

*Functional Analysis*¹

–TW–

2024 年 11 月 29 日

¹参考书籍：

《Linear and Nonlinear Functional Analysis with Applications》– Philippe G. Ciarlet

《Real Analysis – Modern Techniques and Their Applications》– Gerald B. Folland

《Functional Analysis – Introduction to Further Topics in Analysis》– Elias M. Stein

《泛函分析讲义》– 张恭庆、林源渠

序

天道几何，万品流形先自守；
变分无限，孤心测度有同伦。

2024 年 11 月 29 日

长夜伴浪破晓梦，梦晓破浪伴夜长

目录

第一章 度量空间	1
1.1 L^p 空间为赋范线性空间	1
1.1.1 范数, 度量	1
1.1.2 L^p Space	2
1.1.3 Young Inequality	4
1.1.4 Hölder Inequality	5
1.1.5 Minkowski Inequality	6
1.2 Completion of a metric space	7
1.2.1 Complete metric spaces	7
1.2.2 Nowhere dense & Category Set	10
1.2.3 保距同构, 完备化空间	13
1.2.4 Completion of a metric space	14
1.3 Sequentially Compact	19
1.4 完全有界集	21
1.5 可分度量空间	24
1.6 Compact	28
1.6.1 度量空间紧集的性质	28
1.6.2 度量空间紧致的等价刻画	31
1.7 一致有界, 等度连续	33
1.7.1 紧致度量空间上的连续函数全体	33
1.7.2 一致有界, 等度连续	35
1.8 Arzelà-Ascoli 定理	36
1.9 Banach 不动点定理	39
1.9.1 Banach 不动点定理 / 压缩映射原理	39

1.9.2	Volterra 方程	41
第二章	赋范空间	42
2.1	赋范线性空间	42
2.1.1	赋范线性空间	42
2.1.2	Banach 空间	44
2.1.3	绝对收敛	47
2.2	有限维赋范空间	49
2.2.1	范数的比较	49
2.2.2	有限维 B^* 空间的范数	51
2.2.3	Riesz 引理	54
2.2.4	赋范空间有限性的刻画	56
2.3	严格凸	57
2.4	B^* 空间的商空间	61
2.4.1	商空间的完备性	63
第三章	内积空间	65
3.1	内积空间	65
3.1.1	Cauchy-Schwarz's Inequality	67
3.2	内积与范数的关系	68
3.2.1	内积的连续性	68
3.2.2	极化恒等式与平行四边形公式	69
3.3	正交分解	72
3.3.1	正交补	72
3.3.2	内积空间的严格凸性	74
3.3.3	Hilbert 空间的闭凸子集 (最佳逼近问题)	75
3.3.4	投影定理 (正交分解)	77
3.3.5	正交补的性质	79
3.3.6	最佳逼近元的内积刻画	80
3.4	正交系	81
3.4.1	正交系与 Bessel 不等式	81
3.4.2	正交系的完备性与完全性	83
3.4.3	可分 Hilbert 空间的分类	87

第四章 线性算子与线性泛函	89
4.1 线性算子 & 线性泛函	89
附录 A <i>Supplementary Content</i>	95
A.1 度量空间稠密子集的等价刻画	95

第一章 度量空间

1.1 L^p 空间为赋范线性空间

回顾实分析中对范数、度量及 L^p 空间的定义.

1.1.1 范数, 度量

下面给出范数和度量的大致定义.

定义 1.1.1. Let X be a vector space over field \mathbb{K} , a **norm** is a function:

$$X \longrightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \quad (1.1)$$

$$f \longmapsto \|f\| \quad (1.2)$$

satisfying the following properties:

- (i) $\|f\| \geq 0, \forall f \in X.$ ($\|f\| = 0 \Leftrightarrow f = 0 \text{ a.e.}$)
- (ii) $\|af\| = |a| \|f\|, \forall a \in \mathbb{K}, f \in X.$
- (iii) $\|f + g\| \leq \|f\| + \|g\|, \forall f, g \in X.$

注. • (i) 中的 “ $\|f\| = 0 \Leftrightarrow f = 0 \text{ a.e.}$ ” 的 “**a.e.**” 是对于 X 取函数空间时的条件, 在实分析的取等条件中基本为默认叙述, 在后续定义中往往省略. 在对 \mathcal{L}^p 空间的定义 (定义 1.1.3) 中可以看到其合理性.

- 范数实际上是对 \mathbb{R}^n 空间中 “与原点之间的距离” 这一概念的推广. 将函数视作向量, 则其范数即为到原点的距离, 即模长.
- 若一个线性空间 X 上配备了一个范数, 则称其为**赋范空间 (赋范线性空间)**.

将函数视作向量，就有其到原点的距离为范数. 但若是想要衡量任意两个函数之间的距离，则需要引入下面度量的概念.

定义 1.1.2. A metric on X is a map

$$\rho : X \times X \longrightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \quad (1.3)$$

$$(x, y) \longmapsto \rho(x, y) \quad (1.4)$$

satisfying

- (i) $\rho(x, y) \geq 0, \forall x, y \in X. \quad (\rho(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y)$
- (ii) $\rho(x, y) = \rho(y, x), \forall x, y \in X.$
- (iii) $\rho(x, y) + \rho(y, z) \geq \rho(x, z), \forall x, y, z \in X.$

注. • 若 X 为函数空间，则 (i) 中 “ $\rho(x, y) = 0$ ” 等价条件默认为 “ $x = y$ a.e.” .

• 度量可看作将两个函数 (向量) 的起点均平移至原点后，其两个终点之间的距离.

1.1.2 L^p Space

L^p Space 下面给出 L^p 空间的定义.

定义 1.1.3. For any measure space (X, \mathcal{M}, μ) , define the L^p Space $L^p(X)$ on X ($1 \leq p < \infty$)

$$L^p(X) = \left\{ f \in \mathcal{M} \mid \int_X |f|^p d\mu < \infty \right\}, \quad \forall 1 \leq p < \infty \quad (1.5)$$

$$L^\infty(X) = \left\{ f \in \mathcal{M} \mid \inf \{ C \geq 0 \mid |f| \leq C \text{ a.e.} \} < \infty \right\} \quad (1.6)$$

注. 与 L^1 空间 (即可积函数构成的空间) 类似, 后面我们考虑的 $L^p(X)$ 空间事实上为几乎处处相等意义下的完全剩余系, 即在 $L^p(X)$ 空间上定义一个等价关系 \sim :

$$f \sim g \Leftrightarrow f = g \text{ a.e.}$$

此时再令 $L^p(X)$ 空间模去该等价关系 \sim , 即

$$L^p(X) := L^p(X) / \sim$$

L^p 范数 在 L^p 空间上, 我们来定义 L^p 范数.

定义 1.1.4. Measure space (X, \mathcal{M}, μ) . For any function $f \in L^p(X)$, define the L^p norm of f

$$\|f\|_p = \left(\int_X |f|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}}, \quad \forall 1 \leq p < \infty \quad (1.7)$$

$$\|f\|_\infty = \inf \{C \geq 0 \mid |f| \leq C \text{ a.e.}\} \quad (1.8)$$

注. • 不难得到 L^∞ 范数的等价定义为

$$\|f\|_\infty = \sup \{C \geq 0 \mid \mu(|f| > C) > 0\} \quad (1.9)$$

- 为了说明上述定义是 well-defined, 我们需要验证其满足范数的三条公理 (Def 1.1.1). 其中前面两条 (正定性、绝对齐性) 是显然的, 而对于三角不等式, 我们需要用到后续证明的 **Minkowski Inequality** (Thm 1.1.4).

事实上, 在证明了 **Minkowski Inequality** (Thm 1.1.4) 后, 我们还可得到 $L^p(X)$ 为线性空间, 从而证明 $(L^p(X), \|\cdot\|_p)$ 为赋范线性空间. 下面我们的证明思路如下:

Young Inequality \Rightarrow Hölder Inequality \Rightarrow Minkowski Inequality

1.1.3 Young Inequality

为了证明 **Hölder** 不等式, 先来给出 **Young** 不等式, 可视作一条均值不等式的加权推广.

定理 1.1.1. Young Inequality.

Suppose $p, q > 0$ and $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Then for $\forall a, b \geq 0$, s. t.

$$ab \leq \frac{1}{p}a^p + \frac{1}{q}b^q \quad (1.10)$$

注. **Young** 不等式可视作一条均值不等式 (几何平均数 \leq 平方平均数) 的加权推广, 即

$$\sqrt{ab} \leq \sqrt{\frac{a^2+b^2}{2}}$$

证明. (利用指数函数的凸性及 **Jensen Inequality**).

It's trivial when $a = 0$ or $b = 0$. 不妨设 $a, b \neq 0$, 即 $a, b > 0$.

Since $f(x) = e^x$ is convex, $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, then by **Jensen Inequality**,

$$e^{\frac{x}{p} + \frac{y}{q}} \leq \frac{1}{p}e^x + \frac{1}{q}e^y, \quad \forall x, y \in \mathbb{R} \quad (1.11)$$

Let $x = \log a^p, y = \log b^q, \forall a, b > 0$, then

$$ab \leq \frac{a^p}{p} + \frac{b^q}{q}, \quad \forall a, b > 0 \quad (1.12)$$

□

下面给出一条推论, 将用于 **Hölder Inequality** 的证明中.

推论 1.1.2. Suppose $p, q > 0$ and $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Then for $\forall f \in L^p, g \in L^q$, s. t.

$$\int |fg| \leq \frac{1}{p} \int |f|^p + \frac{1}{q} \int |g|^q \quad (1.13)$$

证明. By **Young Inequality** (Thm 1.1.1), 逐点均有

$$|fg|(x) \leq \frac{1}{p}|f|^p(x) + \frac{1}{q}|g|^q(x), \quad \forall x \in X \quad (1.14)$$

积分, 得

$$\int |fg| \leq \frac{1}{p} \int |f|^p + \frac{1}{q} \int |g|^q \quad (1.15)$$

□

1.1.4 Hölder Inequality

下面给出二元情形下的 **Hölder** 不等式.

定理 1.1.3. Hölder Inequality.

Suppose $1 < p, q < \infty$ and $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Then $\forall f \in L^p, g \in L^q$, s. t. $fg \in L^1$ and

$$\|fg\|_1 \leq \|f\|_p \cdot \|g\|_q \quad (1.16)$$

证明. It's trivial when $\|f\|_p = 0$ or $\|g\|_q = 0$. 不妨设 $\|f\|_p, \|g\|_q \neq 0$.

不妨设 $\|f\|_p = \|g\|_q = 1$. (Otherwise we can let $\tilde{f} = \frac{f}{\|f\|_p}$ and $\tilde{g} = \frac{g}{\|g\|_q}$)

Then by **Young Inequality (Cor 1.1.2)**,

$$\|fg\|_1 = \int |fg| \leq \frac{1}{p} \int |f|^p + \frac{1}{q} \int |g|^q \quad (1.17)$$

$$= \frac{1}{p} \|f\|_p^p + \frac{1}{q} \|g\|_q^q \quad (1.18)$$

$$= \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (1.19)$$

$$= 1 = \|f\|_p \cdot \|g\|_q \quad (1.20)$$

□

1.1.5 Minkowski Inequality

下面给出 **Minkowski 不等式** 的内容, 它说明了我们所定义的 L^p 范数 $\|\cdot\|_p$ (Def 1.1.4) 的合理性, 并且可以推出 L^p 空间为线性空间, 从而得到 $(L^p(X), \|\cdot\|_p)$ 为赋范线性空间.

定理 1.1.4. Minkowski Inequality.

Suppose $1 \leq p < \infty$. Then for $\forall f, g \in L^p$, s. t.

$$\|f + g\|_p \leq \|f\|_p + \|g\|_p \quad (1.21)$$

证明. $\forall f, g \in L^p$, we have

$$\|f + g\|_p^p = \int |f + g|^p = \int |f + g| \cdot |f + g|^{p-1} \quad (1.22)$$

$$\leq \int |f| \cdot |f + g|^{p-1} + \int |g| \cdot |f + g|^{p-1} \quad (1.23)$$

By **Hölder Inequality** (Thm 1.1.3),

$$\int |f| \cdot |f + g|^{p-1} = \||f| \cdot |f + g|^{p-1}\|_1 \leq \left(\int |f|^p \right)^{\frac{1}{p}} \cdot \left(\int |f + g|^{(p-1)q} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (1.24)$$

where $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Thus $q = \frac{p}{p-1}$, $(p-1)q = p$, we have

$$\int |f| \cdot |f + g|^{p-1} \leq \left(\int |f|^p \right)^{\frac{1}{p}} \cdot \left(\int |f + g|^p \right)^{\frac{p-1}{p}} = \|f\|_p \cdot \|f + g\|_p^{p-1} \quad (1.25)$$

Similarly, we get

$$\int |g| \cdot |f + g|^{p-1} \leq \left(\int |g|^p \right)^{\frac{1}{p}} \cdot \left(\int |f + g|^p \right)^{\frac{p-1}{p}} = \|g\|_p \cdot \|f + g\|_p^{p-1} \quad (1.26)$$

Therefore,

$$\|f + g\|_p^p \leq \int |f| \cdot |f + g|^{p-1} + \int |g| \cdot |f + g|^{p-1} \quad (1.27)$$

$$\leq (\|f\|_p + \|g\|_p) \cdot \|f + g\|_p^{p-1} \quad (1.28)$$

i.e.

$$\|f + g\|_p \leq \|f\|_p + \|g\|_p, \quad \forall f, g \in L^p \quad (1.29)$$

□

1.2 Completion of a metric space

下面我们来讨论度量空间的完备化的内容. 在此之前先给出一些基础概念.

1.2.1 Complete metric spaces

柯西列 先来推广一般度量空间 (X, ρ) 上的柯西列的定义.

定义 1.2.1. In a metric space (X, ρ) , a sequence $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ of points $x_n \in X$ is a Cauchy sequence if $\forall \epsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\rho(x_m, x_n) < \epsilon, \quad \forall m, n > N \quad (1.30)$$

注. Cauchy sequence 也有一种等价定义, 涉及到直径 **diam** 在一般度量空间 (X, ρ) 上的推广, 即

定义 1.2.2. In a metric space (X, ρ) , a sequence $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ of points $x_n \in X$ is a Cauchy sequence if

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \text{diam}\left(\bigcup_{m=n}^{\infty} \{x_m\}\right) = 0 \quad (1.31)$$

where

$$\text{diam}(\Omega) = \sup_{x, y \in \Omega} \rho(x, y), \quad \forall \Omega \subset X \quad (1.32)$$

完备性 下面给出一般度量空间完备性的定义.

定义 1.2.3. A metric space (X, ρ) is complete if every Cauchy sequence of points of X converges in X .

下面给出几个完备与不完备度量空间的例子.

例 1.2.1. • \mathbb{Q} 不完备, \mathbb{R} 完备.

• 在 L^∞ 意义下, $P[a, b]$ 不完备 ($[a, b]$ 上的多项式空间), $C[a, b]$ 完备.

下面给出度量空间完备的等价表述.

命题 1.2.1. Suppose (X, ρ) be a metric space, then

(X, ρ) is complete $\Leftrightarrow X$ 中闭集套定理成立

i.e. \forall 非空闭集列 $\{F_n\}_{n=1}^\infty \subset \mathcal{P}(X)$

If $F_1 \supset F_2 \supset \cdots$ and $\text{diam}(F_n) \rightarrow 0$, then $\bigcap_{n=1}^\infty F_n$ 为单点集

证明.

(a) 必要性 \Rightarrow : Suppose (X, ρ) is complete.

$\forall \{F_n\}_{n=1}^\infty, F_n \subset_{\text{closed}} X, F_1 \supset F_2 \supset \cdots$ and $\text{diam}(F_n) \rightarrow 0$. Take $x_n \in F_n, \forall n \in \mathbb{N}$.

Then $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ is a Cauchy sequence in X .

Since (X, ρ) is complete, then $x_n \rightarrow x_0 \in X$. 不难证明, $x_0 \in \bigcap_{n=1}^\infty F_n$. Thus $\bigcap_{n=1}^\infty F_n \neq \emptyset$.

下用反证法证明 $\bigcap_{n=1}^\infty F_n$ 为单点集:

Assume $\exists x' \in \bigcap_{n=1}^\infty F_n, x' \neq x_0$, then

$$x', x_0 \in F_n, \forall n \in \mathbb{N}$$

Then

$$\text{diam}(F_n) \geq \rho(x', x_0) > 0, \forall n \in \mathbb{N}$$

$$\text{diam}(F_n) \not\rightarrow 0$$

which is a contradiction. Therefore, $\bigcap_{n=1}^{\infty} F_n = \{x_0\}$ 为单点集.

