闭包), 有 $G \subset f^{-1}(\overline{A})$; 后者为闭集, 因为 f 是连续的; 因此 $\overline{G} \subset f^{-1}(\overline{A})$ 。其遵循 $f(\overline{G}) \subset \overline{A}$ 。因为 $f(H) = B$ 与 $\overline{A} \cap B$ 皆为空, 可得 $\overline{G} \cap H$ 为空。

同样的论证可得 $G \cap \overline{H}$ 为空。因此 G 与 H 是分离的。这样是不可能的, 如果 E 是连接着的, □

Note

设 f 是把连通的度量空间 X 映入度量空间 Y 内的连续映射, E 是 X 的连通子集, 那么 $f(E)$ 是连通的。

4.23 Theorem Let f be a continuous real function on the interval $[a, b]$. If $f(a) < f(b)$ and if c is a number such that $f(a) < c < f(b)$, then there exists a point $x \in (a, b)$ such that $f(x) = c$.

当然如果 $f(a) > f(b)$ 也有同样一个结果。粗略而言, 该定理说明了一个连续的实函数假设了一个区间中的所有中间值。

Proof.

根据 Theorem 2.47, $[a, b]$ 是连接着的; 因此 Theorem 4.22 可得 $f([a, b])$ 是 R^1 的一个连接子集。如果再次应用 Theorem 2.47, 该声明成立。□

Discontinuities

如果 x 是位于函数 f 所定义的领域中的一个点, 而 f 并不连续, 那么 f 在 x 上 不连续 *discontinuous*, 或说 f 在 x 上具有非连续性。如果 f 定义于一个区间或者一个线段, 那么可分为两种类型的不连续。在给出这个区分之前, 我们需要给出 x 的 *right-hand* 以及 *left-hand limits* 的定义, 可以被分别表示为 $f(x+)$ 与 $f(x-)$ 。

4.25 Definition Let f be defined on (a, b) . Consider any point x such that $a \leq x \leq b$. We write

$$f(x+) = q$$

if $f(t_n) \rightarrow q$ as $n \rightarrow \infty$, for all sequences $\{t_n\}$ in (x, b) such that $t_n \rightarrow x$. To obtain the definition of $f(x-)$, for $a < x \leq b$, we restrict ourselves to sequences $\{t_n\}$ in (a, x) .

It is clear that any point x of (a, b) , $\lim_{t \rightarrow x} f(t)$ exists if and only if

$$f(x+) = f(x-) = \lim_{t \rightarrow x} f(t).$$

Note

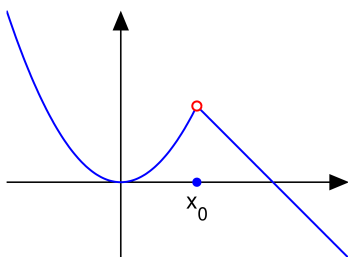
设 f 定义在 (a, b) 上, 定义一点的 **左极限**和 **右极限**, 显然极限存在当且仅当左极限与右极限存在且相等。如果函数在一点不连续, 那么称这点 **间断 (discontinuous)**

4.26 Definition Let f be defined on (a, b) . If f is discontinuous at a point x , and if $f(x+)$ and $f(x-)$ exist, then f is said to have a discontinuity of the *first kind*, or a *simple discontinuity*, at x . Otherwise the discontinuity is said to be of the *second kind*.

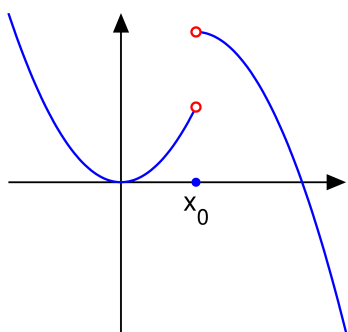
There are two ways in which a function can have a simple discontinuity: either $f(x+) \neq f(x-)$ [in which case the value $f(x)$ is immaterial], or $f(x+) = f(x-) \neq f(x)$.

Note

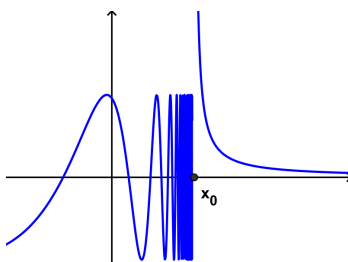
设 f 定义在 (a, b) 上, 如果 f 在一点 x 间断, 并且如果 $f(x+)$ 和 $f(x-)$ 都存在, 那么 f 在 x 发生了**第一类间断**。其它间断称为**第二类间断**。这里的重点在于**存在**二字, 也就是说只要 $f(x+)$ 或 $f(x-)$ 一方不存在, 则为第二类间断。



第一类不连续点, 可去不连续点。



第一类不连续点, 跳跃不连续点。



第二类不连续点 (本性不连续点), 可进一步分为无穷不连续点和震荡不连续点。

4.27 Examples (a) Define

$$f(x) = \begin{cases} 1 & (x \text{ rational}), \\ 0 & (x \text{ irrational}). \end{cases}$$

Then f has a discontinuity of the second kind at every point x , since neither $f(x+)$ nor $f(x-)$ exists.

(b) Define

$$f(x) = \begin{cases} x & (x \text{ rational}), \\ 0 & (x \text{ irrational}). \end{cases}$$

Then f is continuous at $x = 0$ and has a discontinuity of the second kind at every other point.

(c) Define

$$f(x) = \begin{cases} x + 2 & (-3 < x < -2), \\ -x - 2 & (-2 \leq x < 0), \\ x + 2 & (0 \leq x < 1). \end{cases}$$

Then f has a simple discontinuity at $x = 0$ and is continuous at every other point of $(-3, 1)$.

(d) Define

$$f(x) = \begin{cases} \sin \frac{1}{x} & (x \neq 0), \\ 0 & (x = 0). \end{cases}$$

Since neither $f(0+)$ nor $f(0-)$ exists, f has a discontinuity of the second kind at $x = 0$. We have not yet shown that $\sin x$ is a continuous function. If we assume this result for the moment, Theorem 4.7 implies that f is continuous at every point $x \neq 0$.

Monotonic Functions

现在开始学习在给定线段上永不减少（或增加）的函数。

4.28 Definition Let f be real on (a, b) . Then f is said to be *monotonically increasing* on (a, b) if $a < x < y < b$ implies $f(x) \leq f(y)$. If the last inequality is reversed, we obtain the definition of a *monotonically decreasing* function. The class of monotonic functions consists of both the increasing and the decreasing functions.

Note

设 $f: (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$, 若 $a < x < y < b$ 时有 $f(x) \leq f(y)$, 那么 f 在 (a, b) 上 **单调递增**; 若有 $f(x) \geq f(y)$ 就是 **单调递减**。两者统称为 **单调函数**。

4.29 Theorem Let f be monotonically increasing on (a, b) . Then $f(x+)$ and $f(x-)$ exist at every point of x of (a, b) . More precisely,

$$(25) \quad \sup_{a < t < x} f(t) = f(x-) \leq f(x) \leq f(x+) = \inf_{x < t < b} f(t).$$

Furthermore, if $a < x < y < b$, then

$$(26) \quad f(x+) \leq f(y-).$$

Analogous results evidently hold for monotonically decreasing functions.

Proof.

根据假设, $f(t)$ 的集合有 $a < t < x$, 其上界为 $f(x)$, 因此有一个最小上界 A 。显然 $A \leq f(x)$, 现在需要证明 $A = f(x-)$ 。

给定 $\varepsilon > 0$ 。遵循 A 的最小上界定义, 存在 $\delta > 0$ 满足 $a < x - \delta < x$ 且

$$(27) \quad A - \varepsilon < f(x - \delta) \leq A$$

由于 f 是单调的, 有

$$(28) \quad f(x - \delta) \leq f(t) \leq A \quad (x - \delta < t < x)$$

结合 (27) 与 (28), 可得

$$|f(t) - A| < \varepsilon \quad (x - \delta < t < x)$$

因此 $f(x-) = A$ 。

同理可得 (25) 的另一部分。

接着, 如果 $a < x < y < b$, 从 (25) 可得

$$(29) \quad f(x+) = \inf_{x < t < b} f(t) = \inf_{x < t < y} f(t)$$

最后将 (25) 应用在 (a, y) 替换 (a, b) 。同样的,

$$(30) \quad f(y-) = \sup_{a < t < y} f(t) = \sum_{x < t < y} f(t)$$

比较 (29) 与 (30), 得 (26)。

□

Corollary *Monotonic functions have no discontinuities of the second kind.*

Note

单调函数没有第二类间断。

4.30 Theorem *Let f be monotonic on (a, b) . Then the set of points of (a, b) at which f is discontinuous is at most countable.*

Proof.