(b) 充分性 \Leftarrow : \forall Cauchy sequence $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset X$. Let

$$F_j = \overline{\bigcup_{n=j}^{\infty} \{x_n\}}, j = 1, 2, \dots \quad (1.33)$$

Then $\{F_n\}_{n=1}^{\infty}$ 满足闭集套条件, $\bigcap_{n=1}^{\infty} F_n = \{x_0\}$ 为单点集, $x_n \rightarrow x_0 \in X$. (X, ρ) complete.

□

1.2.2 Nowhere dense & Category Set

在这一节我们给出无处稠密 (稀疏) 以及纲集的概念.

Nowhere dense 下面给出无处稠密 / 稀疏的定义.

定义 1.2.4. Suppose (X, ρ) be a metric space. We call $A \subset X$ nowhere dense if

$$(\overline{A})^\circ = \emptyset \quad (1.34)$$

注. • $A \subset X$ 无处稠密 / 稀疏即 A 的闭包 \overline{A} 无内点.

- 稠密 (dense) 和 无处稠密 / 稀疏 (nowhere dense) **并不是一**对对偶概念, 有如下关系:

$$A \text{ dense} \Leftarrow A^c \text{ nowhere dense}$$

$$A \text{ dense} \not\Rightarrow A^c \text{ nowhere dense}$$

证明. $A^c \text{ nowhere dense} \Rightarrow (\overline{A^c})^\circ = \emptyset \Rightarrow (A^c)^\circ = (\overline{A})^c = \emptyset \Rightarrow \overline{A} = X \Rightarrow A \text{ dense} \quad \square$

- 单点集 **不一定** 为无处稠密集 / 稀疏集. 这取决于度量 ρ 的选取, 下面给出反例.

例 1.2.2. Consider a metric space (\mathbb{Z}, ρ) with

$$\rho : \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \longrightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \quad (1.35)$$

$$(x, y) \longmapsto \rho(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{if } x = y \\ 1, & \text{if } x \neq y \end{cases} \quad (1.36)$$

Then for $\forall \{x\} \subset \mathbb{Z}$, $B(x, \frac{1}{2}) \cap \mathbb{Z} \subset \{x\}$, 于是 $(\overline{\{x\}})^\circ = \{x\}$ 非空, 单点集 $\{x\}$ 不稀疏.

下面给出更常用的用于判断无处稠密 / 稀疏的等价刻画.

命题 1.2.2. Suppose (X, ρ) be a metric space. Then

$$A \subset X \text{ nowhere dense} \Leftrightarrow \forall B(x, r) \subset X, \exists \overline{B(x', r')} \subset B(x, r), \text{ s. t. } \overline{B(x', r')} \cap \overline{A} = \emptyset$$

证明.

(a) 必要性 \Rightarrow : 反证法. Assume $\exists B(x, r) \subset X$, s. t. $\forall \overline{B(x', r')} \subset B(x, r), \overline{B(x', r')} \cap \overline{A} \neq \emptyset$.

Then $\forall x' \in B(x, r), x' \in \overline{A}$. Thus $x \in \overline{A}$ and $B(x, r) \subset \overline{A} \Rightarrow x$ 为 \overline{A} 的内点, 矛盾.

(b) 充分性 \Leftarrow : 反证法. Suppose $\exists x_0 \in (\overline{A})^\circ$, then $\exists B(x_0, r_0) \subset \overline{A}$.

$\forall \overline{B(x', r')} \subset B(x_0, r_0), \overline{B(x', r')} \subset \overline{A}$, 矛盾.

□

Category Set 下面我们来给出纲集的定义, 这实际上给出了度量空间 (X, ρ) 的子集的分类.

定义 1.2.5. Suppose (X, ρ) be a metric space. If $A \subset X$ is a countable union of nowhere dense subsets of X , i.e.

$$A = \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n, \text{ where } E_n' \text{'s are nowhere dense} \quad (1.37)$$

then we say A is a **First Category Set**. Otherwise we call it a **Second Category Set**.

例 1.2.3. 考虑欧式度量 (\mathbb{R}^1, d) , 则有理数集 \mathbb{Q} 为第一纲集. 一般地, (\mathbb{R}^1, d) 中的可数点集均为第一纲集.

下面给出 **Baire 定理**, 它给出了完备度量空间的刻画.

定理 1.2.1. Baire's Theorem.

Complete metric spaces are Second Category Sets.

证明. 反证法. Assume complete metric space (X, ρ) is a first category set. Then $\exists \{E_n\}_{n=1}^{\infty}$, $E_n \subset X$ nowhere dense, s. t.

$$X = \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n \quad (1.38)$$

Since E_n is nowhere dense, then $\exists \overline{B(x_1, r_1)} \subset X$, s. t. $\overline{B(x_1, r_1)} \cap \overline{E_1} = \emptyset$.

Similarly, for E_2 nowhere dense, $\exists \overline{B(x_2, r_2)} \subset \overline{B(x_1, r_1)}$, s. t. $\overline{B(x_2, r_2)} \cap \overline{E_2} = \emptyset$

...

Denote $F_n = \overline{B(x_n, r_n)}$, we can always choose F_k with $\text{diam}(F_{k+1}) \leq \frac{\text{diam}(F_k)}{2}$. Then F_n 's satisfies:

$$F_n \underset{\text{closed}}{\subset} X, F_1 \supset F_2 \supset \cdots, \text{diam}(F_n) \rightarrow 0$$

Since X is complete, then by **Prop 1.2.1** (完备的等价表述),

$$\bigcap_{n=1}^{\infty} F_n = \{x_0\} \text{ 为单点集.}$$

Since $(\bigcap_{n=1}^{\infty} F_n) \cap (\bigcup_{n=1}^{\infty} \overline{E_n}) = \emptyset$, 而 $\bigcup_{n=1}^{\infty} \overline{E_n} = X$, then $x_0 \notin X$, 矛盾.

Therefore, (X, ρ) is a Second Category Set. □

1.2.3 保距同构, 完备化空间

这一小节我们来介绍等距同构 (Isometry) 和完备化 (度量) 空间的概念.

等距同构 (Isometry) 下面给出度量空间之间的等距 (保距) 同构的定义.

定义 1.2.6. Suppose $(X_1, \rho_1), (X_2, \rho_2)$ are both metric spaces. Suppose

$$T : (X_1, \rho_1) \rightarrow (X_2, \rho_2)$$

If $\rho_2 \circ T = \rho_1$, then we call T an isometry (等距 / 保距映射). 若进一步 T 为满射, 则称 T 为 等距 / 保距同构.

注. 事实上, 条件 “ $\rho_2 \circ T = \rho_1$ ” 已经蕴含了 T 为单射. 从而加上满射的条件即为同构.

证明. $\forall x, y \in X_1, x \neq y$, we have

$$\rho_1(x, y) = \rho_2(T(x), T(y)) \neq 0 \Rightarrow T(x) \neq T(y) \Rightarrow T \text{ injective}$$

□

完备化空间 下面给出一般度量空间的完备化空间的定义.

定义 1.2.7. Suppose (X, ρ) be a metric space. If there exists a complete metric space (X_1, ρ_1) , s. t.

(X, ρ) 等距同构于 (X_1, ρ_1) 的某个稠密子集

则称 X_1 为 X 的 完备化空间.

注. 事实上, 不难说明度量空间的完备化空间有如下的等价定义¹.

定义 1.2.8. 包含 (X, ρ) 的最小的完备度量空间称为 (X, ρ) 的 完备化空间.

¹详见《泛函分析讲义》— 张恭庆、林源渠, 定义 1.2.2 & 命题 1.2.5

1.2.4 Completion of a metric space

下面给出一般度量空间完备化的过程.

定理 1.2.2. Completion of a metric space.

任一度量空间 (X, ρ) 存在完备化空间, 且在保距同构意义下唯一.

证明.

1. Construction of the complete metric space (X_2, ρ_2) :

Let

$$X_1 = \{\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \mid \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset X \text{ is a Cauchy sequence}\} \quad (1.39)$$

$\forall \xi = \{x_n\}_{n=1}^{\infty}, \eta = \{y_n\}_{n=1}^{\infty} \in X_1$, we define an equivalence relation \sim^2 :

$$\xi \sim \eta \Leftrightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \rho(x_n, y_n) = 0 \quad (1.40)$$

Then let

$$X_2 = X_1 / \sim \quad (1.41)$$

Define the metric ρ_2 on X_2

$$\rho_2 : X_2 \times X_2 \longrightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \quad (1.42)$$

$$([\xi], [\eta]) \longmapsto \rho_2([\xi], [\eta]) = \lim_{n \rightarrow \infty} \rho(x_n, y_n) \quad (1.43)$$

where $\xi = \{x_n\}_{n=1}^{\infty}, \eta = \{y_n\}_{n=1}^{\infty} \in X_1$.

下面说明 ρ_2 is well-defined (与代表元无关 & 极限存在):

(a) 与代表元无关: $\forall \tilde{\xi} = \{\tilde{x}_n\}_{n=1}^{\infty}, \tilde{\eta} = \{\tilde{y}_n\}_{n=1}^{\infty}$ with $[\tilde{\xi}] = [\xi], [\tilde{\eta}] = [\eta]$. Then

$$\rho(\tilde{x}_n, \tilde{y}_n) \leq \rho(\tilde{x}_n, x_n) + \rho(x_n, y_n) + \rho(y_n, \tilde{y}_n), \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (1.44)$$

$$\rho(x_n, y_n) \leq \rho(x_n, \tilde{x}_n) + \rho(\tilde{x}_n, \tilde{y}_n) + \rho(\tilde{y}_n, y_n), \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (1.45)$$

²不难证明 well-defined: 自反性、对称性、传递性

Since $[\widetilde{\xi}] = [\xi]$, $[\widetilde{\eta}] = [\eta]$, then

$$\rho(x_n, \widetilde{x}_n) \rightarrow 0, \rho(y_n, \widetilde{y}_n) \rightarrow 0 \quad (1.46)$$

Letting $n \rightarrow \infty$, we get

$$\rho_2(\widetilde{x}_n, \widetilde{y}_n) = \rho_2(x_n, y_n) \quad (1.47)$$

(b) 极限存在: 即证 $\{\rho(x_n, y_n)\}_{n=1}^{\infty}$ 为 \mathbb{R} 中 Cauchy sequence.

$\forall [\xi], [\eta] \in X_2$, where $\xi = \{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, $\eta = \{y_n\}_{n=1}^{\infty} \subset X$ are Cauchy sequences. Then

$$|\rho(x_n, y_n) - \rho(x_m, y_m)| = |(\rho(x_n, y_n) - \rho(x_m, y_n)) + (\rho(x_m, y_n) - \rho(x_m, y_m))| \quad (1.48)$$

$$\leq |\rho(x_n, y_n) - \rho(x_m, y_n)| + |\rho(x_m, y_n) - \rho(x_m, y_m)| \quad (1.49)$$

$$\leq \rho(x_n, x_m) + \rho(y_n, y_m), \quad \forall n, m \in \mathbb{N} \quad (1.50)$$

Since $\xi = \{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, $\eta = \{y_n\}_{n=1}^{\infty} \subset X$ are Cauchy sequences, then $\{\rho(x_n, y_n)\}_{n=1}^{\infty}$ is a Cauchy sequence in \mathbb{R} .

2. Construct isometry T :

Consider 嵌入映射

$$T : X \rightarrow X_2 \quad (1.51)$$

$$x \mapsto [\{x\}_{n=1}^{\infty}] \quad (1.52)$$

下面证明 T 为保距映射:

$\forall x, y \in X$, then

$$\rho_2(T(x), T(y)) = \lim_{n \rightarrow \infty} \rho(x, y) = \rho(x, y), \quad \forall x, y \in X \quad (1.53)$$

Thus T is an isometry (保距映射).

3. $T(X)$ is dense in X_2 :

$\forall [\xi] = [\{x_n\}_{n=1}^\infty] \in X_2$, where $\xi = \{x_n\}_{n=1}^\infty$ is a Cauchy sequence in X . Then

Consider the sequence $\{T(x_n)\}_{n=1}^\infty$ in X_2 . We have

$$\rho_2(T(x_n), [\xi]) = \lim_{m \rightarrow \infty} \rho(x_n, x_m), \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (1.54)$$

Since $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset X$ is a Cauchy sequence in X , then

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \rho_2(T(x_n), [\xi]) = \lim_{n \rightarrow \infty} \lim_{m \rightarrow \infty} \rho(x_n, x_m) = 0 \quad (1.55)$$

i.e.

$$T(x_n) \xrightarrow{\rho_2} [\xi], \quad \forall [\xi] = [\{x_n\}_{n=1}^\infty] \in X_2 \quad (1.56)$$

Therefore, $T(X)$ is dense³ in X_2 , and so (X, ρ) 保距同构于 (X_2, ρ_2) 的稠密子集 TX .

4. (X_2, ρ_2) is complete:

\forall Cauchy sequence $\{[\xi_n]\}_{n=1}^\infty \subset X_2$, where $\xi_n = \{x_j^n\}_{j=1}^\infty \subset X$ is a Cauchy sequence.

By **Step 3**, $T(X)$ is dense in X_2 and $\forall n \in \mathbb{N}$,

$$\rho_2(T(x_j^n), [\xi_n]) \rightarrow 0, \quad \text{as } j \rightarrow \infty \quad (1.57)$$

Thus $\exists j_n \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\rho_2(T(x_{j_n}^n), [\xi_n]) < \frac{1}{n}, \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad (1.58)$$

Let $\xi = \{x_{j_n}^n\}_{n=1}^\infty$. It suffices to show $[\xi_n] \rightarrow [\xi]$, i.e.

$$\rho_2([\xi_n], [\xi]) \rightarrow 0, \quad \text{as } n \rightarrow \infty \quad (1.59)$$

而这需要证明两点结论, 即 $[\xi] \in X_2$ & $[\xi_n] \rightarrow [\xi]$:

³此处实际用到了度量空间稠密子集的等价刻画, 具体可见附录 A - Lemma A.1.1

(a) $[\xi] \in X_2$, i.e. $\xi = \{x_{j_n}^n\}_{n=1}^\infty \subset X$ is a Cauchy sequence in X :

Fix $\epsilon > 0$. Since $\{[\xi_n]\}_{n=1}^\infty$ is a Cauchy sequence in X_2 , and $\rho_2(T(x_{j_n}^n), [\xi_n]) \rightarrow 0$, then since T is isometry (by **Step 2**)

$\exists N \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\rho(x_{j_k}^k, x_{j_l}^l) = \rho_2(T(x_{j_k}^k), T(x_{j_l}^l)) \quad (1.60)$$

$$\leq \rho_2(T(x_{j_k}^k), [\xi_k]) + \rho_2([\xi_k], [\xi_l]) + \rho_2([\xi_l], T(x_{j_l}^l)) \quad (1.61)$$

$$< \epsilon, \quad \forall k, l > N \quad (1.62)$$

Therefore, $\xi = \{x_{j_n}^n\}_{n=1}^\infty \subset X$ is a Cauchy sequence, thus $[\xi] \in X_2$.

(b) $[\xi_n] \rightarrow [\xi]$:

WTS: $\rho_2([\xi_n], [\xi]) \rightarrow 0$, i.e.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \rho_2([\xi_n], [\xi]) = \lim_{n \rightarrow \infty} \lim_{k \rightarrow \infty} \rho(x_k^n, x_{j_k}^k) = 0 \quad (1.63)$$

Fix $n \in \mathbb{N}$. Since

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \rho(x_{j_n}^n, x_k^n) = \rho_2(T(x_{j_n}^n), [\xi_n]) < \frac{1}{n} \quad (1.64)$$

Then $\forall \epsilon > 0$, $\exists k_0 \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\rho(x_{j_n}^n, x_k^n) < \frac{1}{n} + \epsilon, \quad \forall k > k_0 \quad (1.65)$$

Since $\xi = \{x_{j_n}^n\}_{n=1}^\infty \subset X$ is a Cauchy sequence in X , then

$$\rho(x_{j_n}^n, x_{j_k}^k) \rightarrow 0 \text{ as } n, k \rightarrow \infty \quad (1.66)$$

Then

$$\rho(x_k^n, x_{j_k}^k) \leq \rho(x_k^n, x_{j_n}^n) + \rho(x_{j_n}^n, x_{j_k}^k) \quad (1.67)$$

$$\leq \frac{1}{n} + \epsilon + \rho(x_{j_n}^n, x_{j_k}^k) \quad (1.68)$$

Letting $\epsilon \rightarrow 0^+$ and $n, k \rightarrow \infty$, we have

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \rho_2([\xi_n], [\xi]) = \lim_{n \rightarrow \infty} \lim_{k \rightarrow \infty} \rho(x_k^n, x_{j_k}^k) = 0 \quad (1.69)$$

5. X_2 在保距同构下的唯一性:

Suppose $(X_2, \rho_2), (X'_2, \rho'_2)$ 均为 (X, ρ) 的完备化空间. $i_1 : X \rightarrow X_2, i_2 : X \rightarrow X'_2$ 为保距映射.
 $\forall [\xi] \in X_2$. By **Step 3**, $\exists \{x_n\}_{n=1}^\infty \subset X$, s. t.

$$i_1(x_n) \rightarrow [\xi] \text{ in } X_2, \text{ as } n \rightarrow \infty \quad (1.70)$$

$\Rightarrow \{i_1(x_n)\}_{n=1}^\infty \subset X_2$ is a Cauchy sequence in X_2 .

$\Rightarrow \forall \epsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\rho_2(i_1(x_n), i_1(x_m)) = \rho(x_n, x_m) < \epsilon, \forall n, m > N \quad (1.71)$$

$\Rightarrow \{x_n\}_{n=1}^\infty \subset X$ is a Cauchy sequence in X .

$\Rightarrow \{i_2(x_n)\}_{n=1}^\infty \subset X'_2$ is a Cauchy sequence in X'_2 .

\Rightarrow Suppose $i_2(x_n) \rightarrow [\xi'] \in X'_2$ as $n \rightarrow \infty$. Let

$$T : X_2 \rightarrow X'_2 \quad (1.72)$$

$$[\xi] \mapsto T([\xi]) = [\xi'] \quad (1.73)$$

不难证明 $T : X_2 \rightarrow X'_2$ 为保距映射. Similarly, we can prove T is surjective.

$\Rightarrow T$ is an isometry. i.e. X_2, X'_2 保距同构.

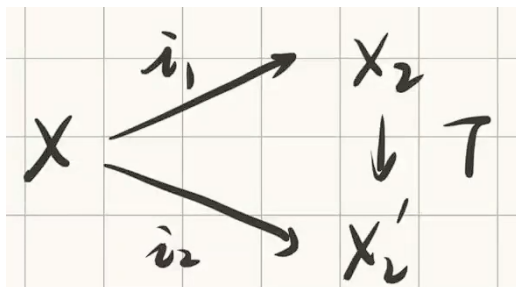


图 1.1: X_2 在保距同构下的唯一性

□

例 1.2.4. 下面给出两个完备化空间的例子.

1. $(P[a, b], \rho_\infty) \rightarrow (C[a, b], \rho_\infty)$, 即区间 $[a, b]$ 上的多项式全体在度量 ρ_∞ 下的完备化空间为 $[a, b]$ 上的连续函数全体. 其中

$$\rho_\infty(x, y) = \max_{a \leq t \leq b} |x(t) - y(t)| \quad (1.74)$$

2. $(C[a, b], \rho_1) \rightarrow (L^1[a, b], \rho_1)$, 即区间 $[a, b]$ 上的连续函数全体在度量 ρ_1 下的完备化空间为 $[a, b]$ 上 Lebesgue 可积函数全体.

1.3 Sequentially Compact

引入 回顾在拓扑和数学分析中接触过的概念, 列紧性 (sequentially compact). 现将其限制于度量空间上给出定义.

定义 1.3.1. Suppose (X, ρ) be a metric space, $A \subset X$. If $\forall \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset A$, \exists subsequence $\{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty} \subset \{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ convergent in X , then we call A sequentially compact (列紧的).

注. • 将条件 “metric space (X, ρ) ” 改为 “拓扑空间 X ” 即可得到拓扑中的一般性定义.

回顾一般拓扑空间中 “紧致”、“列紧”、“极限点紧” 的定义与性质, 有如下关系:

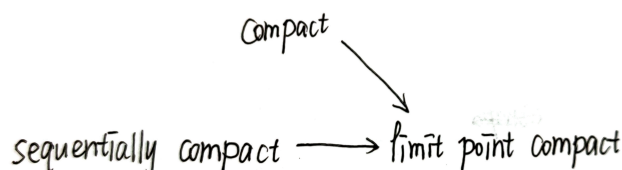


图 1.2: Relations among compact, sequentially compact and limit point compact

• If $\forall \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset A$, \exists subsequence $\{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty} \subset \{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ convergent in A , then 称 A 自列紧.

例子 下面给出一个经典的非列紧空间的例子.

例 1.3.1. Consider the set

$$l^1 = \left\{ \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \mid \sum_{n=1}^{\infty} |x_n| < \infty, x_n \in \mathbb{R} \right\} \quad (1.75)$$

$\forall \xi = \{x_n\}_{n=1}^{\infty}, \eta = \{y_n\}_{n=1}^{\infty} \in l^1$, define the metric ρ_1 on l^1 :

$$\rho_1 : l^1 \times l^1 \longrightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \quad (1.76)$$

$$(\xi, \eta) \longmapsto \rho_1(\xi, \eta) = \sum_{n=1}^{\infty} |x_n - y_n| \quad (1.77)$$

Let

$$A = \left\{ \{\delta_{kj}\}_{j=1}^{\infty} \right\}_{k=1}^{\infty} \quad (1.78)$$

$$= \{(1, 0, \dots, 0, \dots), (0, 1, \dots, 0, \dots), \dots, (0, 0, \dots, 1, \dots), \dots\} \subset l^1 \quad (1.79)$$

则 $A \subset l^1$ 中每两个元素之间的距离均为 2, 无收敛子列, 故 (l^1, ρ_1) 非列紧.

性质 对于度量空间中的列紧集, 容易得到其必为完备度量空间.

命题 1.3.1. 列紧度量空间必完备.

证明. Suppose (X, ρ) be sequentially compact. Then for \forall Cauchy sequence $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset X$,
 \exists subsequence $\{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ convergent \Rightarrow Cauchy sequence $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ convergent $\Rightarrow (X, \rho)$ complete \square

为了更好地理解一般度量空间中的列紧性, 我们可以与欧氏空间 \mathbb{R}^n 中有界的概念联系.

\mathbb{R}^n	度量空间
有界 (<i>bounded</i>)	列紧
有界闭	自列紧

1.4 完全有界集

ϵ -网 在一般的度量空间中, 我们来引入一个比有界集更强的概念. 首先来给出 ϵ -网的定义.

定义 1.4.1. Suppose (X, ρ) be a metric space, $N \subset M \subset X$ and $\epsilon > 0$. If for $\forall x \in M$, $\exists y \in N$, s. t.

$$\rho(x, y) < \epsilon$$

则称 N 为 M 的一个 ϵ -网, 即 $M \subset \bigcup_{x \in N} B(x, \epsilon)$. 进一步若 N 为有穷集 (*finite*), 则称 N 为 M 的一个 有穷 ϵ -网.

完全有界集 下面给出完全有界集的概念.

定义 1.4.2. Suppose (X, ρ) be a metric space, $A \subset X$. If $\forall \epsilon > 0$, A 存在有穷 ϵ -网, 则称 A 为 完全有界集.

注. 完全有界集的概念比有界集要更强, 即

$$\text{完全有界集} \Rightarrow \text{有界集}, \quad \text{完全有界集} \nLeftarrow \text{有界集}$$

例1.3.1 中集合 $A = \left\{ \left\{ \delta_{kj} \right\}_{j=1}^{\infty} \right\}_{k=1}^{\infty}$ 即为有界集但非完全有界.

等价表述 下面我们将给出一般度量空间中完全有界集的等价表述, 便于我们判断和理解完全有界集的概念.

定理 1.4.1. 完全有界集的等价表述.

Suppose (X, ρ) be a metric space and $A \subset X$. Then

$$A \text{ 完全有界} \Leftrightarrow A \text{ 中任意点列存在 } Cauchy \text{ 子列}$$

注. 根据该定理我们容易得到, 在一般的度量空间中, 列紧 \Rightarrow 完全有界. 而在完备度量空间中, 完全有界 \Leftrightarrow 列紧. 特别地, 在欧氏空间 \mathbb{R}^n 中, 列紧、完全有界、有界三者等价.

证明.

\Rightarrow : 若 A 完全有界. $\forall \{x_n\}_{n=1}^\infty \subset A$, 下面证明 $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ 存在 *Cauchy* 子列:

- For $\epsilon = 1$, $\exists y_1 \in A$, s. t. $B(y_1, 1)$ 中包含 $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ 无穷多项, 记为 $\{x_n^{(1)}\}_{n=1}^\infty \subset \{x_n\}_{n=1}^\infty$.

(否则若 $\forall y \in A$, $B(y, 1)$ 均至多包含 $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ 中有穷个点, 则 A 无有穷 1-网)

- For $\epsilon = \frac{1}{2}$, $\exists y_2 \in A$, s. t. $B(y_2, \frac{1}{2})$ 中包含 $\{x_n^{(1)}\}_{n=1}^\infty$ 无穷多项, 记为 $\{x_n^{(2)}\}_{n=1}^\infty \subset \{x_n^{(1)}\}_{n=1}^\infty$.

...

- For $\epsilon = \frac{1}{k}$, $\exists y_k \in A$, s. t. $B(y_k, \frac{1}{k})$ 中包含 $\{x_n^{(k-1)}\}_{n=1}^\infty$ 中无穷多项, 记为 $\{x_n^{(k)}\}_{n=1}^\infty \subset \{x_n^{(k-1)}\}_{n=1}^\infty$.

从而我们得到了 $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ 的一系列子列: $\{x_n^{(1)}\}_{n=1}^\infty, \{x_n^{(2)}\}_{n=1}^\infty, \dots, \{x_n^{(k)}\}_{n=1}^\infty, \dots$

取出第 k 个子列 $\{x_n^{(k)}\}_{n=1}^\infty$ 的第 k 项 $x_k^{(k)}$, 得到子列 $\{x_n^{(n)}\}_{n=1}^\infty$ ⁴.

下面证明: $\{x_n^{(n)}\}_{n=1}^\infty \subset \{x_n\}_{n=1}^\infty$ 为 *Cauchy* 列.

Since

$$\rho(x_{n+p}^{(n+p)}, x_n^{(n)}) \leq \rho(x_{n+p}^{(n+p)}, y_n) + \rho(y_n, x_n^{(n)}) \leq \frac{2}{n}, \quad \forall n, p \in \mathbb{N} \quad (1.80)$$

Therefore, $\{x_n^{(n)}\}_{n=1}^\infty \subset \{x_n\}_{n=1}^\infty$ is a Cauchy sequence in A .

⁴这种从一系列序列中各取出一个元素构成新序列, 再 (一致) 收敛的方法称为对角线法则, 在实分析 (Real Analysis) 中证明任一可测函数可由简单函数列逼近时曾使用, 详情可见 Real Analysis 笔记定理 2.2.1.

\Leftarrow : 反证法. Assume A 非完全有界, 即 $\exists \epsilon_0 > 0$, s. t. A 无有穷 ϵ_0 -网.

- $\forall x_1 \in A, \exists x_2 \in A \setminus B(x_1, \epsilon_0)$ (Otherwise $A \subset B(x_1, \epsilon_0)$, A 存在有穷 ϵ_0 -网)

- Similarly, $\exists x_3 \in A \setminus (B(x_1, \epsilon_0) \cup B(x_2, \epsilon_0))$

...

- $\exists x_k \in A \setminus \left(\bigcup_{i=1}^{k-1} B(x_i, \epsilon_0) \right)$

从而得到 A 中的一列点 $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset A$, 其中

$$\rho(x_i, x_j) > \epsilon_0 > 0, \forall i \neq j$$

于是 $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset A$ 无 Cauchy 子列, 矛盾.

□

1.5 可分度量空间

作为一类特殊的拓扑空间, 下面我们来讨论一些常见的度量空间的可分性. 首先回顾一下可分的定义.

定义 1.5.1. Suppose (X, τ) be a Topological space. If (X, τ) 存在可数稠密子集, then (X, τ) is called separable (可分的).

根据可分空间的定义, 不难得到上节所介绍的完全有界空间可分.

命题 1.5.1. 完全有界空间为可分度量空间.

证明. Suppose (X, ρ) is totally bounded. Then for $\forall k \in \mathbb{N}, \exists n_k \in \mathbb{N}, y_1, \dots, y_{n_k} \in X$, s. t.

$$X \subset \bigcup_{i=1}^{n_k} B(y_i^k, \frac{1}{k}) \quad (1.81)$$

Let

$$A = \bigcup_{k=1}^{\infty} \bigcup_{i=1}^{n_k} \{y_i^k\} \subset X \text{ countable} \quad (1.82)$$

Then for $\forall x \in X, \exists 1 \leq l_k \leq n_k, y_{l_k}^k \in A$, s. t.

$$\rho(x, y_{l_k}^k) < \frac{1}{k}, \quad \forall k \in \mathbb{N}$$

Thus $\{y_{l_k}^k\}_{k=1}^{\infty} \subset A$ convergent to $x \in X$, i.e. $y_{l_k}^k \xrightarrow{\rho} x$ as $k \rightarrow \infty$.

Therefore, by **Lemma A.1.1**, $A \subset X$ is dense in X . X is separable. □

下面来讨论一些常见的度量空间的可分性.

例 1.5.1. [可分空间].

- $(C[a, b], \rho_\infty)$ 可分.

– 证明. 有理系数多项式 $\xrightarrow{\text{一致逼近}}$ 多项式 $\xrightarrow{\text{一致逼近}}$ 连续函数 □

- (l^p, ρ_p) 可分.

– 证明. 此处 (l^p, ρ_p) 定义与例 1.3.1 中一致, 即

$$l^p = \left\{ \{x_n\}_{n=1}^\infty \mid \sum_{n=1}^\infty |x_n|^p < \infty, x_n \in \mathbb{R} \right\} \quad (1.83)$$

$$\rho_p : l^p \times l^p \longrightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \quad (1.84)$$

$$(\{x_n\}_{n=1}^\infty, \{y_n\}_{n=1}^\infty) \longmapsto \rho_p(\{x_n\}_{n=1}^\infty, \{y_n\}_{n=1}^\infty) = \sum_{n=1}^\infty |x_n - y_n|^p \quad (1.85)$$

下面来构造 (l^p, ρ_p) 的可数稠密子集:

* Let

$$A_1 = \{\{x_n\}_{n=1}^\infty \mid x_1 \in \mathbb{Q}, x_n = 0, \forall n > 1\} \subset l^p \quad (1.86)$$

$$A_2 = \{\{x_n\}_{n=1}^\infty \mid x_1, x_2 \in \mathbb{Q}, x_n = 0, \forall n > 2\} \subset l^p \quad (1.87)$$

$$\dots \quad (1.88)$$

$$A_k = \{\{x_n\}_{n=1}^\infty \mid x_1, \dots, x_k \in \mathbb{Q}, x_n = 0, \forall n > k\} \subset l^p \quad (1.89)$$

$$A = \bigcup_{k=1}^\infty A_k \subset l^p \quad (1.90)$$

* $A \subset l^p$ 即为 (l^p, ρ_p) 的可数稠密子集:

$\forall \{x_n\}_{n=1}^\infty \in l^p$. Since

$$\sum_{n=1}^\infty |x_n|^p < \infty$$

Then for $\forall \epsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\sum_{n=N+1}^\infty |x_n|^p < \frac{\epsilon}{2}$$

Thus $\exists \{y_n\}_{n=1}^\infty \in A_N \subset A, y_n = 0, \forall n > N$ and

$$|y_n - x_n|^p < \frac{\epsilon}{2N}, \forall 1 \leq n \leq N$$

Therefore

$$\rho_p(\{x_n\}_{n=1}^\infty, \{y_n\}_{n=1}^\infty) = \sum_{n=1}^\infty |x_n - y_n|^p < \epsilon$$

$A \subset l^p$ is dense in l^p while it's also countable.

□

- $L^p[a, b]$ 可分.

证明. Review the conclusions in *Real Analysis*. $\forall f \in L^p[a, b]$, then f is measurable.

Since 任一可测函数可由简单函数列逼近 (*Real Analysis* 笔记 Thm 2.2.1)

又根据 **Lusin** 定理 (*Real Analysis* 笔记 Thm 3.8.2), 可得:

$$\text{连续函数} \Rightarrow \text{简单函数} \Rightarrow f \in L^p$$

□

- $L^\infty[a, b]$ 不可分.