假设为了定义的目的, 令 f 递增, 同时令 E 为 f 所有不连续点的集合。

将 E 的每个 x 点关联一个实数 $r(x)$ 满足

$$f(x-) < r(x) < f(x+)$$

由于 $x_1 < x_2$ 得 $f(x_1+) \leq f(x_2-)$, 可得 $r(x_1) \neq r(x_2)$ 如果 $x_1 \neq x_2$ 。

由此为 E 与实数的子集建立了一对一关系, 即得 E 可数。 □

Note

设 f 在 (a, b) 上单调, 那么 (a, b) 中使 f 间断的点最多是可数的。

4.31 Remark It should be noted that the discontinuities of a monotonic function need not be isolated. In fact, given any countable subset E of (a, b) , which may even be dense, we can construct a function f , monotonic on (a, b) , discontinuous at every point of E , and at no other point of (a, b) .

To show this, let the points of E be arranged in a sequence $\{x_n\}$, $n = 1, 2, 3, \dots$. Let $\{c_n\}$ be a sequence of positive numbers such that $\sum c_n$ converges. Define

$$(31) \quad f(x) = \sum_{x_n < x} c_n \quad (a < x < b)$$

The summation is to be understood as follows: Sum over those indices n for which $x_n < x$. If there are no points x_n to the left of x , the sum is empty; following the usual convention, we define it to be zero. Since (31) converges absolutely, the order in which the terms are arranged is immaterial.

We leave the verification of the following properties of f to the reader:

- (a) f is monotonically increasing on (a, b) ;

(b) f is discontinuous at every point of E ; in fact,

$$f(x_n+) - f(x_n-) = c_n.$$

(c) f is continuous at every other point of (a, b) .

Moreover, it is not hard to see that $f(x-) = f(x)$ at all points of (a, b) . If a function satisfies this condition, we say that f is *continuous from the left*. If the summation in (31) were taken over all indices n for which $x_n \leq x$, we would have $f(x+) = f(x)$ at every point of (a, b) ; that is, f would be *continuous from the right*.

Functions of this sort can also be defined by another method; for an example we refer to Theorem 6.16.

Note

间断点不一定是孤立点。

Infinite Limits and Limits at Infinity

为了能够在广义实数系中进行操作, 现在将通过重新表述邻域来扩大 Definition 4.1 的范围。

对于任何实数 x , 已有的定义是 x 的邻域为任何线段 $(x - \delta, x + \delta)$ 。

4.32 Definition For any real c , the set of real numbers x such that $x > c$ is called a neighborhood of $+\infty$ and is written $(c, +\infty)$. Similarly, the set $(-\infty, c)$ is a neighborhood of $-\infty$.

Note

对任意 $c \in R$, 集合 $\{x | x > c\}$ 叫做 $+\infty$ 的一个邻域, 记为 $(c, +\infty)$; 类似的, $(-\infty, c)$ 是 $-\infty$ 的一个邻域。

4.33 Definition Let f be a real function defined on $E \subset R$. We say that

$$f(t) \rightarrow A \text{ as } t \rightarrow x,$$

where A and x are in the extended real number system, if for every neighborhood U of A there is a neighborhood V of x such that $V \cap E$ is not empty, and such that $f(t) \in U$ for all $t \in V \cap E$, $t \neq x$.

Note

将函数的极限运用领域的语言拓展到了广义实数系。

类似的 Theorem 4.4 也仍然为真，其证明同理可得。这里提及它是为了完整性。

4.34 Theorem *Let f and g be defined on $E \subset \mathbb{R}$. Suppose*

$$f(t) \rightarrow A, \quad g(t) \rightarrow B \quad \text{as } t \rightarrow x.$$

Then,

$$(a) \quad f(t) \rightarrow A' \quad \text{implies} \quad A' = A.$$

$$(b) \quad (f + g)(t) \rightarrow A + B,$$

$$(c) \quad (fg)(t) \rightarrow AB,$$

$$(d) \quad (f|g)(t) \rightarrow A|B,$$

provided the right members of (b), (c), and (d) are defined.

注意 $\infty - \infty$, $0 \cdot \infty$, ∞/∞ , $A/0$ 未定义 (见 Definition 1.23)。

5 Differentiation

The Derivative of a Real Function

本章我们将着重于定义在区间或者线段上的实函数（除了最后一节）。这不仅仅是便利的缘故，因为当从实函数传递到向量值函数时，真正的差异就会出现。定义在 R^k 上的函数微分将在第九章进行讨论。

5.1 Definition Let f be defined (and real-valued) on $[a, b]$. For any $x \in [a, b]$ form the quotient

$$(1) \quad \phi(t) = \frac{f(t) - f(x)}{t - x} \quad (a < t < b, t \neq x),$$

and define

$$(2) \quad f'(x) = \lim_{t \rightarrow x} \phi(t),$$

provided this limit exists in accordance with Definition 4.1.

We thus associate with the function f a function f' whose domain is the set of points x at which the limit (2) exists; f' is called the *derivative* of f .

If f' is defined at a point x , we say that f is *differentiable* at x . If f' is defined at every point of a set $E \subset [a, b]$, we say that f is differentiable on E .

It is possible to consider right-hand and left-hand limits in (2); this leads to the definition of right-hand and left-hand derivatives. In particular, at the endpoints a and b , the derivative, if it exists, is a right-hand or left-hand derivative, respectively. We shall not, however, discuss one-sided derivatives in any detail.

If f is defined on a segment (a, b) and if $a < x < b$, then $f'(x)$ is defined by (1) and (2), as above. But $f'(a)$ and $f'(b)$ are not defined in this case.

Note

导数 (导函数): 定义在 $[a, b]$ 上的实值函数, 任何 $x \in [a, b]$ 其商形式 $\phi(t) = \frac{f(t)-f(x)}{t-x}$ ($a < t < b, t \neq x$), 且 f' 在点 x 满足定义 $f'(x) = \lim_{t \rightarrow x} \phi(t)$, 那么 f 在 x 上可微或可导。

这里提到了左侧和右侧可微, 即在两个 a 与 b 端点可微, 在任何情况下单独讨论一侧可微是没有意义的。

5.2 Theorem Let f be defined on $[a, b]$. If f is differentiable at a point $x \in [a, b]$, then f is continuous at x .

Proof.

根据 Theorem 4.4, 在 $t \rightarrow x$ 时, 有

$$f(t) - f(x) = \frac{f(t) - f(x)}{t - x} \cdot (t - x) \rightarrow f'(x) \cdot 0 = 0$$

□

Note

若 f 在 $x \in [a, b]$ 可微 (可导), 那么它在 x 点连续。

这里运用了 $f'(x) = \frac{f(t)-f(x)}{t-x}$, 即 Definition 5.1。在 Theorem 5.3 中也将运用到此定义。

本定理反过来并不成立。构建一个连续函数在其独立点上不可微是很容易的。在第七章节中, 我们应该会更加熟悉一个函数在整条线是连续的, 但是在任意一点上皆不可微!

5.3 Theorem Suppose f and g are defined on $[a, b]$ and are differentiable at a point $x \in [a, b]$. Then $f + g$, fg , and f/g are differentiable at x , and

$$(a) (f + g)'(x) = f'(x) + g'(x);$$

$$(b) (fg)'(x) = f'(x)g(x) + f(x)g'(x);$$

$$(c) \left(\frac{f}{g}\right)'(x) = \frac{g(x)f'(x) - g'(x)f(x)}{g^2(x)}.$$

In (c), we assume of course that $g(x) \neq 0$.