证明. Let

$$E = \left\{ f \in L^\infty[a, b] \mid f(x) = \begin{cases} 0, & x \in [a, r] \\ 1, & x \in (r, b] \end{cases}, \forall r \in (a, b) \right\} \quad (1.91)$$

Then $E \subset L^\infty[a, b]$ is uncountable, and

$$\rho_\infty(f, g) = 1 > 0, \forall f, g \in E$$

下面用反证法证明 $L^\infty[a, b]$ 不可分. Assume $L^\infty[a, b]$ is separable.

Then \exists countable $\{f_n\}_{n=1}^\infty \subset L^\infty[a, b]$, s. t.

$$\overline{\{f_n\}_{n=1}^\infty} = L^\infty[a, b]$$

即 $L^\infty[a, b]$ 中点均可由 $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ 中的某些点逼近, 从而

$$\bigcup_{n=1}^\infty B(f_n, \frac{1}{3}) = L^\infty[a, b] \supset E$$

于是 $\exists N \in \mathbb{N}$, s. t.

$B(f_N, \frac{1}{3})$ 中包含 E 中至少 2 个点 (事实上可严格地说包含 E 中不可数个点)

而 $\rho_\infty(f, g) = 1 > 0, \forall f, g \in E$, 这与 $f, g \in B(f_N, \frac{1}{3})$ 矛盾.

综上, $L^\infty[a, b]$ 不可分.

□

- l^∞ 不可分.

证明. Similarly. Let

$$E = \{\{x_n\}_{n=1}^\infty \in l^\infty \mid x_n = 0 \text{ or } 1, \forall n \in \mathbb{N}\} \subset l^\infty \quad (1.92)$$

Then $E \subset l^\infty$ is uncountable (E 与二进制数一一对应, 而二进制数与实数 \mathbb{R} 一一对应), and

$$\rho_\infty(\{x_n\}_{n=1}^\infty, \{y_n\}_{n=1}^\infty) = 1 > 0, \forall \{x_n\}_{n=1}^\infty, \{y_n\}_{n=1}^\infty \in E$$

后续步骤与上述 $L^\infty[a, b]$ 不可分证明过程一致. □

1.6 Compact

首先来回顾一下拓扑学中关于紧致的定义, 在度量空间中也是一脉相承的.

定义 1.6.1. Suppose (X, τ) be a topological space. If X 的任意开覆盖都有有限子覆盖, 则称 X 为 紧致的 (compact).

注. 事实上我们运用的更多的为一般拓扑 / 度量空间的紧致子集的概念, 其定义如下:

Suppose $A \subset (X, \tau)$. If A 的任意开覆盖都有有限子覆盖 (在子空间拓扑意义下为紧集), 则称 A 为 紧 (子) 集.

1.6.1 度量空间紧集的性质

下面我们给出度量空间中紧集的 4 条性质 (事实上大部分对一般的 Hausdorff 空间成立).

命题 1.6.1. [紧 \Rightarrow 闭, Hausdorff].

若 $A \subset (X, \rho)$ 紧致, 则 A 为闭集.

注. 该结论对于一般拓扑空间不成立, 但对于 **Hausdorff** 空间成立, 故自然度量空间成立.

证明. 下面对一般情形进行证明, 即 (X, τ) 为 Hausdorff 空间, 证明: A^c open.

Fix $x \in A^c$. Since X is Hausdorff, then for $\forall y \in A, \exists x \in V_y^x, y \in U_y^x$, s. t.

$$U_y^x \cap V_y^x = \emptyset, U_y^x, V_y^x \subset X$$

open

Then we have

$$A \subset \bigcup_{y \in A} U_y^x$$

Since A is compact, there exists $U_{y_1}^x, \dots, U_{y_n}^x \in \{U_y^x\}_{y \in A}$, s. t.

$$A \subset \bigcup_{i=1}^n U_{y_i}^x$$

Let

$$V^x = \bigcap_{i=1}^n V_{y_i}^x \subset X$$

open

Then $x \in V^x$ and $V^x \cap \bigcup_{i=1}^n U_{y_i}^x = \emptyset$, so $V^x \cap A = \emptyset, V^x \subset A^c$. Therefore, A^c is open. □

命题 1.6.2. [紧集的闭子集必为紧集, 一般拓扑空间].

若 $A \subset (X, \rho)$ 紧致, $K \subset A$ 为闭集, 则 K 紧致.

注. 该结论对于一般的拓扑空间均成立.

证明. 下面对一般情形进行证明, 且下述证明过程均以子空间 (A, τ_A) 作为全空间.

$\forall \{U_i\}_{i \in I}, U_i \underset{\text{open}}{\subset} A, \forall i \in I, \text{ s. t.}$

$$K \subset \bigcup_{i \in I} U_i$$

Since $K \subset A$ closed, then $K^c \subset A$ open. Thus

$$A = K^c \cup K = K^c \cup \bigcup_{i \in I} U_i$$

Since A is compact, then $\exists i_1, \dots, i_n \in I, \text{ s. t.}$

$$A = K^c \cup \bigcup_{k=1}^n U_{i_k}$$

Therefore $K \subset \bigcup_{k=1}^n U_{i_k}$. $K \subset A$ is compact. □

根据**命题 1.6.2**, 我们可得到另一条直接推论.

推论 1.6.1. [Hausdorff].

紧集和闭集的交为紧集.

证明. 紧集与闭集相交 \Rightarrow 交集为原紧集的闭子集 \Rightarrow 根据**命题 1.6.2**, 该交集为紧集 □

命题 1.6.3. [Hausdorff].

$\{K_a \subset X\}_{a \in \Lambda}$ 为一个紧子集族, 满足任意有限交非空, 则

$$\bigcap_{a \in \Lambda} K_a \neq \emptyset \quad (1.93)$$

证明. 反证法. Assume $\bigcap_{a \in \Lambda} K_a = \emptyset$. Then for $\forall a_0 \in \Lambda$,

$$K_{a_0} \cap \bigcap_{\substack{a \in \Lambda \\ a \neq a_0}} K_a = \emptyset, \quad K_{a_0} \subset \bigcup_{\substack{a \in \Lambda \\ a \neq a_0}} K_a^c$$

Since X is Hausdorff, $K_a \subset X$ is compact, then K_a is closed, $\forall a \in \Lambda$. Thus

$\{K_a^c \mid a \neq a_0\}_{a \in \Lambda}$ is an open covering of K_{a_0} . Since $K_{a_0} \subset X$ is compact, then $\exists a_1, \dots, a_n \in \Lambda$, s. t.

$$K_{a_0} \subset \bigcup_{i=1}^n K_{a_i}^c$$

Therefore,

$$\bigcap_{i=0}^n K_{a_i} = \emptyset$$

which is a contradiction to “任意有限交非空”. □

命题 1.6.4. [Hausdorff].

$A \subset (X, \rho)$ 为闭集. 若对于 A 中任意闭子集族 $\{F_a\}_{a \in \Lambda}$, 如果满足任意有限交非空, 便有 $\bigcap_{a \in \Lambda} F_a \neq \emptyset$, 则 A 为紧集.

证明. $\forall \{U_i\}_{i \in I}, U_i \subset X, \forall i \in I$, s. t.

$$A \subset \bigcup_{i \in I} U_i$$

Then $\{U_i^c \cap A\}_{i \in I}$ 为 A 的闭子集族. Since

$$\bigcap_{i \in I} U_i^c \cap A = \emptyset$$

Then 根据条件, $\{U_i^c \cap A\}_{i \in I}$ 存在有限交为空集, 即 $\exists i_1, \dots, i_n \in I$, s. t.

$$\bigcap_{k=1}^n U_{i_k}^c \cap A = A \cap \left(\bigcup_{k=1}^n U_{i_k} \right)^c = \emptyset$$

Thus

$$A \subset \bigcup_{k=1}^n U_{i_k}$$

Therefore, $A \subset X$ is compact. □

1.6.2 度量空间紧致的等价刻画

下面我们将说明, 在度量空间中, 紧致性与自列紧性等价.

定理 1.6.2. [紧致 \Leftrightarrow 自列紧, 度量空间].

在度量空间 (X, ρ) 中,

$$A \subset X \text{ 紧致} \Leftrightarrow \text{自列紧}$$

证明.

\Rightarrow : 只需考虑 A 中无穷点集的情形. \forall 无穷点集 $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset A$, 不妨设 x_n 互异.

反证法. Assume $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset A$ 在 A 中无聚点, 则 $\forall x \in A, \exists U_x \subset X$, s. t.

$$U_x \cap \{x_n\}_{n=1}^\infty \subset \{x\} \quad (= \emptyset \text{ or } \{x\})$$

Since $A \subset \bigcup_{x \in A} U_x$, A is compact, then $\exists y_1, \dots, y_n \in A$, s. t.

$$\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset A \subset \bigcup_{i=1}^n U_{y_i}$$

从而 $\{U_{y_i}\}_{i=1}^n$ 中至少有一项中包含 $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ 中无穷多项, 这与 $U_x \cap \{x_n\}_{n=1}^\infty \subset \{x\}$ 矛盾.

综上, $A \subset X$ 紧致 \Rightarrow 自列紧.

\Leftarrow : 反证法. 假设 $\exists A$ 的一个开覆盖 $\{U_a\}_{a \in \Lambda}$ 不存在有限子覆盖.

Since A 自列紧 \Rightarrow 列紧 \Rightarrow 完全有界 (**Thm 1.4.1**), then for \forall fixed $n \in \mathbb{N}$,

A 存在有穷 $\frac{1}{n}$ -网, i.e. $\exists M_n$ finite, s. t.

$$A \subset \bigcup_{x \in M_n} B(x, \frac{1}{n})$$

Then for the fixed $n, \exists x_n \in M_n$, s. t. $B(x_n, \frac{1}{n})$ 不能被 $\{U_a\}_{a \in \Lambda}$ 有限覆盖.

(否则若 $\forall x \in M_n, B(x, \frac{1}{n})$ 均可被 $\{U_a\}_{a \in \Lambda}$ 有限覆盖, 则 $A \subset \bigcup_{x \in M_n} B(x, \frac{1}{n})$ 可被 $\{U_a\}_{a \in \Lambda}$ 有限覆盖. 矛盾)

Then we get a sequence $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset A$ in A .

Since A 自列紧, then \exists subsequence $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty \subset \{x_n\}_{n=1}^\infty$, s. t.

$$x_{n_k} \rightarrow x_0 \in A \text{ as } k \rightarrow \infty$$

Since $\{U_a\}_{a \in \Lambda}$ covers A , then $\exists a_0 \in \Lambda$, s. t. $x_0 \in U_{a_0}$.

Since U_{a_0} is open, then $\exists \epsilon > 0$, s. t. $B(x_0, \epsilon) \subset U_{a_0}$.

However, since $x_{n_k} \rightarrow x_0$, for $\epsilon > 0$, $\exists k_0 \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\rho(x_{n_{k_0}}, x_0) < \frac{\epsilon}{3} \text{ and } \frac{1}{n_{k_0}} < \frac{\epsilon}{3}$$

Then $B(x_{n_{k_0}}, \frac{1}{n_{k_0}}) \subset U_{a_0}$, 于是 $B(x_{n_{k_0}}, \frac{1}{n_{k_0}})$ 被 $\{U_a\}_{a \in \Lambda}$ 有限覆盖, 矛盾.
综上, A 自列紧 \Rightarrow compact.

□

1.7 一致有界, 等度连续

为了给出上 $C[a, b]$ (列) 紧集的刻画, 即下节介绍的 **Arzelà-Ascoli** 定理, 本节来给出一些前置概念.

1.7.1 紧致度量空间上的连续函数全体

首先来给出紧致度量空间 X 上的连续函数全体 $C(X)$, 并赋予相应的度量 (无穷范数), 使其称为完备度量空间.

定义 1.7.1. 设 (X, ρ) 为紧致度量空间, 其上的连续函数全体 $C(X)$ 被定义为:

$$C(X) := \{f : X \rightarrow \mathbb{K} \mid f \text{ continuous}\}, \mathbb{K} \in \{\mathbb{C}, \mathbb{R}\} \quad (1.94)$$

赋予 $C(X)$ 上度量 d , 定义为:

$$d : C(X) \times C(X) \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \quad (1.95)$$

$$(f, g) \mapsto \max_{x \in X} |f(x) - g(x)| \quad (1.96)$$

注. • 不难证明上述定义的度量 d 满足度量的三大公理 (**Def 1.1.2**). 关于其定义是否良好 (**Well-defined**) 的问题, 只需说明对于 $\forall f, g \in C(X)$, $d(f, g)$ 的存在性:

- **证明.** 不难证明 $C(X)$ 为线性空间, 于是对于 $\forall f, g \in C(X)$, $f - g \in C(X)$. 根据绝对值不等式, 容易得到绝对值保持 $C(X)$ 中函数的连续性.

$$\left| |\varphi(x)| - |\varphi(y)| \right| \leq |\varphi(x) - \varphi(y)|, \quad \forall \varphi \in C(X), x, y \in X$$

因此 $|f - g| \in C(X)$, 即连续.

Since X is compact, then $|f - g|(X) \subset \mathbb{R}_{\geq 0}$ compact, 可取到最大值. 故 $d(f, g)$ 存在. \square

- 事实上, 上述定义的度量空间 $(C(X), d)$ 是完备的, 这在下面的**命题 1.7.1** 中得以证明.

下面的命题证明了, 定义 1.7.1 中定义的度量空间 $(C(X), d)$ 是完备的.

命题 1.7.1. $(C(X), d)$ 为完备度量空间.

证明. \forall Cauchy sequence $\{f_n\}_{n=1}^\infty \subset C(X)$, i.e. $\forall \epsilon > 0, \exists N_\epsilon \in \mathbb{N}$, s. t.

$$d(f_m, f_n) = \max_{x \in X} |f_m(x) - f_n(x)| < \epsilon, \quad \forall m, n \geq N_\epsilon$$

下面分两步进行证明:

1. $\exists f : X \longrightarrow \mathbb{K}$, s. t. $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$, $\forall x \in X$:

Since $\max_{x \in X} |f_m(x) - f_n(x)| < \epsilon$, $\forall m, n \geq N_\epsilon$, then

$$|f_m(x) - f_n(x)| < \epsilon, \quad \forall x \in X, \quad \forall m, n \geq N_\epsilon$$

Thus $\forall x \in X$, fix x . $\{f_n(x)\}_{n=1}^\infty \subset \mathbb{K}$ is a Cauchy sequence in \mathbb{K} .

Since both \mathbb{C} and \mathbb{R} are complete, then $\{f_n(x)\}_{n=1}^\infty$ converges, $\forall x \in X$. Let

$$f : X \longrightarrow \mathbb{K} \tag{1.97}$$

$$x \longmapsto \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \tag{1.98}$$

Then f is a mapping from X to \mathbb{K} with $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$, $\forall x \in X$.

2. $f \in C(X)$, i.e. $f : X \longrightarrow \mathbb{K}$ continuous:

Since

$$|f_m(x) - f_n(x)| < \epsilon, \quad \forall x \in X, \quad \forall m, n \geq N_\epsilon$$

Then letting $m \rightarrow \infty$, we get $f_n \Rightarrow f$, i.e.

$$|f(x) - f_n(x)| < \epsilon, \quad \forall x \in X, \quad \forall n \geq N_\epsilon$$

For $f_{N_\epsilon} \in C(X)$, fix $\epsilon > 0$. Since f_{N_ϵ} continuous, $\exists \delta > 0$, s. t.

$$|f_{N_\epsilon}(x) - f_{N_\epsilon}(y)| < \epsilon, \quad \forall \rho(x, y) < \delta$$

Then for $\epsilon > 0, \exists \delta > 0, N_\epsilon \in \mathbb{N}$, s. t.

$$|f(x) - f(y)| \leq |f(x) - f_{N_\epsilon}(x)| + |f_{N_\epsilon}(x) - f_{N_\epsilon}(y)| + |f_{N_\epsilon}(y) - f(y)| \tag{1.99}$$

$$< 3\epsilon, \quad \forall \rho(x, y) < \delta \tag{1.100}$$

Therefore, $f : X \longrightarrow \mathbb{K}$ is continuous, $f \in C(X)$. In short, $(C(X), d)$ is complete.

□

1.7.2 一致有界, 等度连续

下面我们来给出一致有界与等度连续的概念, 实际上为数学分析中一致有界与一致连续在更高维度上的一致性的推广, 即同时对函数和自变量都一致.