Proof.

根据 Theorem 4.4 可证 (a)。令 $h = fg$, 那么

$$h(t) - h(x) = f(t)[g(t) - g(x)] + g(x)[f(t) - f(x)]$$

如果将上式除以 $t - x$, 且根据 Theorem 5.2, $t \rightarrow x$ 时有 $f(t) \rightarrow f(x)$, 可得 (b)。接下来就是另 $h = f/g$ 。那么

$$\frac{h(t) - h(x)}{t - x} = \frac{1}{g(t)g(x)} \left[g(x) \frac{f(t) - f(x)}{t - x} - f(x) \frac{g(t) - g(x)}{t - x} \right]$$

令 $t \rightarrow x$, 并应用 Theorems 4.4 与 5.2, 可得 (c)。

□

Note

(b) 令 $h = fg$, 那么对于 h 而言取一个满足 $x \rightarrow t$ 的 t 值则有

$$\begin{aligned} h(t) - h(x) &= f(t)g(t) - f(x)g(x) \\ &= f(t)g(t) - f(x)g(x) + f(t)g(x) - f(t)g(x) \\ &= f(t)[g(t) - g(x)] + g(x)[f(t) - f(x)] \end{aligned}$$

等式两边除以 $t - x$ 则有

$$\begin{aligned}\frac{h(t) - h(x)}{t - x} &= \frac{f(t)[g(t) - g(x)] + g(x)[f(t) - f(x)]}{t - x} \\ h'(x) &= f(t)\frac{g(t) - g(x)}{t - x} + g(x)\frac{f(t) - f(x)}{t - x} \\ (fg)'(x) &= f(t)g'(x) + g(x)f'(x)\end{aligned}$$

根据 Theorem 5.2, 当 $t \rightarrow x$ 时有 $f(t) \rightarrow f(x)$, 那么

$$\begin{aligned}(fg)'(x) &= f(t)g'(x) + g(x)f'(x) \\ &= f(x)g'(x) + g(x)f'(x)\end{aligned}$$

(c) 令 $h = f/g$, 那么对于 h 而言去一个满足 $x \rightarrow t$ 的 t 值则有

$$\begin{aligned}h(t) - h(x) &= \frac{f(t)}{g(t)} - \frac{f(x)}{g(x)} \\ &= \frac{f(t)g(x)}{g(t)g(x)} - \frac{f(x)g(t)}{g(x)g(t)} \\ &= \frac{1}{g(t)g(x)} [f(t)g(x) - f(x)g(t)]\end{aligned}$$

等式两边除以 $t - x$ 则有

$$\begin{aligned}\frac{h(t) - h(x)}{t - x} &= \frac{1}{g(t)g(x)} \left[\frac{f(t)g(x) - f(x)g(t)}{t - x} \right] \\ &= \frac{1}{g(t)g(x)} \left[\frac{f(t)g(x) - f(x)g(t) + g(x)f(x) - g(x)f(x)}{t - x} \right] \\ &= \frac{1}{g(t)g(x)} \left[\frac{f(t)g(x) - g(x)f(x)}{t - x} - \frac{f(x)g(t) - g(x)f(x)}{t - x} \right] \\ h'(x) &= \frac{1}{g(t)g(x)} \left[g(x)\frac{f(t) - f(x)}{t - x} - f(x)\frac{g(t) - g(x)}{t - x} \right] \\ \left(\frac{f}{g}\right)'(x) &= \frac{1}{g(t)g(x)} [g(x)f'(x) - f(x)g'(x)]\end{aligned}$$

根据 Theorem 5.2, 当 $t \rightarrow x$ 时有 $f(t) \rightarrow f(x)$, 那么

$$\begin{aligned}\left(\frac{f}{g}\right)'(x) &= \frac{1}{g(t)g(x)} [g(x)f'(x) - f(x)g'(x)] \\ &= \frac{g(x)f'(x) - f(x)g'(x)}{g^2(x)}\end{aligned}$$

5.5 Theorem Suppose f is continuous on $[a, b]$, $f'(x)$ exists at some point $x \in [a, b]$, g is defined on an interval I which contains the range of f , and g is differentiable at the point $f(x)$. If

$$h(t) = g(f(t)) \quad (a \leq t \leq b),$$

then h is differentiable at x , and

$$(3) \quad h'(x) = g'(f(x))f'(x).$$

Proof.

令 $y = f(x)$, 根据微分的定义有

$$(4) \quad f(t) - f(x) = (t - x)[f'(x) + u(t)]$$

$$(5) \quad g(s) - g(y) = (s - y)[g'(y) + v(s)]$$

其中 $t \in [a, b]$, $s \in I$, 且 $t \rightarrow x$ 有 $u(t) \rightarrow 0$, $s \rightarrow y$ 有 $v(s) \rightarrow 0$ 。令 $s = f(t)$, 通过 (5) 再 (4), 可得

$$\begin{aligned} h(t) - h(x) &= g(f(t)) - g(f(x)) \\ &= [f(t) - f(x)] \cdot [g'(y) + v(s)] \\ &= (t - x) \cdot [f'(x) + u(t)] \cdot [g'(y) + v(s)] \end{aligned}$$

或者如果 $t \neq x$,

$$(6) \quad \frac{h(t) - h(x)}{t - x} = [g'(y) + v(s)] \cdot [f'(x) + u(t)]$$

当 $t \rightarrow x$, 可知 $s \rightarrow y$, 根据 f 的连续性, (6) 等式右侧趋向于 $g'(y)f'(x)$, 即得 (3)。 \square

Note

导数的链式法则: 与 Theorem 5.2 与 5.3 做法一致, 令 $h(t) - h(x)$:

$$\begin{aligned} h(t) - h(x) &= g(f(t)) - g(f(x)) \\ &= g(s) - g(y) \quad \text{其中 } s \text{ 为 } f(t), y \text{ 为 } f(x) \\ &= (s - y)[g'(y) + v(s)] \quad \text{式 (5) 代入} \\ &= (f(t) - f(x))[g'(f(x)) + v(f(t))] \quad \text{此时再将式 (4) 代入} \\ &= (t - x)[f'(x) + u(t)][g'(f(x)) + v(f(t))] \\ \frac{h(t) - h(x)}{t - x} &= [f'(x) + u(t)][g'(f(x)) + v(f(t))] \quad \text{假设 } t \neq x \\ &\rightarrow g'(f(x)) \cdot f'(x) \end{aligned}$$

5.6 Examples (a) 令 f 的定义如下

$$(7) \quad f(x) = \begin{cases} x \sin \frac{1}{x} & (x \neq 0), \\ 0 & (x = 0). \end{cases}$$

理所当然的 $\sin x$ 的导数是 $\cos x$ (我们将在第八章对三角函数进行讨论), 将 Theorems 5.3 与 5.5 应用在 f 非零部分, 有

$$(8) \quad f'(x) = \sin \frac{1}{x} - \frac{1}{x} \cos \frac{1}{x} \quad (x \neq 0)$$

在 $x = 0$ 时, 这些定理不再适用, 因为 $1/x$ 在零时没有定义。直接给出定义: 对于 $t \neq 0$,

$$\frac{f(t) - f(0)}{t - 0} = \sin \frac{1}{t}$$

当 $x \rightarrow 0$ 时, 它没有趋向任何极限, 因此 $f'(0)$ 不存在。

(b) 令 f 的定义如下

$$(9) \quad f(x) = \begin{cases} x^2 \sin \frac{1}{x} & (x \neq 0), \\ 0 & (x = 0) \end{cases}$$

与 (a) 类似, 有

$$(10) \quad f'(x) = 2x \sin \frac{1}{x} - \cos \frac{1}{x} \quad (x \neq 0)$$

在 $x = 0$ 时, 给出定义

$$\left| \frac{f(t) - f(0)}{t - 0} \right| = \left| t \sin \frac{1}{t} \right| \leq |t| \quad (t \neq 0)$$

令 $t \rightarrow 0$, 可得

$$(11) \quad f'(0) = 0$$

因此 f 在所有点 x 上可导, 但是 f' 并不是一个连续函数, 因为 $\cos(1/x)$ 在 (10) 中 $x \rightarrow 0$ 时, 并没有趋向与一个极限。

Mean Value Theorems

5.7 Definition Let f be a real function defined on a metric space X . We say that f has a *local maximum* at a point $p \in X$ if there exists $\delta > 0$ such that $f(q) \leq f(p)$ for all $q \in X$ with $d(p, q) < \delta$.

Note

设 f 是定义在度量空间 X 上的实函数, 那么 f 在点 $p \in X$ 有 **局部极大值**, 如果存在 $\delta > 0$, 对任意 $q \in X$ 且 $d(p, q) < \delta$ 有 $f(q) \leq f(p)$ 。局部极小值的定义类似。

下一个 Theorem 是很多微分应用的基础。

5.8 Theorem *Let f be defined on $[a, b]$; if f has a local maximum at a point $x \in (a, b)$, and if $f'(x)$ exists, then $f'(x) = 0$.*

Proof.

根据 Definition 5.7 选取 δ , 使得

$$a < x - \delta < x < x + \delta < b$$

如果 $x - \delta < t < x$, 那么

$$\frac{f(t) - f(x)}{t - x} \geq 0$$

令 $t \rightarrow x$, 可知 $f'(x) \geq 0$ 。

如果 $x < t < x + \delta$, 那么

$$\frac{f(t) - f(x)}{t - x} \leq 0$$

可知 $f'(x) \leq 0$ 。因此 $f'(x) = 0$ 。 □

类似的论证对于局部极小值同样成立。

Note

设 f 定义在 $[a, b]$ 上; $x \in [a, b]$, 如果 f 在点 x 取得局部极大值而且 $f'(x)$ 存在, 那么 $f'(x) = 0$ 。

5.9 Theorem *If f and g are continuous real functions on $[a, b]$ which are differentiable in (a, b) , then there is a point $x \in (a, b)$ at which*

$$[f(b) - f(a)]g'(x) = [g(b) - g(a)]f'(x).$$

注意两个端点无需具备可导性。

Proof.

令

$$h(t) = [f(b) - f(a)]g(t) - [g(b) - g(a)]f(t) \quad (a \leq t \leq b)$$

那么 h 则在 $[a, b]$ 上连续, h 在 (a, b) 上可导, 且

$$(12) \quad h(a) = f(b)g(a) - f(a)g(b) = h(b)$$

为了证明该定理, 我们需要得出对于某些 $x \in (a, b)$ 有 $f'(x) = 0$ 。

如果 h 是常数, 那么对于所有 $x \in (a, b)$ 成立。如果对于某些 $t \in (a, b)$ 有 $h(t) > h(a)$, 令 x 为 $[a, b]$ 上的一点, 其中 h 达到其最大值 (Theorem 4.16)。根据 (12), $x \in (a, b)$, 以及 Theorem 5.8 可知 $h'(x) = 0$ 。如果对于某些 $t \in (a, b)$ 有 $h(t) < h(a)$, 那么该论点在选取 $[a, b]$ 中点 x , 且 h 达到其最小值时, 同样成立。□

Note

已知:

$$\begin{cases} f'(x) = \frac{f(b)-f(a)}{b-a} \\ g'(x) = \frac{g(b)-g(a)}{b-a} \end{cases}$$

相除可得:

$$\begin{aligned} \frac{f'(x)}{g'(x)} &= \frac{f(b)-f(a)}{g(b)-g(a)} \\ [f(b)-f(a)]g'(x) &= [g(b)-g(a)]f'(x) \end{aligned}$$

该定理通常被称为 泛化中值定理; 接下来的特殊例子则被称为 “真” 中值定理:

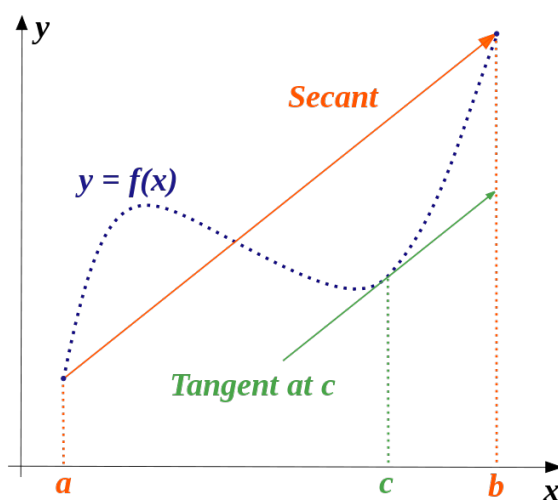
5.10 Theorem *If f is a real continuous function on $[a, b]$ which is differentiable in (a, b) , then there is a point $x \in (a, b)$ at which*

$$f(b) - f(a) = (b - a)f'(x)$$

Proof.

在 Theorem 5.9 中, 取 $g(x) = x$ 。

□



一般中值定理: 设 f 是定义在 $[a, b]$ 的连续实函数, 在 (a, b) 内可导, 那么一定有一点 $x \in (a, b)$, 使得 $f(b) - f(a) = (b - a)f'(x)$ 。

5.11 Theorem Suppose f is differentiable in (a, b) .

(a) If $f'(x) \geq 0$ for all $x \in (a, b)$, then f is monotonically increasing.

(b) If $f'(x) = 0$ for all $x \in (a, b)$, then f is constant.

(c) If $f'(x) \leq 0$ for all $x \in (a, b)$, then f is monotonically decreasing.

Proof.

所有的结论都可以从该等式得出

$$f(x_2) - f(x_1) = (x_2 - x_1)f'(x)$$

其中 x_1, x_2 in (a, b) 。

□

The Continuity of Derivatives

我们已经见到了 [Example 5.6 (b)] 中一个函数 f 可能有一个导数 f' 存在于任何点, 但是在某些点并不连续。然而, 并不是所有函数都有导数。特别是, 存在于区间中每一点的导数与区间上连续的函数有一个重要的共同性质: 假定的中间值 (相较于 Theorem 4.23)。准确的称述如下:

5.12 Theorem Suppose f is a real differentiable function on $[a, b]$ and suppose $f'(a) < \lambda < f'(b)$. Then there is a point $x \in (a, b)$ such that $f'(x) = \lambda$.

同样的结果对 $f'(a) > f'(b)$ 也成立。

Proof.

令 $g(t) = f(t) - \lambda t$ 。那么 $g'(a) < 0$, 那么对于某些 $t_1 \in (a, b)$ 有 $g(t_1) < g(a)$, 且 $g'(b) > 0$ 。因此 g 在 $[a, b]$ 上某点 x , $a < x < b$ 可达极小值 (Theorem 4.16)。根据 Theorem 5.8, $g'(x) = 0$ 。因此 $f'(x) = \lambda$ 。□

Note

定理: 设 f 是 $[a, b]$ 上实值可微函数, 设 $f'(a) < \lambda < f'(b)$, 那么必有一点 $x \in (a, b)$ 使 $f'(x) = \lambda$ 。

证明中第一步的假设 $g(t) = f(t) - \lambda t$ 很关键, 其构造的原理是根据定理中 $f'(a) < \lambda < f'(b)$ 该假设而来。

$$\begin{aligned} \because g(t) &= f(t) - \lambda t \\ \therefore g'(t) &= \frac{(f(t) - \lambda t)d}{dt} \\ &= f'(t) - \lambda \\ \because f'(a) &< \lambda < f'(b) \\ \therefore g'(a) &= f'(a) - \lambda \\ &< 0 \end{aligned}$$

这里的 $g'(a) < 0$ 代表 g 在 a 处递减, 那么在 (a, b) 中一定存在一个 t_1 满足 $g(t_1) < g(a)$; 同理, $g'(b) = f'(b) - \lambda > 0$ 说明在 (a, b) 中一定存在一个 t_2 满足 $g(t_2) < g(b)$ 。