定义 1.7.2. [一致有界].

设 (X, ρ) 为紧致度量空间, $A \subset (C(X), d)$. 若

$$\sup_{\substack{x \in X \\ \varphi \in A}} |\varphi(x)| < \infty$$

则称 A 一致有界.

定义 1.7.3. [等度连续].

设 (X, ρ) 为紧致度量空间, $A \subset (C(X), d)$. 若 $\forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0, \text{ s. t. }$

$$|\varphi(x) - \varphi(y)| < \epsilon, \quad \forall \rho(x, y) < \delta, \quad \forall \varphi \in A$$

则称 A 等度连续.

注. 相当于在数学分析函数一致连续的概念上增加了对 A 中所有函数的一致性.

1.8 Arzelà-Ascoli 定理

接下来我们将介绍 **Arzelà-Ascoli** 定理, 它给出了紧致度量空间 X 上连续函数全体 $(C(X), d)$ 的 (列) 紧子集的等价刻画.

定理 1.8.1. [Arzelà-Ascoli].

设 (X, ρ) 为紧致度量空间, $A \subset C(X)$, 则:

$$A \text{ 列紧} \Leftrightarrow A \text{ 一致有界且等度连续}$$

证明.

\Rightarrow : 下面分两点分别证明一致有界和等度连续.

- A 一致有界: Since A 列紧 \Rightarrow 完全有界, then for $\epsilon = 1$, $\exists \varphi_1, \dots, \varphi_n \in A$, s. t.

$$A \subset \bigcup_{i=1}^n B(\varphi_i, 1)$$

$$\forall \varphi \in A, \text{ WTS: } \exists M > 0, \text{ s. t. } |\varphi(x)| \leq M, \forall x \in X.$$

$$\exists 1 \leq i_0 \leq n, \text{ s. t.}$$

$$\varphi \in B(\varphi_{i_0}, 1)$$

Then

$$d(\varphi, \varphi_{i_0}) = \max_{x \in X} |\varphi(x) - \varphi_{i_0}(x)| < 1$$

Thus

$$|\varphi(x) - \varphi_{i_0}(x)| < 1, \forall x \in X$$

Fix $1 \leq i \leq n$. For $\varphi_i \in A \subset C(X)$.

Since X is compact, φ_i continuous, then $\varphi_i(X) \subset \mathbb{K}$ bounded, i.e. $\exists 0 < k_i < \infty$, s. t.

$$|\varphi_i(x)| \leq k_i, \forall x \in X$$

Let $k = \max_{1 \leq i \leq n} \{k_i\}$, then

$$|\varphi(x)| \leq |\varphi(x) - \varphi_{i_0}(x)| + |\varphi_{i_0}(x)| \tag{1.101}$$

$$\leq 1 + k, \forall x \in X, \forall \varphi \in A \tag{1.102}$$

Therefore, $A \subset C(X)$ 一致有界.

- A 等度连续: Since A 列紧 \Rightarrow 完全有界, then for $\forall \epsilon > 0$, A 存在有穷 ϵ -网, i.e.

$$\exists \varphi_1^\epsilon, \dots, \varphi_{i_\epsilon}^\epsilon \in A, \text{ s. t.}$$

$$A \subset \bigcup_{i=1}^{i_\epsilon} B(\varphi_i^\epsilon, \epsilon)$$

Since $\varphi_i \in C(X)$ continuous, $\forall 1 \leq i \leq i_\epsilon$, then for $\epsilon > 0$, $\exists \delta_1^\epsilon, \dots, \delta_{i_\epsilon}^\epsilon > 0$, s. t.

$$|\varphi_k^\epsilon(x) - \varphi_k^\epsilon(y)| < \epsilon, \quad \forall \rho(x, y) < \delta_k^\epsilon, \quad \forall 1 \leq k \leq i_\epsilon$$

Let $\delta_\epsilon = \min\{\delta_1^\epsilon, \dots, \delta_{i_\epsilon}^\epsilon\} > 0$, then for $\forall 1 \leq k \leq i_\epsilon$,

$$|\varphi_k^\epsilon(x) - \varphi_k^\epsilon(y)| < \epsilon, \quad \forall \rho(x, y) < \delta_\epsilon$$

$\forall \psi \in A$, $\exists 1 \leq i_0 \leq i_\epsilon$, s. t.

$$\psi \in B(\varphi_{i_0}^\epsilon, \epsilon) \Rightarrow d(\psi, \varphi_{i_0}^\epsilon) < \epsilon$$

Thus

$$|\psi(x) - \varphi_{i_0}^\epsilon(x)| < \epsilon, \quad \forall x \in X$$

Then

$$|\psi(x) - \psi(y)| \leq |\psi(x) - \varphi_{i_0}^\epsilon(x)| + |\varphi_{i_0}^\epsilon(x) - \varphi_{i_0}^\epsilon(y)| + |\varphi_{i_0}^\epsilon(y) - \psi(y)| \quad (1.103)$$

$$\leq 3\epsilon, \quad \forall \rho(x, y) < \delta_\epsilon \quad (1.104)$$

Therefore, $A \subset C(X)$ 等度连续.

\Leftarrow : Since A 等度连续, then for $\forall \epsilon > 0$, $\exists \delta > 0$, s. t.

$$|\varphi(x) - \varphi(y)| < \frac{\epsilon}{3}, \quad \forall \rho(x, y) < \delta, \quad \forall \varphi \in A$$

Since X is compact, then X 存在有穷 δ -网, i.e. $\exists \{x_1^\delta, \dots, x_n^\delta\} \subset X$, s. t.

$$X \subset \bigcup_{i=1}^n B(x_i^\delta, \delta)$$

Let

$$\widetilde{A} = \left\{ \left(\varphi(x_1^\delta), \dots, \varphi(x_n^\delta) \right) \in \mathbb{K}^n \mid \varphi \in A \right\}$$

and denote

$$\widetilde{\varphi}: X^n \longrightarrow \mathbb{K}^n \quad (1.105)$$

$$x^\delta \longmapsto (\varphi(x_1^\delta), \dots, \varphi(x_n^\delta)) \in \mathbb{K}^n \quad (1.106)$$

Then $\widetilde{A} = \{\widetilde{\varphi}(x^\delta) \in \mathbb{K}^n \mid \varphi \in A\}$.

Since A 一致有界, i.e.

$$|\varphi(x)| \leq M, \quad \forall x \in X, \quad \forall \varphi \in A \text{ for some } M > 0$$

$$\Rightarrow \widetilde{A} \subset \mathbb{K}^n \text{ is bounded in } \mathbb{K}^n$$

Since both in \mathbb{R}^n and \mathbb{C}^n , 有界 \Leftrightarrow 列紧 \Leftrightarrow 完全有界, then \widetilde{A} 完全有界.

Thus \widetilde{A} 存在有穷 δ -网, i.e. $\exists \{\widetilde{\varphi}_1(x^\delta), \dots, \widetilde{\varphi}_m(x^\delta)\} \subset \widetilde{A}$, s. t.

$$\widetilde{A} \subset \bigcup_{i=1}^m B(\widetilde{\varphi}_i(x^\delta), \frac{\epsilon}{3})$$

下面证明: $\{\varphi_1, \dots, \varphi_m\}$ 即为 A 的有穷 ϵ -网:

$$\forall \varphi \in A, \exists 1 \leq i_0 \leq m, \text{ s. t.}$$

$$\widetilde{\varphi}(x^\delta) \subset B(\widetilde{\varphi}_{i_0}(x^\delta), \frac{\epsilon}{3})$$

$\forall x \in X$, fix x . Since $\{x_1^\delta, \dots, x_n^\delta\}$ 为 X 的 δ -网, then $\exists 1 \leq j_0 \leq n$, s. t.

$$\rho(x, x_{j_0}^\delta) < \delta$$

Then by A 等度连续,

$$|\varphi(x) - \varphi_{i_0}(x)| \leq |\varphi(x) - \varphi(x_{j_0}^\delta)| + |\varphi(x_{j_0}^\delta) - \varphi_{i_0}(x_{j_0}^\delta)| + |\varphi_{i_0}(x_{j_0}^\delta) - \varphi_{i_0}(x)| \quad (1.107)$$

$$< \frac{\epsilon}{3} + |\varphi(x_{j_0}^\delta) - \varphi_{i_0}(x_{j_0}^\delta)| + \frac{\epsilon}{3} \quad (1.108)$$

$$< \frac{2}{3}\epsilon + |\widetilde{\varphi}(x^\delta) - \widetilde{\varphi}_{i_0}(x^\delta)| \quad (1.109)$$

$$< \epsilon, \quad \forall x \in X \quad (1.110)$$

Thus,

$$d(\varphi, \varphi_{i_0}) = \max_{x \in X} |\varphi(x) - \varphi_{i_0}(x)| < \epsilon$$

i.e.

$$\varphi \in B(\varphi_{i_0}, \epsilon)$$

Therefore, A 完全有界 \Leftrightarrow 列紧.

□

1.9 Banach 不动点定理

1.9.1 Banach 不动点定理 / 压缩映射原理

在数学分析中我们事实上已经接触过 **Banach** 不动点定理 (压缩映射原理), 此处给出其在完备度量空间上的推广. 首先来回顾一下压缩映射的概念.

定义 1.9.1. Suppose (X, ρ) be a metric space, $T : X \longrightarrow X$. If $\exists 0 < L < 1$, s. t.

$$\rho(Tx, Ty) \leq L \rho(x, y), \quad \forall x, y \in X$$

Then 称 T 为度量空间 (X, ρ) 上的一个 压缩映射.

下面我们来给出 **Banach** 不动点定理.

定理 1.9.1. [Banach 不动点定理 / 压缩映射原理].

若度量空间 (X, ρ) 完备, 则 X 到自身的压缩映射 T 必存在唯一不动点.

证明. 证明是 Trivial 的. 下面分两步, 先证明存在性, 再证明唯一性.

- 压缩映射 $T : X \longrightarrow X$ 存在不动点: $\forall x \in X$, consider the sequence $\{T^n(x)\}_{n=1}^\infty$.

Since T 为压缩映射, then $\exists 0 < L < 1$, s. t.

$$\rho(Tx, Ty) \leq L \rho(x, y), \quad \forall x, y \in X$$

Thus for $\forall \epsilon > 0$, $\exists N_\epsilon \in \mathbb{N}$, s. t. $L^n < \epsilon$, $\forall n > N_\epsilon$. Then

$$\rho(T^{n+p}(x), T^n(x)) \leq L^n \rho(T^p(x), x) \tag{1.111}$$

$$\leq L^n [\rho(T^p(x), T^{p-1}(x)) + \cdots + \rho(T(x), x)] \tag{1.112}$$

$$\leq L^n (L^{p-1} + \cdots + L + 1) \rho(T(x), x) \tag{1.113}$$

$$\leq \frac{L^n}{1-L} \rho(T(x), x) \leq \frac{\rho(T(x), x)}{1-L} \epsilon, \quad \forall n > N_\epsilon, \quad \forall p \in \mathbb{N} \tag{1.114}$$

Thus $\{T^n(x)\}_{n=1}^\infty \subset X$ is a Cauchy sequence in X .

Since X is complete, then $\{T^n(x)\}_{n=1}^\infty$ converges. Let $T^n(x) \rightarrow x_0 \in X$,

Then 根据 $T^{n+1}(x) = T(T^n(x))$, letting $n \rightarrow \infty$, we get $T(x_0) = x_0$. $x_0 \in X$ 即为 T 的不动点.

- $T : X \longrightarrow X$ 的不动点唯一: Assume $x_0, y_0 \in X$ 均为 T 的不动点, then

$$T^n(x_0) = x_0, T^n(y_0) = y_0, \forall n \in \mathbb{N}$$

Thus

$$\rho(x_0, y_0) = \rho(T^n(x_0), T^n(y_0)) \leq L^n \rho(x_0, y_0), \forall n \in \mathbb{N}$$

Letting $n \rightarrow \infty$, we have $\rho(x_0, y_0) = 0$, i.e. $x_0 = y_0$.

□

根据定理 1.9.1, 我们可以得到一个有趣的推论.

推论 1.9.2. Suppose (X, ρ) be a complete metric space, $T : X \longrightarrow X$. 若 T^n 为压缩映射, 则 T 存在唯一不动点.

证明.

- 存在性: Since $T^n : X \longrightarrow X$ 为压缩映射, then by **Banach** 不动点定理 (Thm 1.9.1), $\exists x_0 \in X$, s. t.

$$T^n(x_0) = x_0$$

等式两边同时作用 T , 得到

$$T^n(T(x_0)) = T(x_0)$$

于是 $T(x_0) \in X$ 也为 T^n 的不动点. 根据不动点的唯一性 (Thm 1.9.1), 可得

$$T(x_0) = x_0$$

于是 $x_0 \in X$ 也为 T 的不动点.

- 唯一性: 设 $y_0 \in X$ 也为 T 的不动点, 即 $y_0 = T(y_0)$, 则归纳可得:

$$y_0 = T(y_0) = T^k(y_0), \forall k \in \mathbb{N}$$

取 $k = n + 1$, 得到: $T(y_0) = T^n(T(y_0))$, 于是 $T(y_0) = y_0$ 为 T^n 的不动点.

根据 T^n 不动点唯一性, 可得:

$$T(y_0) = y_0 = x_0$$

□

1.9.2 Volterra 方程

这一小节我们将回顾常微分方程 (ODE) 课程中最常见的 **Volterra** 方程, 并运用 **Banach** 不动点定理 (压缩映射原理) 及其推论来证明其解的存在唯一性.

例 1.9.1. [Volterra 方程解的存在唯一性].

证明: 积分方程

$$x(t) = f(t) + \lambda \int_a^t k(t, s)x(s) ds$$

在 $C[a, b]$ 中存在唯一解, 其中 $f \in C[a, b]$, $k \in C[a, b]^2$ 给定, $\lambda \in \mathbb{R}$ 是任意的.

证明. Let

$$T : C[a, b] \longrightarrow C[a, b] \quad (1.115)$$

$$x \longmapsto Tx : t \longmapsto f(t) + \lambda \int_a^t k(t, s)x(s) ds \quad (1.116)$$

Then T 为良定义的算子. 我们考虑使用 **推论 1.9.2** 来证明, 其关键就在于该如何计算 T^n , 即

要证: T 存在唯一不动点

只需证: $\exists n \in \mathbb{N}$, s. t. T^n 为压缩映射

不难发现, $\forall x \in C[a, b]$ 在经过算子 T^n 作用后, 得到的结果中, f 与 x 是不相关的, 于是可写为如下形式:

$$T^n(x) = S_n(f) + R_n(x)$$

于是

$$T^n(x) - T^n(y) = R_n(x) - R_n(y)$$

由于

$$R_n(x) = \lambda^n \int_a^t \int_a^{t_n} \cdots \int_a^{t_2} k(t, t_n)k(t_n, t_{n-1}) \cdots k(t_2, t_1)x(t_1) dt_1 dt_2 \cdots dt_n$$

于是

$$d(T^n(x), T^n(y)) = \|T^n(x) - T^n(y)\|_\infty \quad (1.117)$$

$$= |\lambda|^n \left\| \int_a^t \cdots \int_a^{t_2} k(t, t_n)k(t_n, t_{n-1}) \cdots k(t_2, t_1)x(t_1) dt_1 dt_2 \cdots dt_n \right\|_\infty \quad (1.118)$$

$$\leq |\lambda|^n \|k\|_\infty^n \|x - y\|_\infty \left| \int_a^t \cdots \int_a^{t_2} dt_1 dt_2 \cdots dt_n \right| \quad (1.119)$$

$$\leq |\lambda|^n \|k\|_\infty^n \|x - y\|_\infty \frac{(t-a)^n}{n!} \quad (1.120)$$

$$\leq |\lambda|^n \|k\|_\infty^n \|x - y\|_\infty \frac{(b-a)^n}{n!} \rightarrow 0 \text{ as } n \rightarrow \infty \quad (1.121)$$

Thus $\exists N \in \mathbb{N}$, s. t. T^N 为压缩映射, 从而 T 存在唯一不动点, 即方程在 $C[a, b]$ 上存在唯一解. \square

第二章 赋范空间

2.1 赋范线性空间

2.1.1 赋范线性空间

这一章我们将来讨论赋范线性空间的相关定义及性质. 首先回顾范数的定义 (同定义 1.1.1).

定义 2.1.1. Let X be a vector space over field \mathbb{K} , a **norm** is a function:

$$X \longrightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \quad (2.1)$$

$$f \longmapsto \|f\| \quad (2.2)$$

satisfying the following properties:

- (i) $\|f\| \geq 0, \forall f \in X. \quad (\|f\| = 0 \Leftrightarrow f = 0)$
- (ii) $\|af\| = |a| \|f\|, \forall a \in \mathbb{K}, f \in X.$
- (iii) $\|f + g\| \leq \|f\| + \|g\|, \forall f, g \in X.$

注. • 事实上赋范线性空间的称呼有些许不妥, 应直接称赋范空间. 因为范数的概念本就需要在线性空间上定义.

(否则范数定义第 (iii) 条 “三角不等式” 中 “ $f + g$ ” 的加法无从定义)

- 赋范空间与度量空间的关系为:

赋范空间 \Rightarrow 度量空间, 度量空间 \Rightarrow 赋范空间

即赋范空间上均可定义度量, 但度量空间却不一定能扩充为赋范空间.

其中对于任意赋范空间 $(X, \|\cdot\|)$, 其上总是默认定义如下度量 d :

$$d(x, y) = \|x - y\|, \forall x, y \in X$$

不难证明其满足度量的三条公理 (Def 1.1.2)

- 此处讨论的赋范空间的范数应当为定义在数域 \mathbb{K} 上的线性空间之上, 否则第 (ii) 条 “绝对齐性” 中 “a” 的绝对值无从定义. 且默认取完备的数域, 即 $\mathbb{K} \in \{\mathbb{C}, \mathbb{R}\}$.

- 对于 “度量空间 \Rightarrow 赋范空间”, 先来明确度量空间 (X, ρ) 要扩充为赋范空间所需条件:

1. 引入数域 \mathbb{K} , 在 X 中定义加法 & 数乘运算, 使其满足线性空间八大公理. 即度量 ρ 需要先定义在线性空间上, 使其称为度量线性空间.

2. 度量 ρ 需要满足平移不变性, 即

$$\rho(x, 0) = \rho(x + y, y), \quad \forall x, y \in X$$

3. 对应范数定义的绝对齐性, 度量 ρ 也需要满足

$$\rho(ax, 0) = |a|\rho(x, 0), \quad \forall x \in X, a \in \mathbb{K}$$

而即便是对于度量线性空间, 大多数也并不满足后两者条件, 下面给出一个反例.

例 2.1.1. 在欧氏空间 \mathbb{R} 中定义度量 ρ :

$$\rho(x, y) = \frac{|x - y|}{1 + |x - y|}, \quad \forall x, y \in \mathbb{R}$$

则 ρ 不满足绝对齐性, 从而无法扩充为赋范空间.

- 对于任意赋范空间 $(X, \|\cdot\|)$, 其上定义的范数 $\|\cdot\|$ 均为连续函数.

– **证明.** 下面分两步进行证明, 首先证明一条引理.

1. $\forall x, y \in X, \left| \|x\| - \|y\| \right| \leq \|x - y\|$:

根据范数的三角不等式, $\forall x, y \in X$,

$$\|x\| \leq \|x - y\| + \|y\|$$

$$\|y\| \leq \|y - x\| + \|x\| = \|x - y\| + \|x\|$$

移项后可得: $\left| \|x\| - \|y\| \right| \leq \|x - y\|$.

2. $\|\cdot\|$ 连续: $\forall \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset X$ with $x_n \rightarrow x \in X$. Since

$$\left| \|x_n\| - \|x\| \right| \leq \|x_n - x\|$$

Thus $\|x_n\| \rightarrow \|x\|$, 即 $\|\cdot\|$ 连续.

□

2.1.2 Banach 空间

下面给出 **Banach** 空间的定义.

定义 2.1.2. 完备的 B^* 空间称为 B 空间 / Banach 空间.

注. • 我们称赋范空间为 B^* 空间.

- 若 X 为赋范空间, 我们记 $X \in B^*$; 若 X 为 **Banach** 空间, 我们记 $X \in B$.

Banach 空间事实上十分常见, 下面给出两个经典的例子. 首先便是连续函数构成的空间.

例 2.1.2. [**Banach** 空间]. $(C[a, b], \|\cdot\|_\infty)$ 即为 Banach 空间, 其中 $\|\cdot\|_\infty = \max_{[a,b]} |\cdot|$.

证明. 根据命题 1.7.1 即可得证. □

下面我们来证明实分析中的 L^p 空间为 Banach 空间, 即实分析中的 **Riesz-Fisher** 定理¹.

定理 2.1.1. [**Riesz-Fisher** 定理].

$(L^p[a, b], \|\cdot\|_p)$ 为 Banach 空间, 其中 $\|\cdot\|_p = \left(\int_{[a,b]} |\cdot|^p\right)^{\frac{1}{p}}$.

证明. 根据 **Minkowski** 不等式 (定理 1.1.4), 不难证明 $(L^p[a, b], \|\cdot\|_p)$ 为赋范空间.

下面证明其完备性:

\forall Cauchy sequence $\{f_n\}_{n=1}^\infty \subset L^p[a, b]$. i.e. $\forall \epsilon > 0, \exists N_\epsilon \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\|f_m - f_n\|_p \leq \epsilon, \quad \forall m, n \geq N_\epsilon$$

¹详情可见 **Real Analysis – Folland, P183 Theorem 6.6**.

For $\epsilon = \frac{1}{2}$, $\exists n_1 \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\|f_m - f_n\|_p \leq \frac{1}{2}, \quad \forall m, n \geq n_1$$

For $\epsilon = \frac{1}{4}$, $\exists n_2 > n_1$, s. t.

$$\|f_m - f_n\|_p \leq \frac{1}{4}, \quad \forall m, n \geq n_2$$

...

Then we get a subsequence $\{f_{n_k}\}_{k=1}^{\infty} \subset \{f_n\}_{n=1}^{\infty}$, s. t.

$$\|f_{n_k} - f_{n_{k+1}}\|_p \leq \frac{1}{2^k}, \quad \forall k \in \mathbb{N}$$

Since $\{f_n\}_{n=1}^{\infty} \subset L^p[a, b]$ is a Cauchy sequence, thus

要证: $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ 收敛.

只需证: $\{f_{n_k}\}_{k=1}^{\infty} \subset \{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ 收敛. Let

$$g_m(x) = \sum_{k=1}^m |f_{n_{k+1}} - f_{n_k}|(x), \quad \forall m \in \mathbb{N}, x \in [a, b]$$

Then $g_m \in L^p$, $g_m \geq 0$ and $g_m \leq g_{m+1}$ 单调递增, and

$$g_m(x) \leq \sum_{k=1}^m \frac{1}{2^k} \leq 1, \quad \forall m \in \mathbb{N}$$

记

$$g(x) = \lim_{m \rightarrow \infty} g_m(x) = \sum_{k=1}^{\infty} |f_{n_{k+1}} - f_{n_k}|(x) \leq 1$$

Then $g_m^p \in L^1$, $g_m^p \geq 0$, $g_m^p \leq g_{m+1}^p$. By **MCT** (单调收敛定理)²,

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \int_{[a,b]} g_m^p(x) d\mu = \int_{[a,b]} \lim_{m \rightarrow \infty} g_m^p(x) d\mu$$

Thus

$$\left(\int_{[a,b]} |g(x)|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} = \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\int_{[a,b]} |g_m(x)|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2.3)$$

$$\leq \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\int_{[a,b]} 1 d\mu \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2.4)$$

$$= (b-a)^{\frac{1}{p}} < \infty \quad (2.5)$$

²Monotone Convergence Theorem, 详见 *Real Analysis* 笔记 定理 3.1.2 & 定理 3.1.4.

i.e. $\|g\|_p \leq (b-a)^{\frac{1}{p}} < \infty$, then $g \in L^p$. 故 $g_m \xrightarrow{a.e.} g \in L^p$.

由于 $\sum_{k=1}^m |f_{n_{k+1}} - f_{n_k}|(x)$ 与 $f_{n_k}(x)$ 有相同的收敛性, 因此 $\exists f \in L^p$, s. t.

$$f_{n_k} \xrightarrow{a.e.} f \text{ as } k \rightarrow \infty$$

下面来证明 f_{n_k} 在 p -范数 $\|\cdot\|_p$ 意义下收敛于 f :

考虑函数列 $\{|f_{n_k} - f|\}_{k=1}^\infty \subset L^p$. Since

$$|f_{n_k} - f| = \sum_{j=k}^{\infty} |f_{n_{j+1}} - f_{n_j}| = g - g_{k-1} \leq 2g \quad (2.6)$$

Thus 函数列 $\{|f_{n_k} - f|\}_{k=1}^\infty$ 被可积函数 $2g \in L^p$ 所控制.

$\Rightarrow \{|f_{n_k} - f|^p\}_{k=1}^\infty \subset L^1$ 可被 $(2g)^p \in L^1$ 所控制. 根据 **DCT** (控制收敛定理)³,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int_{[a,b]} |f_{n_k} - f|^p d\mu = \int_{[a,b]} \lim_{k \rightarrow \infty} |f_{n_k} - f|^p d\mu = 0 \quad (2.7)$$

i.e. $\|f_{n_k} - f\|_p \rightarrow 0$ as $k \rightarrow \infty$. 故 $\{f_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ 收敛, 从而 $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ 收敛, L^p complete. \square

³**Dominated Convergence Theorem**, 详见 *Real Analysis* 笔记 **Thm 3.1.7**.

2.1.3 绝对收敛

回顾数学分析中级数绝对收敛的概念, 下面将其拓展到一般的赋范空间 (B^* 空间) 中.

定义 2.1.3. 对于 B^* 空间 $(X, \|\cdot\|)$ 中的无穷级数 $\sum x_n$, 若 $\sum \|x_n\|$ 收敛, 则称 $\sum x_n$ 绝对收敛.

注. • 此处对于 $x_n \in X$, 部分和 $\sum x_n$ 有定义的来源为 B^* 空间均为线性空间.

- 在欧氏空间中, 绝对收敛 \Rightarrow 收敛. 但对于一般的赋范空间 (B^* 空间), 该结论不成立. 下面给出一个反例.

例 2.1.3. 考虑 \mathbb{R} 中的一个子空间 $([0, 1), |\cdot|)$. 取 $x_n = \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \in [0, 1)$, $n = 1, 2, \dots$.

Since

$$\sum_{n=1}^{\infty} |x_n| = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) = 1 < \infty$$

Thus $\sum_{n=1}^{\infty} |x_n|$ converges in \mathbb{R} . Then 无穷级数 $\sum_{n=1}^{\infty} x_n$ 绝对收敛. However,

$$\sum_{n=1}^{\infty} x_n = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) = 1 \notin [0, 1)$$

Thus $\sum_{n=1}^{\infty} x_n$ 在 $[0, 1)$ 中不收敛.

下面的定理给出了 B^* 空间成为 B 空间的等价刻画, 即绝对收敛 \Rightarrow 收敛.

定理 2.1.2. [B^* 空间完备的等价刻画].

B^* 空间 $(X, \|\cdot\|)$ 完备 \Leftrightarrow 绝对收敛必收敛

证明.

\Rightarrow : $\forall \{x_n\}_{n=1}^\infty \subset X$ with $\sum_{n=1}^\infty \|x_n\| < \infty$. By 范数的三角不等式 (**Def 2.1.1**),

$$\left\| \sum_{n=1}^N x_n \right\| \leq \sum_{n=1}^N \|x_n\|, \quad \forall N \in \mathbb{N}$$

Letting $N \rightarrow \infty$, then

$$\left\| \sum_{n=1}^\infty x_n \right\| \leq \sum_{n=1}^\infty \|x_n\| < \infty$$

Thus $\sum_{n=1}^\infty x_n$ converges.

\Leftarrow : \forall Cauchy sequence $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset X$, i.e. $\forall \epsilon > 0, \exists N_\epsilon \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\rho(x_m, x_n) = \|x_m - x_n\| \leq \epsilon, \quad \forall m, n \geq N_\epsilon$$

For $\epsilon = \frac{1}{2}$, $\exists n_1 \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\|x_m - x_n\| \leq \frac{1}{2}, \quad \forall m, n \geq n_1$$

For $\epsilon = \frac{1}{4}$, $\exists n_2 > n_1$, s. t.

$$\|x_m - x_n\| \leq \frac{1}{4}, \quad \forall m, n \geq n_2$$

...

Thus we get a subsequence $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty \subset \{x_n\}_{n=1}^\infty$ with $\|x_{n_{k+1}} - x_{n_k}\| \leq \frac{1}{2^k}$.

WTS: $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ converges.

只需证: $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ converges. Since

$$\sum_{k=1}^\infty \|x_{n_{k+1}} - x_{n_k}\| \leq \sum_{k=1}^\infty \frac{1}{2^k} \leq 1 < \infty$$

Then $\sum_{k=1}^\infty x_{n_k}$ 绝对收敛 $\Rightarrow \sum_{k=1}^\infty x_{n_k}$ 收敛.

Since x_{n_k} 与 $\sum_{k=1}^\infty x_{n_k}$ 有相同收敛性 $\Rightarrow \{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ 收敛 $\Rightarrow \{x_n\}_{n=1}^\infty$ 收敛 $\Rightarrow (X, \|\cdot\|)$ complete.

□

2.2 有限维赋范空间

2.2.1 范数的比较

这一节我们来讨论一类特殊的赋范空间——有限维赋范空间的性质, 首先来给出同一线性空间上所定义的不同范数之间的比较.

定义 2.2.1. 在线性空间 X 上赋予两个范数 $\|\cdot\|_1$ 和 $\|\cdot\|_2$. 若 $\|\cdot\|_2$ 意义下收敛蕴含 $\|\cdot\|_1$ 意义下收敛, i.e. $\forall \{x_n\}_{n=1}^\infty \subset X, x_0 \in X$,

$$\|x_n - x_0\|_2 \rightarrow 0 \Rightarrow \|x_n - x_0\|_1 \rightarrow 0$$

则称 $\|\cdot\|_2$ 比 $\|\cdot\|_1$ 强.

注. 范数间的比较有等价刻画, 即

$$\|\cdot\|_2 \text{ 比 } \|\cdot\|_1 \text{ 强} \Leftrightarrow \exists C > 0, \text{ s. t. } \|\cdot\|_1 \leq C \|\cdot\|_2$$

此即下文的**命题 2.2.1**. 同时可得到两个范数等价的刻画, 即 (**推论 2.2.1**)

$$\|\cdot\|_2 \text{ 与 } \|\cdot\|_1 \text{ 等价} \Leftrightarrow \exists C_1, C_2 > 0, \text{ s. t. } C_1 \|\cdot\|_1 \leq \|\cdot\|_2 \leq C_2 \|\cdot\|_1$$

下面给出范数间比较的等价刻画.

命题 2.2.1. [范数比较等价刻画].

设 $\|\cdot\|_1$ 和 $\|\cdot\|_2$ 为线性空间 X 上定义的两个范数, 则

$$\|\cdot\|_2 \text{ 比 } \|\cdot\|_1 \text{ 强} \Leftrightarrow \exists C > 0, \text{ s. t. } \|\cdot\|_1 \leq C \|\cdot\|_2$$

证明.

\Leftarrow : Trivial.

\Rightarrow : 反证法. Assume for $\forall C > 0, \exists x \in X$, s. t. $\|x\|_1 > C\|x\|_2$.

Then for $\forall n \in \mathbb{N}, \exists x_n \in X$, s. t.

$$\|x_n\|_1 > n\|x_n\|_2, \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Thus

$$\frac{\|x_n\|_2}{\|x_n\|_1} = \left\| \frac{x_n}{\|x_n\|_1} \right\|_2 < \frac{1}{n}, \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Then $\left\{ \frac{x_n}{\|x_n\|_1} \right\}_{n=1}^{\infty}$ converges to 0 in $\|\cdot\|_2$. However,

$$\left\| \frac{x_n}{\|x_n\|_1} \right\|_1 = \frac{\|x_n\|_1}{\|x_n\|_1} = 1 \not\rightarrow 0$$

Thus $\left\{ \frac{x_n}{\|x_n\|_1} \right\}_{n=1}^{\infty}$ doesn't converge to 0 in $\|\cdot\|_1$, which is a contradiction to “ $\|\cdot\|_2$ 比 $\|\cdot\|_1$ 强”.

Therefore, $\exists C > 0$, s. t. $\|\cdot\|_1 \leq C\|\cdot\|_2$.

□

作为命题 2.2.1 的推论, 下面给出两个范数等价的刻画.