那么根据 Theorem 4.16 的: f 是紧度量空间 X 上的连续函数, 且 $M = \sup_{p \in X} f(p)$, $m = \inf_{p \in X} f(p)$, 那么一定存在 $r, s \in X$ 使得 $f(r) = M$, $f(s) = m$ 。

而 g 为两个连续函数之差，其本身也是连续函数，那么其也满足 Theorem 4.16，即 g 具有最大下确界 ($m = \inf_{p \in X} f(p)$)；换言之，在 $[a, b]$ 中存在某个点 x , $a < x < b$ ，使得 $g(x)$ 为最小值。

又根据 Theorem 5.8 的：定义在 $[a, b]$ 上的 f ；如果 f 在 $x \in (a, b)$ 上具有局部最小值，且 $f'(x)$ 存在，那么 $f'(x) = 0$ 。

可知 $g'(x) = 0$ ，那么 $g'(x) = f'(x) - \lambda = 0$ 可得 $f'(x) = \lambda$ 。

Corollary *If f is differentiable on $[a, b]$, then f' cannot have any simple discontinuities on $[a, b]$.*

Note

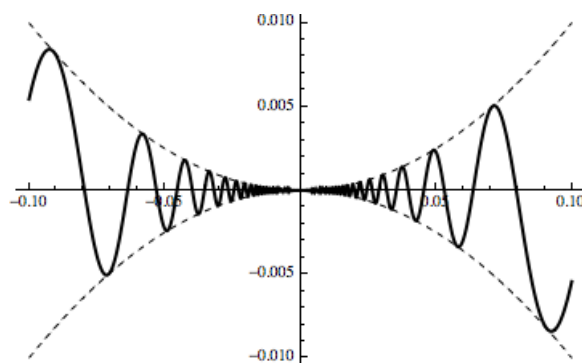
如果 f 在 $[a, b]$ 上可微，那么 f' 在 $[a, b]$ 上不能有简单间断。但是 f' 可能有用第二类间断。可见 Darboux's theorem。

根据此链接给出的函数可导，而导数不连续的情况：

基础案例

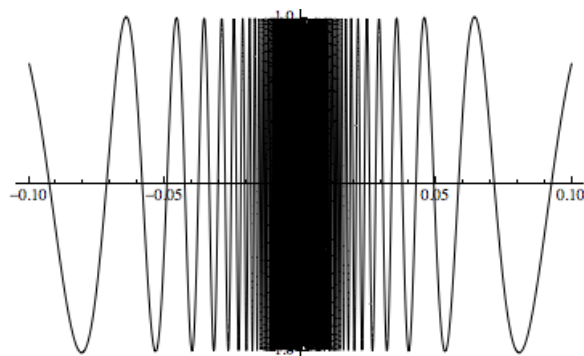
一个可导函数：

$$f(x) = \begin{cases} x^2 \sin(\frac{1}{x}) & \text{if } x \neq 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \end{cases}$$



其导数并不连续：

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

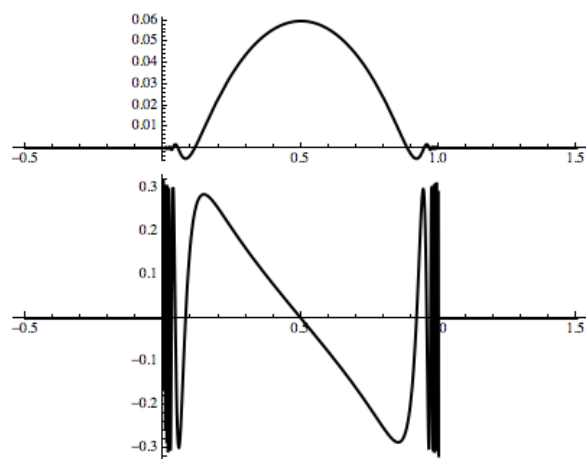


两点案例

一个在 \mathbb{R} 上连续的可导函数（除开两点）：

$$f(x) = \begin{cases} x^2(1-x)^2 \sin(\frac{1}{\pi x(1-x)}) & \text{if } 0 < x < 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

该 f 与 f' 如图所示：



L'Hospital's Rule

以下的定理在极限的计算中使用非常频繁。

5.13 Theorem Suppose f and g are real and differentiable in (a, b) , and $g'(x) \neq 0$ for all $x \in (a, b)$, where $-\infty \leq a < b \leq +\infty$. Suppose

$$(13) \quad \frac{f'(x)}{g'(x)} \rightarrow A \text{ as } x \rightarrow a.$$

If

$$(14) \quad f(x) \rightarrow 0 \text{ and } g(x) \rightarrow 0 \text{ as } x \rightarrow a,$$

or if

$$(15) \quad g(x) \rightarrow +\infty \text{ as } x \rightarrow a,$$

then

$$(16) \quad \frac{f(x)}{g(x)} \rightarrow A \text{ as } x \rightarrow a.$$

类似的声明当然也是成立的，如果 $x \rightarrow b$ ，或是 (15) 的 $g(x) \rightarrow -\infty$ 。注意我们现在使用的极限概念是 Definition 4.33 中的派生理念。

Proof.

我们首先考虑 $-\infty \leq A < +\infty$ 的情况。选择一个实数 q 满足 $A < q$ ，接着选择 r 满足 $A < r < q$ 。根据 (13) 存在一个点 $c \in (a, b)$ 满足 $a < x < c$ 得

$$(17) \quad \frac{f'(x)}{g'(x)} < r$$

如果 $a < x < y < c$ ，那么 Theorem 5.9 可知存在一个点 $t \in (x, y)$ 满足

$$(18) \quad \frac{f(x) - f(y)}{g(x) - g(y)} = \frac{f'(t)}{g'(t)} < r$$

假设 (14) 成立。令 $x \rightarrow a$ 如 (18)，可得

$$(19) \quad \frac{f(y)}{g(y)} \leq r < q \quad (a < y < c)$$

接着，假设 (15) 成立。保持如 (18) 中的 y 固定，我们选择一个点 $c_1 \in (a, y)$ 满足 $g(x) > g(y)$ 以及如果 $a < x < c_1$ 有 $g(x)$ 。将 (18) 乘以 $[g(x) - g(y)]/g(x)$ ，可得

$$(20) \quad \frac{f(x)}{g(x)} < r - r \frac{g(y)}{g(x)} + \frac{f(y)}{g(x)} \quad (a < x < c_1)$$

如果如 (20) 令 $x \rightarrow a$, (15) 可知存在一个点 $c_2 \in (a, c_1)$ 满足

$$(21) \quad \frac{f(x)}{g(x)} < q \quad (a < x < c_2)$$

总结, (19) 与 (21) 可知对于任何 q , 仅靠条件限制 $A < q$, 存在一个点 c_2 如果 $a < x < c_2$ 满足 $f(x)/g(x) < q$ 。

以同样的方式, 如果 $-\infty < A \leq +\infty$, 已经选定 p 满足 $p < A$, 我们可以找到一个点 c_3 满足

$$(22) \quad p < \frac{f(x)}{g(x)} \quad (a < x < c_3)$$

同时 (16) 遵循上述两个声明。 □

Note

洛必达法则: 假设实函数 f, g 在 (a, b) 内可微, 而且对所有 $x \in (a, b)$, $g'(x) \neq 0$, 其中 $-\infty \leq a < b \leq +\infty$ 。已知 $\lim_{x \rightarrow a} f'(x)/g'(x) = A$, 如果 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \lim_{x \rightarrow a} g(x) = 0$, 或者 $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = +\infty$, 那么 $\lim_{x \rightarrow a} f(x)/g(x) = A$ 。

下列四个条件对于洛必达法则是必须的:

1. 形式的不正确 (Indeterminacy of form): $\lim_{x \rightarrow c} f(x) = \lim_{x \rightarrow c} g(x) = 0$ 或 $\pm\infty$; 以及
2. 函数的可导性 (Differentiability of functions): $f(x)$ 与 $g(x)$ 在开区间 \mathcal{I} 是可微的, 除了其中的点 c ; 以及
3. 分母导数非零: $g'(x) \neq 0$ 对于所有在 \mathcal{I} 的 x 且 $x \neq c$; 以及
4. 导数之商存在极限: $\lim_{x \rightarrow c} \frac{f'(x)}{g'(x)}$ 存在。

上述任意一个条件不成立, 那么洛必达法则通常而言就不成立。

Derivatives of Higher Order

5.14 Definition If f has a derivative f' on an interval, and if f' is itself differentiable, we denote the derivative of f' by f'' and call f'' the second derivative of f . Continuing in this manner, we obtain functions

$$f, f', f'', f^{(3)}, \dots, f^{(n)},$$

each of which is the derivative of the preceding one. $f^{(n)}$ is called the n th derivative, or the derivative of order n , of f .

In order for $f^{(n)}(x)$ to exist at a point x , $f^{(n-1)}(t)$ must exist in a neighborhood of x (or in a one-sided neighborhood, if x is an endpoint of the interval on which f is defined), and $f^{(n-1)}$ must be differentiable at x . Since $f^{(n-1)}$ must exist in a neighborhood of x , $f^{(n-2)}$ must be differentiable in that neighborhood.

Note

如果 f 在一个区间有导数 f' , 而 f' 自身又是可微的, 把 f' 的导数记为 f'' , 叫做二阶导数。这样继续下去得到 $f, f', f'', f^{(3)}, \dots, f^{(n)}$, 其中 $f^{(n)}$ 叫做 n 阶导数。

Taylor's Theorem

5.15 Theorem Suppose f is a real function on $[a, b]$, n is a positive integer, $f^{(n-1)}$ is continuous on $[a, b]$, $f^{(n)}(t)$ exists for every $t \in (a, b)$. Let α, β be distinct points of $[a, b]$, and define

$$(23) \quad P(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{f^{(k)}(\alpha)}{k!} (t - \alpha)^k.$$

Then there exists a point x between α and β such that

$$(24) \quad f(\beta) = P(\beta) + \frac{f^{(n)}(x)}{n!} (\beta - \alpha)^n.$$

For $n = 1$, this is just the mean value theorem. In general, the theorem shows that f can be approximated by a polynomial of degree $n - 1$, and that (24) allows us to estimate the error, if we know bounds on $|f^{(n)}(x)|$.

Proof.

令 M 为一个被以下定义的数

$$(25) \quad f(\beta) = P(\beta) + M(\beta - \alpha)^n$$

同时令

$$(26) \quad g(t) = f(t) - P(t) - M(t - \alpha)^n \quad (a \leq t \leq b)$$

我们需要证明对某些介于 α 与 β 之间的 x 有 $n!M = f^{(n)}(x)$ 。根据 (23) 与 (26),

$$(27) \quad g^{(n)}(t) = f^{(n)}(t) - n!M \quad (a < t < b)$$

因此如果我们展示对于某些介于 α 与 β 之间的 x 满足 $g^{(n)}(x) = 0$, 那么证明即可完成。

由于对于 $k = 0, \dots, n-1$ 有 $P^{(k)}(\alpha) = f^{(k)}(\alpha)$, 那么

$$(28) \quad g(\alpha) = g'(\alpha) = \dots = g^{(n-1)}(\alpha) = 0$$

我们选取的 M 可知 $g(\beta) = 0$, 根据中值定理, 对于某些介于 α 与 β 之间的 x_1 有 $g'(x_1) = 0$ 。又因为 $g'(\alpha) = 0$, 可以类似的得出 α 与 x_1 之间的 x_2 有 $g''(x_2) = 0$ 。以此类推 n 步之后得出 α 与 x_{n-1} 之间的 x_n 有 $g^{(n)}(x_n) = 0$, 即介于 α 与 β 之间. \square

Note

泰勒定理: 设 f 是 $[a, b]$ 上的实函数, n 是正整数, $f^{(n-1)}$ 在 $[a, b]$ 上连续, $f^{(n)}(t)$ 对每个 $t \in (a, b)$ 存在。设 α, β 是 $[a, b]$ 中的不同的两点, 再规定 $P(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{f^{(k)}(\alpha)}{k!} (t - \alpha)^k$ 。那么, 在 α 与 β 之间一定存在着一点 x 使得 $f(\beta) = P(\beta) + \frac{f^{(n)}(x)}{n!} (\beta - \alpha)^n$ 。

Differentiation of Vector-valued Functions

5.16 Remarks Definition 5.1 applies without any change to complex functions f defined on $[a, b]$, and Theorems 5.2 and 5.3, as well as their proofs, remain valid. If f_1 and f_2 are the real and imaginary parts of f , that is, if

$$f(t) = f_1(t) + if_2(t)$$

for $a \leq t \leq b$, where $f_1(t)$ and $f_2(t)$ are real, then we clearly have

$$(29) \quad f'(x) = f_1'(x) + if_2'(x);$$

also, f is differentiable at x if and only if both f_1 and f_2 are differentiable at x .

Passing to vector-valued functions in general, i.e., to functions \mathbf{f} which map $[a, b]$ into some R^k , we may still apply Definition 5.1 to define $\mathbf{f}'(x)$. The term $\phi(t)$ in (1) is now, for each t , a point in R^k , and the limit in (2) is taken with respect to the norm of R^k . In other words, $\mathbf{f}'(x)$ is that point of R^k (if there is one) for which

$$(30) \quad \lim_{t \rightarrow x} \left| \frac{\mathbf{f}(t) - \mathbf{f}(x)}{t - x} - \mathbf{f}'(x) \right| = 0$$

and \mathbf{f}' is again a function with values in R^k .

If f_1, \dots, f_k are the components of \mathbf{f} , as defined in Theorem 4.10, then

$$(31) \quad \mathbf{f}' = (f_1', \dots, f_k'),$$

and \mathbf{f} is differentiable at a point x if and only if each of the functions f_1, \dots, f_k is differentiable at x .

Theorem 5.2 is true in this context as well, and so is Theorem 5.3(a) and (b), if fg is replaced by the inner product $\mathbf{f} \cdot \mathbf{g}$ (see Definition 4.3).

When we turn to the mean value theorem, however, and to one of its consequences, namely, L'Hospital's rule, the situation changes. The next two examples will show that each of these results fails to be true for complex-valued functions.

5.17 Example Define, for real x ,

$$(32) \quad f(x) = e^{ix} = \cos x + i \sin x.$$

(The last expression may be taken as the definition of the complex exponential e^{ix} ; see Chap. 8 for a full discussion of these functions.) Then

$$(33) \quad f(2\pi) - f(0) = 1 - 1 = 0$$

but

$$(34) \quad f'(x) = ie^{ix},$$

so that $|f'(x)| = 1$ for all real x .

Thus Theorem 5.10 fails to hold in this case.

5.18 Example On the segment $(0, 1)$, define $f(x) = x$ and

$$(35) \quad g(x) = x + x^2 e^{i/x^2}.$$

Since $|e^{it}| = 1$ for all real t , we see that

$$(36) \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x)}{g(x)} = 1.$$

Next,

$$(37) \quad g'(x) = 1 + \left\{ 2x - \frac{2i}{x} \right\}^{i/x^2} \quad (0 < x < 1),$$

so that

$$(38) \quad |g'(x)| \geq \left\| 2x - \frac{2i}{x} \right\| - 1 \geq \frac{2}{x} - 1.$$

Hence

$$(39) \quad \left| \frac{f'(x)}{g'(x)} \right| = \frac{1}{|g'(x)|} \leq \frac{x}{2-x}$$

and so

$$(40) \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f'(x)}{g'(x)} = 0.$$

By (36) and (40), L'Hospital's rule fails in this case. Note also that $g'(x) \neq 0$ on $(0, 1)$, by (38).

However, there is a consequence of the mean value theorem which, for purposes of applications, is almost as useful as Theorem 5.10, and which remains true for vector-valued functions: From Theorem 5.10 it follows that

$$(41) \quad |f(b) - f(a)| \leq (b - a) \sup_{a < x < b} |f'(x)|.$$

5.19 Theorem Suppose \mathbf{f} is a continuous mapping of $[a, b]$ into R^k and \mathbf{f} is differentiable in (a, b) . Then there exists $x \in (a, b)$ such that

$$|\mathbf{f}(b) - \mathbf{f}(a)| \leq (b - a)|\mathbf{f}'(x)|.$$

Proof.