推论 2.2.1. [两个范数等价的刻画].

设 $\|\cdot\|_1$ 和 $\|\cdot\|_2$ 为线性空间 X 上定义的两个范数, 则

$$\|\cdot\|_2 \text{ 与 } \|\cdot\|_1 \text{ 等价} \Leftrightarrow \exists C_1, C_2 > 0, \text{ s. t. } C_1\|\cdot\|_1 \leq \|\cdot\|_2 \leq C_2\|\cdot\|_1$$

2.2.2 有限维 B^* 空间的范数

这一小节我们主要来讨论有限维 B^* 空间上范数的等价性, 并给出其推论.

定理 2.2.2. [有限维 B^* 空间范数的等价性].

设 $(X, \|\cdot\|) \in B^*$, $\dim X = n < \infty$, $\{e_1, \dots, e_n\} \subset X$ 为 X 的一组基, 则 $\exists C_1, C_2 > 0$, s. t.

$$C_1 \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2} \leq \|x\| \leq C_2 \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}, \quad \forall x \in X$$

其中 $x = \sum_{i=1}^n x_i e_i$, $x_i \in \mathbb{K}$.

注. 该定理说明了有限维线性空间 X 上任意两种范数均等价. 这是因为:

对于点列 $\{x_k\}_{k=1}^\infty \subset X$, $x_k = \sum_{i=1}^n x_i^k e_i \in X$, 其在 $\|\cdot\|$ 下的收敛性与 \mathbb{K}^n 中的点列 $\{\tilde{x}_k = (x_1^k, \dots, x_n^k)\}_{k=1}^\infty \subset \mathbb{K}^n$ 在欧式范数 $|\cdot|$ 意义下的收敛性一致, 即

$$\|x_k - x_0\| \rightarrow 0 \Leftrightarrow |\tilde{x}_k - \tilde{x}_0| \rightarrow 0$$

因此对于任意 X 上两种范数 $\|\cdot\|_1$ 与 $\|\cdot\|_2$,

$$\|x_k - x_0\|_1 \rightarrow 0 \Leftrightarrow |\tilde{x}_k - \tilde{x}_0| \rightarrow 0 \Leftrightarrow \|x_k - x_0\|_2 \rightarrow 0$$

这就说明了其等价性.

证明. 下面分别对两个不等式进行证明.

- 右侧不等式是显然的. $\forall x = \sum_{i=1}^n x_i e_i$, $x_i \in \mathbb{K}$. By **Triangle Inequality and linearity (Def 2.1.1)**

$$\|x\| = \left\| \sum_{i=1}^n x_i e_i \right\| \leq \sum_{i=1}^n \|x_i e_i\| = \sum_{i=1}^n |x_i| \cdot \|e_i\|$$

Then by **Cauchy-Schwarz's Inequality**,

$$\|x\| \leq \sum_{i=1}^n |x_i| \cdot \|e_i\| \leq \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^n \|e_i\|^2 \right)^{\frac{1}{2}} = C_2 \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}$$

- 要证明左侧不等式, 不妨先设 $x = \sum_{i=1}^n x_i e_i \neq 0$. Then

$$\frac{\|x\|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}} = \left\| \frac{x}{\sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}} \right\| = \left\| \sum_{k=1}^n \frac{x_k}{\sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}} e_k \right\|$$

Then

$$\left(\frac{x_1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}}, \dots, \frac{x_n}{\sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}} \right) \in \mathbb{S}^{n-1}$$

Let

$$f : \mathbb{S}^{n-1} \longrightarrow \mathbb{R}_{>0} \quad (2.8)$$

$$x \longmapsto \left\| \sum_{i=1}^n x_i e_i \right\| \quad (2.9)$$

where $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{S}^{n-1}$. 下面证明 $f \in C(\mathbb{S}^{n-1})$:

By the **Absolute Value Inequality**,

$$|f(x) - f(y)| = \left| \left\| \sum_{i=1}^n x_i e_i \right\| - \left\| \sum_{i=1}^n y_i e_i \right\| \right| \leq \left\| \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) e_i \right\|$$

Then by **Cauchy-Schwarz's Inequality**,

$$|f(x) - f(y)| \leq \left\| \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) e_i \right\| \leq \left(\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^n \|e_i\|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

$$= \left(\sum_{i=1}^n \|e_i\|^2 \right)^{\frac{1}{2}} |x - y| \quad (2.11)$$

$$= C |x - y|, \quad \forall x, y \in \mathbb{S}^{n-1} \quad (2.12)$$

Thus f is **Lipchitz continuous** on \mathbb{S}^{n-1} , specifically continuous.

Since \mathbb{S}^{n-1} is compact, $f \in C(\mathbb{S}^{n-1})$, then $f(\mathbb{S}^{n-1}) \subset \mathbb{R}$ is compact, i.e.

$$f(\mathbb{S}^{n-1}) = [m, M] \subset \mathbb{R}_{>0}$$

Take $C_1 = m > 0$, then

$$\frac{\|x\|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}} = f \left(\frac{x_1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}}, \dots, \frac{x_n}{\sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}} \right) \geq C_1 \quad (2.13)$$

i.e.

$$\|x\| \geq C_1 \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}, \quad \forall x = \sum_{i=1}^n x_i e_i \in X$$

□

下面给出该定理的一些直接推论. 首先是有限维 B^* 空间必完备.

推论 2.2.3. [有限维 B^* 空间的完备性].

任一有限维 B^* 空间 $(X, \|\cdot\|)$ 必为 B 空间 (完备).

证明. \forall Cauchy sequence $\{x_k\}_{k=1}^\infty \subset X$, $x_k = \sum_{i=1}^n x_i^k e_i$. By **Thm 2.2.2**, $\exists C_1, C_2 > 0$, s. t.

$$C_1 \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i^k - x_i^l|^2} \leq \|x_k - x_l\| \leq C_2 \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i^k - x_i^l|^2}, \quad \forall k, l \in \mathbb{N}$$

Therefore, $\{\tilde{x}_k = (x_1^k, \dots, x_n^k)\}_{k=1}^\infty \subset \mathbb{K}^n$ is also a Cauchy sequence in \mathbb{K}^n .

Since \mathbb{K}^n is complete, thus $\exists \tilde{x}_0 = (x_1^0, \dots, x_n^0) \in \mathbb{K}^n$, s. t.

$$|\tilde{x}_k - \tilde{x}_0| = \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i^k - x_i^0|^2} \rightarrow 0$$

Let $x_0 = \sum_{i=1}^n x_i^0 e_i \in X$, then by **Thm 2.2.2**,

$$\|x_k - x_0\| \leq C_2 \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i^k - x_i^0|^2} \rightarrow 0$$

Therefore, $\{x_k\}_{k=1}^\infty$ converges to $x_0 \in X$ in $\|\cdot\| \Rightarrow (X, \|\cdot\|)$ is complete, $X \in B$. □

下面的推论说明了有限维 B^* 空间中有界性与列紧性等价.

推论 2.2.4. [有限维 B^* 空间有界与列紧等价].

对于任一有限维 B^* 空间 $(X, \|\cdot\|)$, 有界 \Leftrightarrow 列紧.

证明. 与 **Cor 2.2.3** 同思路, 利用 **Thm 2.2.2** 范数等价性, 以及 \mathbb{K}^n 空间中有界 \Leftrightarrow 列紧,

$$A \subset X \text{ 有界} \Leftrightarrow \tilde{A} \subset \mathbb{K}^n \text{ 有界} \Leftrightarrow \tilde{A} \text{ 列紧} \Leftrightarrow A \text{ 列紧}$$

□

2.2.3 Riesz 引理

下一小节我们将给出赋范空间有限性的等价刻画, 在证明其之前, 先来给出一个非常重要的引理——**Riesz 引理**.

引理 2.2.5. [Riesz's Lemma].

设 $(X, \|\cdot\|) \in B^*$, $X_0 \subset X$ 为 X 的真闭子空间, 则 $\forall \epsilon > 0, \exists y \in X, \|y\| = 1$, s. t.

$$\text{dist}(y, X_0) \geq 1 - \epsilon$$

注. • 此处 $\text{dist}(y, X_0)$ 指点 y 与集合 X_0 的距离, 定义为

$$\text{dist}(y, X_0) = \inf_{x \in X_0} \|y - x\|$$

• 此处要求 $X_0 \subset X$ closed 的目的是保证

$$\text{dist}(y, X_0) > 0, \forall y \in X \setminus X_0$$

从而保证取点步骤的进行. 下面进行证明:

– 证明. 反证法. Assume $\exists y \in X \setminus X_0$, s. t. $\text{dist}(y, X_0) = \inf_{x \in X_0} \|y - x\| = 0$.

Then for $\forall \epsilon = \frac{1}{n} > 0, \exists x_n \in X_0$, s. t.

$$\|y - x_n\| \leq \frac{1}{n}, \forall n \in \mathbb{N}$$

Thus $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset X_0$ converges to $y \in X$ in $\|\cdot\|$. Since $X_0 \subset X$ is closed, then $y \in X_0$, contradiction. □

证明. Take $\forall y \in X \setminus X_0$, then $d = \text{dist}(y, X_0) > 0$. Since $d = \inf_{x \in X_0} \|y - x\|$, then for $\forall \epsilon > 0$, $\exists x_0 \in X_0$, s. t.

$$d \leq \|y - x_0\| \leq (1 + \epsilon)d$$

Let $y_0 = \frac{y - x_0}{\|y - x_0\|} \in X$, then $\|y_0\| = 1$. 下面证明 $y_0 \in X$ 即为所求点:

Since

$$\|y_0 - x\| = \left\| \frac{y - x_0}{\|y - x_0\|} - x \right\| = \frac{\|y - (x_0 + \|y - x_0\|x)\|}{\|y - x_0\|}, \quad \forall x \in X_0$$

Since $X_0 \subset X$ is a linear subspace, then

$$x_0 + \|y - x_0\|x \in X_0$$

Thus

$$\|y - (x_0 + \|y - x_0\|x)\| \geq \inf_{x \in X_0} \|y - x\| = d$$

Therefore,

$$\|y_0 - x\| = \frac{\|y - (x_0 + \|y - x_0\|x)\|}{\|y - x_0\|} \geq \frac{d}{\|y - x_0\|} \geq \frac{d}{(1 + \epsilon)d} \geq 1 - \epsilon, \quad \forall x \in X_0$$

i.e.

$$\text{dist}(y_0, X_0) = \inf_{x \in X_0} \|y_0 - x\| \geq 1 - \epsilon$$

□

2.2.4 赋范空间有限性的刻画

上一小节我们介绍了 **Riesz 引理 (Lemma 2.2.5)**, 它说明了对于任一 B^* 空间 X 中的真闭子空间 $X_0 \subset X$, 单位球面与其距离的下确界为 1. 这一小节我们将利用 **Riesz 引理**, 来给出有限维赋范空间的等价刻画, 即有限维当且仅当有界 \Leftrightarrow 列紧.

定理 2.2.6. [有限维赋范空间的等价刻画].

若 $(X, \|\cdot\|) \in B^*$ 的任意有界集均列紧, 则 $\dim(X) < \infty$.

注. 结合定理 2.2.2 及推论 2.2.4, 对于 $\forall (X, \|\cdot\|) \in B^*$,

$$X \text{ 中有界与列紧等价 } \Leftrightarrow \dim(X) < \infty$$

这就给出了 B^* 空间有限性的刻画.

证明. 反证法. Assume that $\dim(X) = \infty$. Take $0 \neq x \in X$. Let

$$e_1 = \frac{x}{\|x\|} \in X, X_1 = \text{span}\{e_1\} \subset X$$

Since $\dim(X) = \infty$, then $X_1 \subset X$ 为真子空间, 且为闭子空间 (线性子空间对运算封闭).

By **Riesz's Lemma (Lemma 2.2.5)**, for $\epsilon = \frac{1}{2}$, $\exists e_2 \in X, \|e_2\| = 1$, s. t.

$$\text{dist}(e_2, X_1) \geq \frac{1}{2}$$

Thus $\|e_2 - e_1\| \geq \frac{1}{2}$. Let $X_2 = \{e_1, e_2\} \subset X$ 真闭子空间.

Similarly, By **Riesz's Lemma (Lemma 2.2.5)**, $\exists e_3 \in X, \|e_3\| = 1$, s. t.

$$\|e_3 - e_1\| \geq \frac{1}{2} \text{ and } \|e_3 - e_2\| \geq \frac{1}{2}$$

...

Then we get a sequence $\{e_n\}_{n=1}^\infty \subset X, \|e_i\| = 1, \{e_n\}_{n=1}^\infty$ bounded and

$$\|e_i - e_j\| \geq \frac{1}{2}, \forall i \neq j$$

Thus $\{e_n\}_{n=1}^\infty$ has no convergent subsequence, which contradicts to “ X 中有界集均列紧”.

Therefore, $\dim(X) < \infty$. □

2.3 严格凸

这一节我们来介绍**严格凸**的概念, 这是对于赋范空间而言的一种性质, 注意与数学分析中接触过的集合、函数的凸性区别开来.

定义 2.3.1. Suppose $(X, \|\cdot\|) \in B^*$. If for $\forall x, y \in X, x \neq y, \|x\| = \|y\| = 1$, s. t.

$$\|ax + (1 - a)y\| < 1, \forall a \in (0, 1)$$

Then 称 X 是**严格凸**的.

注. 简单来说, **严格凸**意味着对于 X 中单位球面上任意两个不同的点 x, y , 他们之间连线上的点都在单位球的内部. 最简单直观的例子便是 $(\mathbb{R}^n, \|\cdot\|_2)$. 而 \mathbb{R}^n 中也可以举出如下满足**非严格凸**的反例范数.

例 2.3.1. 考虑 \mathbb{R}^2 中的 1-范数 $\|\cdot\|_1$, 即

$$\|x\|_1 = |x_1| + |x_2|, \forall x = (x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2$$

此时对于单位球面上任意两个不同的点 $x \neq y, \|x\|_1 = \|y\|_1 = 1$, 若 x, y 处于同一象限内, 不难得到其连线上的点均落在球面上, 故 $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$ 非严格凸.

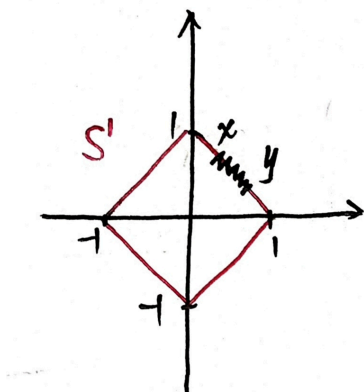


图 2.1: $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$ 非严格凸

$(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_1)$ 中的单位球面 S^1 为红线所示正方形)

下面给出**严格凸**的等价条件, 即范数三角不等式取等 \Leftrightarrow 两向量同向共线.

命题 2.3.1. [严格凸的等价条件].

Suppose $(X, \|\cdot\|) \in B^*$, then X 严格凸 \Leftrightarrow For $\forall x, y \neq 0$,

$$\|x + y\| = \|x\| + \|y\| \Leftrightarrow \exists \hat{\lambda} > 0, \text{ s. t. } x = \hat{\lambda}y$$

即 x 与 y 同向共线.

证明.

\Leftarrow : $\forall x, y \in X, x \neq y, \|x\| = \|y\| = 1$, 下证: $\|ax + (1 - a)y\| < 1, \forall a \in (0, 1)$:

Since $x \neq y, \|x\| = \|y\| = 1$, then x and y 不同向共线

(Otherwise if $x = \hat{\lambda}y, \hat{\lambda} > 0$, then $\|x\| = \|\hat{\lambda}y\| = \|y\| \Rightarrow \hat{\lambda} = 1$, 与 $x \neq y$ 矛盾)

Then ax 与 $(1 - a)y$ 也不同向共线, $\forall a \in (0, 1)$.

根据条件的逆否命题,

$$\|ax + (1 - a)y\| \neq a\|x\| + (1 - a)\|y\|, \forall a \in (0, 1)$$

Thus by the **triangle inequality (Def 2.1.1 (iii))**,

$$\|ax + (1 - a)y\| < a\|x\| + (1 - a)\|y\|, \forall a \in (0, 1)$$

Therefore, X 严格凸.