令 $\mathbf{z} = \mathbf{f}(b) - \mathbf{f}(a) - \mathbf{f}'(b)$, 同时定义

$$\phi(t) = \mathbf{z} \cdot \mathbf{f}(t) \quad (a \leq t \leq b)$$

那么 ϕ 在区间 $[a, b]$ 上为一个实值连续函数, 且在 (a, b) 上可微。根据中值定理有

$$\phi(b) - \phi(a) = (b - a)\phi'(x) = (b - a)\mathbf{z} \cdot \mathbf{f}'(x)$$

其中 $x \in (a, b)$ 。另一方面,

$$\phi(b) - \phi(a) = \mathbf{z} \cdot \mathbf{f}(b) - \mathbf{z} \cdot \mathbf{f}(a) = \mathbf{z} \cdot \mathbf{z} = |\mathbf{z}|^2$$

根据 Schwarz 不等式可得

$$|\mathbf{z}|^2 = (b - a)|\mathbf{z} \cdot \mathbf{f}'(x)| \leq (b - a)|\mathbf{z}||\mathbf{f}'(x)|$$

因此 $|\mathbf{z}| \leq (b - a)|\mathbf{f}'(x)|$, 即期望的结论。 □

Note

设 \mathbf{f} 是把 $[a, b]$ 映入 R^k 内的连续映射, 并且 \mathbf{f} 在 (a, b) 内可微。那么必有 $x \in (a, b)$ 使得 $|\mathbf{f}(b) - \mathbf{f}(a)| \leq (b - a)|\mathbf{f}'(x)|$ 。

6 The Riemann-Stieltjes Integral

本章基于黎曼积分的定义，该定义明确的取决于实线的层次结构。因此首先我们将探讨区间内实值函数的积分，然后再是复数与向量函数的积分，而非区间积分将会在第十与十一章进行探讨。

Definition and Existence of the Integral

6.1 Definition Let $[a, b]$ be a given interval. By a *partition* P of $[a, b]$ we mean a finite set of points x_0, x_1, \dots, x_n , where

$$a = x_0 \leq x_1 \leq \dots \leq x_{n-1} \leq x_n = b.$$

We write

$$\delta x_i = x_i - x_{i-1} \quad (i = 1, \dots, n).$$

Now suppose f is a bounded real function defined on $[a, b]$. Corresponding to each partition P of $[a, b]$ we put

$$\begin{aligned} M_i &= \sup f(x) & (x_{i-1} \leq x \leq x_i), \\ m_i &= \inf f(x) & (x_{i-1} \leq x \leq x_i), \\ U(P, f) &= \sum_{i=1}^n M_i \delta x_i, \\ L(P, f) &= \sum_{i=1}^n m_i \delta x_i, \end{aligned}$$

and finally

$$(1) \quad \int_a^b f dx = \inf U(P, f),$$

$$(2) \quad \int_a^b f dx = \sup L(P, f),$$

where the inf and the sup are taken over all partitions P of $[a, b]$. The left members of (1) and (2) are called the *upper* and *lower Riemann integrals* of f over $[a, b]$, respectively.

If the upper and lower integrals are equal, we say that f is *Riemann-integrable* on $[a, b]$, we write $f \in \mathcal{R}$ (that is, \mathcal{R} denotes the set of Riemann-integrable functions), and we denote the common value of (1) and (2) by

$$(3) \quad \int_a^b f dx,$$

or by

$$(4) \quad \int_a^b f(x) dx.$$

This is the *Riemann integral* of f over $[a, b]$. Since f is bounded, there exist two numbers, m and M , such that

$$m \leq f(x) \leq M \quad (a \leq x \leq b).$$

Hence, for every P ,

$$m(b-a) \leq L(P, f) \leq U(P, f) \leq M(b-a),$$

so that the numbers $L(P, f)$ and $U(P, f)$ form a bounded set. This shows that *the upper and lower integrals are defined for every* bounded function f . The question of their equality, and hence the question of the integrability of f , is a more delicate one. Instead of investigating it separately for the Riemann integral, we shall immediately consider a more general situation.

Note

1. **Partition:** $[a, b]$ 区间的分割。
2. **Sub-interval:** 每个 $[x_i, x_{i+1}]$ 即 partition 的子区间。
3. **Mesh/Norm:** 一个分割的**标准**, 即最长的那个子区间 $\max(x_{i+1} - x_i)$, $i \in [0, n-1]$ 。
4. **Tagged partition:** 取样分割, $P(x, t)$ 指在进行分割 $a = x_0 < x_1 < x_2 < \cdots < x_n = b$ 后, 与每一个子区间中 $[x_i, x_{i+1}]$ 取出一一点 $x_i \leq t_i \leq x_{i+1}$ 。
5. **Refinement:** 精细化分割。假设两个分区 $P(x, t)$ 与 $Q(y, s)$ 皆为区间 $[a, b]$ 的分区。对于每个整数 i , $i \in [0, n]$, 存在一个整数 $r(i)$ 满足 $x_i = y_{r(i)}$, 以及对于某 j , $j \in [r(i), r(i+1)]$ 满足 $t_i = s_j$, 那么我们可以将 $Q(y, s)$ 称为 $P(x, t)$ 的精细化分割。简言之, $Q(y, s)$ 是在 $P(x, t)$ 的基础上添加一些分点和标记。那么可以在此区间的所有采样分割中定义一个 偏序关系 partially ordered set, 称作“精细”。
6. **Riemann sum:** 黎曼和。令 f 为定义在区间 $[a, b]$ 上的实值函数, f 的黎曼和取决于取样分割 $x_0, \dots, x_n, t_0, \dots, t_{n-1}$:

$$\sum_{i=0}^{n-1} f(t_i)(x_{i+1} - x_i)$$

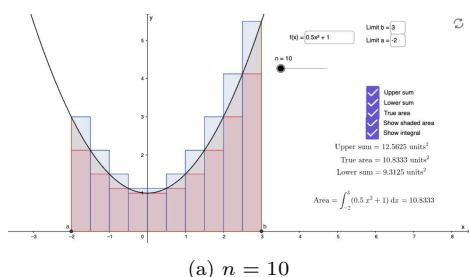
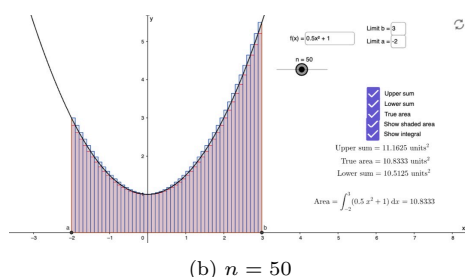
其中 $f(t_i)$ 视作高度, $x_{i+1} - x_i$ 视作宽度, 而黎曼和则是所有带符号的矩形区域之和。

7. **Upper & lower Riemann Sums:** 上黎曼和 $U(P, f) = \sum_{i=1}^n M_i \delta x_i$ 与下黎曼和 $L(P, f) = \sum_{i=1}^n m_i \delta x_i$, 详见下图。

8. **Upper & lower Riemann integrals:** 上黎曼积分与下黎曼积分。严格定义如下: S 是函数 f 在闭区间 $[a, b]$ 上的黎曼积分, 当且仅当对于任意的 $\varepsilon > 0$, 都存在 $\delta > 0$, 使得对于任意的取样分割 $x_0, \dots, x_n, t_0, \dots, t_{n-1}$, 只要它的子区间长度最大值 $\lambda \leq \delta$, 就有

$$\left| \sum_{i=0}^{n-1} f(t_i)(x_{i+1} - x_i) - S \right| < \varepsilon$$

9. **Riemann-integrable:** 黎曼可积。对于一个函数 f , 如果在闭区间 $[a, b]$ 上, 无论怎样进行取样分割, 只要它的子区间长度最大值足够小, 函数 f 的黎曼和都会趋向于一个确定的值, 那么 f 在闭区间 $[a, b]$ 上的黎曼积分存在, 并且定义为黎曼和的极限, 这时候称函数 f 为黎曼可积的 (上下黎曼积分相等时, f 在区间 $[a, b]$ 上黎曼可积)。然而这个定义的缺陷是没有可操作性, 因为要检验所有 $\lambda \leq \delta$ 的取样分割是很难做到的 (接下来的定义更具有普适性)。

(a) $n = 10$ (b) $n = 50$

Upper and lower Riemann sums

6.2 Definition Let α be a monotonically increasing function on $[a, b]$ (since $\alpha(a)$ and $\alpha(b)$ are finite, it follows that α is bounded on $[a, b]$). Corresponding to each partition P of $[a, b]$, we write

$$\Delta\alpha_i = \alpha(x_i) - \alpha(x_{i-1}).$$

It is clear that $\Delta\alpha_i \geq 0$. For any real function f which is bounded on $[a, b]$ we put

$$U(P, f, \alpha) = \sum_{i=1}^n M_i \delta\alpha_i,$$

$$L(P, f, \alpha) = \sum_{i=1}^n m_i \delta\alpha_i,$$

where M_i, m_i have the same meaning as in Definition 6.1, and we define

$$(5) \quad \int_a^b f d\alpha = \inf U(P, f, \alpha),$$

$$(6) \quad \int_a^b f d\alpha = \sup L(P, f, \alpha),$$

the inf and sup again being taken over all partitions.

If the left members of (5) and (6) are equal, we denote their common value by

$$(7) \quad \int_a^b f d\alpha$$

or sometimes by

$$(8) \quad \int_a^b f(x) d\alpha(x).$$

This is the *Riemann-Stieltjes integral* (or simply the *Stieltjes integral*) of f with respect to α , over $[a, b]$.

If (7) exists, i.e., if (5) and (6) are equal, we say that f is integrable with respect to α , in the Riemann sense, and write $f \in \mathcal{R}(\alpha)$.

By taking $\alpha(x) = x$, the Riemann integral is seen to be a special case of the Riemann-Stieltjes integral. Let us mention explicitly, however, that in the general case α need not even be continuous.

A few words should be said about the notation. We prefer (7) to (8), since the letter x which appears in (8) adds nothing to the content of (7). It is immaterial which letter we use to represent the so-called “variable of integration.” For instance, (8) is the same as

$$\int_a^b f(y) d\alpha(y).$$

The integral depends on f, α, a and b , but not on the variable of integration, which may as well be omitted.

The role played by the variable of integration is quite analogous to that of the index of summation: The two symbols

$$\sum_{i=1}^n c_i, \quad \sum_{k=1}^n c_k$$

mean the same thing, since each means $c_1 + c_2 + \cdots + c_n$.

Of course, no harm is done by inserting the variable of integration, and in many cases it is actually convenient to do so.

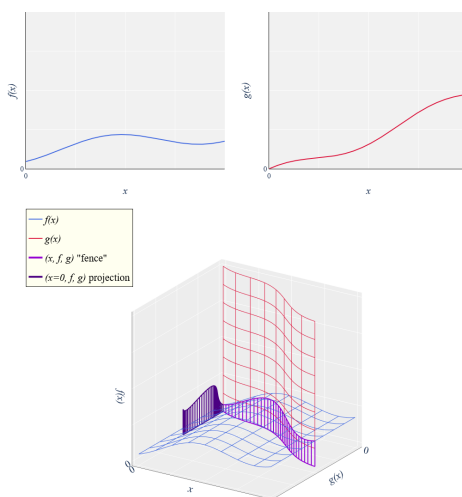
We shall now investigate the existence of the integral (7). Without saying so every time, f will be assumed real and bounded, and α monotonically increasing on $[a, b]$; and, when there can be no misunderstanding, we shall write \int in place of \int_a^b .

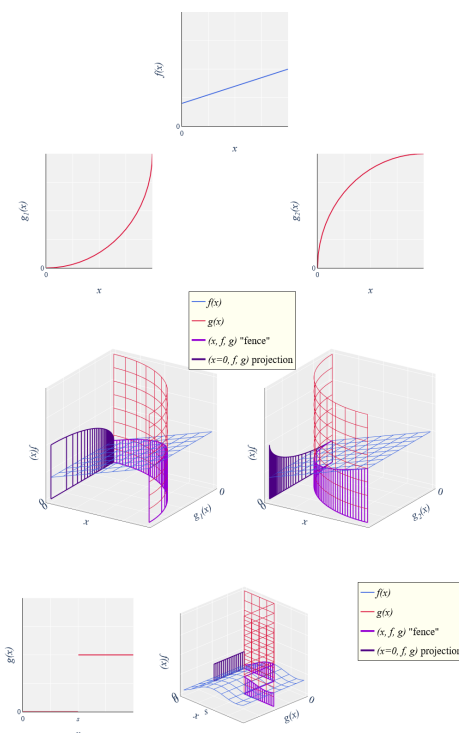
Note

取 $\alpha(x) = x$ 时, Riemann 积分被视为 Riemann-Stieltjes 积分的一个特例。不过一般情况下, α 甚至不一定是连续的。

几何解释

在一个 $x, f(x)$ 以及 $g(x)$ 三维的正交坐标系中, 如果 $g-x$ 面是水平方向的, 且 f 的是正向上的, 那么 (x, f, g) 的表面可以视为一个弯曲的栅栏 (下图紫色部分)。栅栏的弯曲方向取决于 $g(x)$ 的走向, 而其高度则是取决于给定的 $f(x)$ 。该栅栏是 g -sheet 的一部分 (例如, g 曲线在 f 轴方向延伸), 其被 $g-x$ 平面与 f -sheet 所界限。而 Riemann-Stieltjes 积分则是该栅栏投影到 $f-g$ 平面上的面积 - 实际上就是其“影子” ($x=0, f, g$ 平面, 即最左侧平面)。





6.3 Definition We say that the partition P^* is a *refinement* of P if $P^* \supset P$ (that is, if every point P is a point of P^*). Given two partitions, P_1 and P_2 , we say that P^* is their *common refinement* if $P^* = P_1 \cup P_2$.

Note

我们称分割 P^* 是 P 的加细, 如果 $P^* \supset P$ (即 P 的每个点都是 P^* 的点)。设有两个分法 P_1 和 P_2 , 如果 $P^* = P_1 \cup P_2$, 便称 P^* 是它们的共同加细。

6.4 Theorem If P^* is a refinement of P , then

$$(9) \quad L(P, f, \alpha) \leq L(P^*, f, \alpha)$$

and

$$(10) \quad U(P^*, f, \alpha) \leq U(P, f, \alpha)$$

Proof.

为了证明 (9), 首先假设 P^* 仅比 P 多包含了一个点, 令该额外点为 x^* , 且假设 $x_{i-1} <$

$x^* < x_i$, 其中 x_{i-1} 与 x_i 是 P 上的两个不连续的点。令

$$\begin{aligned} w_1 &= \inf f(x) & (x_{i-1} \leq x \leq x^*) \\ w_2 &= \inf f(x) & (x^* \leq x \leq x_i) \end{aligned}$$

很明显, $w_1 \geq m_i$ 且 $w_2 \geq m_i$, 如上述,

$$m_i = \inf f(x) \quad (x_{i-1} \leq x \leq x_i)$$

因此,

$$\begin{aligned} &L(P^*, f, \alpha) - L(P, f, \alpha) \\ &= w_1[\alpha(x^*) - \alpha(x_{i-1})] + w_2[\alpha(x_i) - \alpha(x^*)] - m_i[\alpha(x_i) - \alpha(x_{i-1})] \\ &= (w_1 - m_i)[\alpha(x^*) - \alpha(x_{i-1})] + (w_2 - m_i)[\alpha(x_i) - \alpha(x^*)] \\ &\geq 0 \end{aligned}$$

如果 P^* 比 P 多包含了 k 个点, 那么重复这个过程 k 次, 则可得 (9); 而 (10) 的证明也类似。 \square

7 Sequences and Series of Functions

8 Some Special Functions

9 Functions of Several Variables

10 Integration of Differential Forms

11 The Lebesgue Theory