\Rightarrow : Suppose $x, y \neq 0, \|x + y\| = \|x\| + \|y\|$, 下证: x, y 同向共线:

Since $\|x + y\| = \|x\| + \|y\|$, then

$$\frac{\|x + y\|}{\|x\| + \|y\|} = \left\| \frac{x}{\|x\| + \|y\|} + \frac{y}{\|x\| + \|y\|} \right\| = 1$$

Since

$$\frac{x}{\|x\| + \|y\|} = \frac{x}{\|x\|} \cdot \frac{\|x\|}{\|x\| + \|y\|} = a \frac{x}{\|x\|}$$

where $a = \frac{\|x\|}{\|x\| + \|y\|} \in (0, 1)$. Similarly, we can get

$$\frac{y}{\|x\| + \|y\|} = (1 - a) \frac{y}{\|y\|}, \text{ where } a = \frac{\|x\|}{\|x\| + \|y\|}$$

Thus

$$\frac{\|x + y\|}{\|x\| + \|y\|} = \left\| a \frac{x}{\|x\|} + (1 - a) \frac{y}{\|y\|} \right\| = 1$$

而又因为 X 严格凸, $\left\| \frac{x}{\|x\|} \right\| = \left\| \frac{y}{\|y\|} \right\| = 1$, thus

$$\frac{x}{\|x\|} = \frac{y}{\|y\|} \Rightarrow x = \frac{\|x\|}{\|y\|} y$$

Therefore, x, y 同向共线.

□

下面我们给出有关严格凸的一个命题, 它给出了最佳逼近问题⁴的存在唯一性的理论依据.

命题 2.3.2. [最佳逼近问题解的存在唯一性].

Suppose $(X, \|\cdot\|) \in B^*$. If X 严格凸, $X_0 \subset X$ 为有限维子空间, then for $\forall x \in X, \exists$ 唯一的 $x_0 \in X_0$, s. t.

$$\|x - x_0\| = \text{dist}(x, X_0)$$

注. • 作为该命题的一个直接推论, 考虑

区间 $[a, b]$ 上连续函数的多项式最优逼近问题

即在无穷范数意义下 $(C[a, b], \|\cdot\|_\infty)$, $\forall f \in C[a, b]$, 对于有限维子空间 $P[a, b] = \text{span}\{1, x, x^2, \dots, x^n\}$, 根据该命题, 依赖 $(C[a, b], \|\cdot\|_\infty)$ 的严格凸性, 存在唯一的至多 n 次多项式 $g_0 \in P[a, b]$, s. t.

$$\|f - g_0\|_\infty = \inf_{g \in P[a, b]} \|f - g\|_\infty$$

这样就给出了该最佳逼近问题的解的存在唯一性的理论依据.

- 在命题条件中, X 的严格凸性事实上只保证了解的唯一性, 而解的存在性不需要严格凸的保证.

⁴可参考《泛函分析讲义》——张恭庆、林源渠 P39 §4.5 应用: 最佳逼近问题.

证明.

- 存在性: Fix $x \in X$. Since $d = \text{dist}(x, X_0) = \inf_{y \in X_0} \|x - y\|$, then for $\epsilon = \frac{1}{n} > 0$, $\exists x_n \in X_0$, s. t.

$$d \leq \|x - x_n\| < d + \frac{1}{n}, \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Thus $x_n \in B(x, d + 1)$, $\forall n \in \mathbb{N}$. $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset X_0$ is bounded.

Since $\dim(X_0) < \infty$, then By 有限维赋范空间的等价刻画 (Thm 2.2.6),

$$\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset X_0 \text{ bounded} \Leftrightarrow \{x_n\}_{n=1}^\infty \text{ subsequentially compact}$$

Thus \exists subsequence $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty \subset \{x_n\}_{n=1}^\infty$, s. t. $x_{n_k} \rightarrow x_0 \in X_0$ as $k \rightarrow \infty$.

Then $\|x - x_0\| = \lim_{k \rightarrow \infty} \|x - x_{n_k}\| = d$.

- 唯一性: 反证法. Assume $\exists x_0, y_0 \in X_0$, $x_0 \neq y_0$, s. t. $\|x - x_0\| = \|x - y_0\| = d$.

For $\forall a \in (0, 1)$,

$$\left\| x - [ax_0 + (1 - a)y_0] \right\| = \left\| a(x - x_0) + (1 - a)(x - y_0) \right\| \quad (2.14)$$

$$\leq a\|x - x_0\| + (1 - a)\|x - y_0\| \quad (2.15)$$

$$= d \quad (2.16)$$

Since $ax_0 + (1 - a)y_0 \in X_0$, then by the **minimality of d** ,

$$\left\| x - [ax_0 + (1 - a)y_0] \right\| = d, \quad \forall a \in (0, 1)$$

i.e.

$$\left\| a \frac{x - x_0}{d} + (1 - a) \frac{x - y_0}{d} \right\| = 1, \quad \forall a \in (0, 1)$$

Since X 严格凸, $\left\| \frac{x - x_0}{d} \right\| = \left\| \frac{x - y_0}{d} \right\| = 1$, $\frac{x - x_0}{d} \neq \frac{x - y_0}{d}$, then

$$\left\| a \frac{x - x_0}{d} + (1 - a) \frac{x - y_0}{d} \right\| < 1, \quad \forall a \in (0, 1)$$

which contradicts to the upper conclusion. Therefore, $x_0 = y_0$.

□

2.4 B^* 空间的商空间

这一节我们来介绍赋范空间的商空间, 在其上定义运算与范数, 并说明其成为完备赋范空间 (B 空间).

定义 2.4.1. Suppose $(X, \|\cdot\|) \in B^*$, $X_0 \subset X$ 为闭子空间, 定义等价关系

$$x \sim y \Leftrightarrow x - y \in X_0$$

记 $x + X_0$ 表示 $x \in X$ 所在等价类, 从而得到商集 X/X_0 , 即

$$X/X_0 := \{x + X_0 \mid x \in X\}$$

引入 X/X_0 中加法和数乘运算如下:

$$\begin{cases} (x + X_0) + (y + X_0) := (x + y) + X_0, \quad \forall x, y \in X \\ k \cdot (x + X_0) := kx + X_0, \quad \forall k \in \mathbb{K}, \quad \forall x \in X \end{cases}$$

不难证明此时 X/X_0 满足线性空间的要求. 再引入范数⁵

$$\|x + X_0\|_0 := \text{dist}(x, X_0) = \inf_{y \in X_0} \|x - y\|, \quad \forall x \in X$$

则 $(X/X_0, \|\cdot\|_0) \in B^*$, 称 $(X/X_0, \|\cdot\|_0)$ 为关于 X 的商空间.

注. • 由于 $X_0 \subset X$ 为子空间, 不难验证二元关系 \sim 满足: 自反性、对称性、传递性.

• 下面来证明上述定义的 $\|\cdot\|_0$ 满足范数的三条公理 (Def 2.1.1):

证明. 由于 $\|\cdot\|$ 满足正定性, 因此 $\|\cdot\|_0$ 显然满足正定性.

⁵此处定义的范数与《泛函分析讲义》—张恭庆、林源渠一书中 §4.7 节所定义的范数是一致的, 即对于 \forall fixed $x \in X$,

$$\|[x]\|_0 = \inf_{y \in [x]} \|y\| = \inf_{x-y \in X_0} \|y\| = \inf_{z=x-y \in X_0} \|x-z\|$$

For $\forall k \in \mathbb{K}, k \neq 0$,

$$\|k \cdot (x + X_0)\|_0 = \|kx + X_0\|_0 = \inf_{y \in X_0} \|kx - y\| \quad (2.17)$$

$$= |k| \inf_{\frac{y}{k} \in X_0} \|x - \frac{y}{k}\| \quad (2.18)$$

$$= |k| \inf_{z \in X_0} \|x - z\| = |k| \cdot \|x + X_0\|_0, \quad \forall x \in X \quad (2.19)$$

Thus $\|\cdot\|_0$ 满足绝对齐性.

$$\|(x + X_0) + (y + X_0)\|_0 = \|(x + y) + X_0\|_0 = \inf_{z \in X_0} \|(x + y) - z\| \quad (2.20)$$

$$= \inf_{\substack{x_0 \in X_0 \\ y_0 \in X_0}} \|(x + y) - (x_0 + y_0)\| \quad (2.21)$$

$$\leq \inf_{\substack{x_0 \in X_0 \\ y_0 \in X_0}} (\|x - x_0\| + \|y - y_0\|) \quad (2.22)$$

$$= \inf_{y_0 \in X_0} \left[\inf_{x_0 \in X_0} (\|x - x_0\| + \|y - y_0\|) \right] \quad (2.23)$$

$$= \inf_{y_0 \in X_0} \left(\|y - y_0\| + \inf_{x_0 \in X_0} \|x - x_0\| \right) \quad (2.24)$$

$$= \inf_{x_0 \in X_0} \|x - x_0\| + \inf_{y_0 \in X_0} \|y - y_0\| \quad (2.25)$$

$$= \|x + X_0\|_0 + \|y + X_0\|_0, \quad \forall x, y \in X \quad (2.26)$$

Therefore, $\|\cdot\|_0$ satisfies the **triangle inequality**, $(X/X_0, \|\cdot\|_0) \in B^*$. □

2.4.1 商空间的完备性

在前面我们给出了 B^* 空间 $(X, \|\cdot\|)$ 上商空间 $(X/X_0, \|\cdot\|_0)$ 的定义, 并说明了其为赋范空间 (B^* 空间). 在这一小节我们将揭示, 如果 $X \in B$ 完备, 则其上定义的商空间均为完备赋范空间 (B 空间).

定理 2.4.1. [商空间的完备性].

设 $(X, \|\cdot\|) \in B$, $X_0 \subset X$ 为闭子空间, 则 $(X/X_0, \|\cdot\|_0) \in B$.

证明. \forall Cauchy sequence $\{x_n + X_0\}_{n=1}^\infty \subset X/X_0$, i.e. $\forall \epsilon > 0, \exists N_\epsilon \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\|(x_n + X_0) - (x_m + X_0)\|_0 < \epsilon, \quad \forall m, n \geq N_\epsilon$$

For $\epsilon = \frac{1}{2}$, $\exists n_1 \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\|(x_n + X_0) - (x_m + X_0)\|_0 < \frac{1}{2}, \quad \forall m, n \geq n_1$$

For $\epsilon = \frac{1}{4}$, $\exists n_2 > n_1$, s. t.

$$\|(x_n + X_0) - (x_m + X_0)\|_0 < \frac{1}{4}, \quad \forall m, n \geq n_2$$

...

Then we get a subsequence $\{x_{n_k} + X_0\}_{k=1}^\infty \subset \{x_n + X_0\}_{n=1}^\infty$, s. t.

$$\|(x_{n_{k+1}} + X_0) - (x_{n_k} + X_0)\|_0 < \frac{1}{2^k}, \quad \forall k \in \mathbb{N}$$

i.e.

$$\text{dist}(x_{n_{k+1}} - x_{n_k}, X_0) = \inf_{y \in X_0} \|x_{n_{k+1}} - x_{n_k} - y\| < \frac{1}{2^k}$$

Thus $\exists y_k \in X_0$, s. t.

$$\|x_{n_{k+1}} - x_{n_k} - y_k\| < \frac{1}{2^k}, \quad \forall k \in \mathbb{N}$$

Then the series $\sum_{k=1}^\infty (x_{n_{k+1}} - x_{n_k} - y_k)$ 绝对收敛.

Since $(X, \|\cdot\|) \in B$ complete, then by B^* 空间完备的等价刻画 (Thm 2.1.2), 级数收敛,

即 $\exists z \in X$, s. t.

$$\sum_{k=1}^\infty (x_{n_{k+1}} - x_{n_k} - y_k) = z$$

i.e.

$$\sum_{k=1}^{N-1} (x_{n_{k+1}} - x_{n_k} - y_k) = x_{n_N} - x_{n_1} - \sum_{k=1}^{N-1} y_k \longrightarrow z \text{ as } N \rightarrow \infty$$

Thus

$$x_{n_N} - \sum_{k=1}^{N-1} y_k \rightarrow z + x_{n_1} \text{ as } N \rightarrow \infty$$

Consider 自然同态

$$\pi : X \longrightarrow X/X_0 \quad (2.27)$$

$$x \longmapsto x + X_0 \quad (2.28)$$

Since $X_0 \subset X$ 为子空间, then $0 \in X_0$. Thus for $\forall \epsilon > 0, \exists \delta = \epsilon > 0$, s. t.

$$\|\pi(x) - \pi(y)\|_0 = \|(x - y) + X_0\|_0 = \text{dist}(x - y, X_0) \quad (2.29)$$

$$= \inf_{z \in X_0} \|(x - y) - z\| \quad (2.30)$$

$$\leq \|x - y\| + \inf_{z \in X_0} \|z\| \quad (2.31)$$

$$= \|x - y\| < \epsilon, \quad \forall \|x - y\| < \delta \quad (2.32)$$

Thus π is continuous. Since

$$x_{n_N} - \sum_{k=1}^{N-1} y_k \rightarrow z + x_{n_1} \text{ as } N \rightarrow \infty$$

Then

$$\pi \left(x_{n_N} - \sum_{k=1}^{N-1} y_k \right) \rightarrow \pi(z + x_{n_1})$$

i.e.

$$\left(x_{n_N} - \sum_{k=1}^{N-1} y_k \right) + X_0 \rightarrow (z + x_{n_1}) + X_0$$

Since $y_k \in X_0, \forall k \in \mathbb{N}$, then

$$\left(x_{n_N} - \sum_{k=1}^{N-1} y_k \right) + X_0 = x_{n_N} + X_0 \rightarrow (z + x_{n_1}) + X_0 \text{ as } N \rightarrow \infty$$

Therefore, $\{x_{n_k} + X_0\}_{k=1}^{\infty}$ converges to $(z + x_{n_1}) + X_0 \in X/X_0$

\Rightarrow Cauchy sequence $\{x_n + X_0\}_{n=1}^{\infty}$ converges

$\Rightarrow (X/X_0, \|\cdot\|_0)$ complete □

第三章 内积空间

3.1 内积空间

在先前的学习中, 我们已经得到了度量空间、赋范空间的概念, 它们的性质都很好, 但相比于我们所熟知的欧氏空间 \mathbb{R}^n , 尤其是在几何性质上还存在着较大的差距. 这一章我们将给出内积空间的概念和性质, 并说明, 其与赋范空间之间只相差了一条平行四边形公式.

定义 3.1.1. 设 X 为定义在数域 \mathbb{K} 上的线性空间, 如果映射 (\cdot, \cdot)

$$(\cdot, \cdot) : X \times X \longrightarrow \mathbb{K}$$

满足如下三条性质:

1. [正定性].

$$(x, x) \geq 0, \quad \forall x \in X \quad \left((x, x) = 0 \Leftrightarrow x = 0 \right)$$

2. [共轭对称性].

$$(x, y) = \overline{(y, x)}, \quad \forall x, y \in X$$

3. [关于第一变元线性性].

$$(ax_1 + \beta x_2, y) = a(x_1, y) + \beta(x_2, y), \quad \forall x_1, x_2, y \in X, \quad \forall a, \beta \in \mathbb{F}$$

则称 (\cdot, \cdot) 为 X 上的内积, $(X, (\cdot, \cdot))$ 称为内积空间.

注. • 此处讨论的内积应当定义在数域 \mathbb{K} 上的线性空间之上, 即内积的陪域 \mathbb{K} 与线性空间的域 \mathbb{K} 二者应当为相同的数域, 且默认取完备数域, 即 $\mathbb{K} \in \{\mathbb{C}, \mathbb{R}\}$ ¹.

$$\bullet (x, 0) = (0, x) = 0, \quad \forall x \in X$$

¹可参考《Linear and Nonlinear Functional Analysis with Applications》– Philippe G. Ciarlet § 4.1 Page 174, 其分别对实内积空间与复内积空间进行了定义.

- 内积关于第二变元具有共轭线性性:

$$(x, ay_1 + \beta y_2) = \overline{\alpha}(x, y_1) + \overline{\beta}(x, y_2), \quad \forall x, y_1, y_2 \in X, \quad \forall \alpha, \beta \in \mathbb{K}$$

证明. 根据共轭对称性及第一变元线性性, $\forall x, y_1, y_2 \in X, \quad \forall \alpha, \beta \in \mathbb{F}$,

$$(x, ay_1 + \beta y_2) = \overline{(ay_1 + \beta y_2, x)} = \overline{\alpha(y_1, x) + \beta(y_2, x)} = \overline{\alpha}(x, y_1) + \overline{\beta}(x, y_2)$$

□

- 事实上, 内积可诱导范数, 即内积空间为一类特殊的 B^* 空间. 即

$$\text{内积空间} \Rightarrow \text{赋范空间}, \quad \text{赋范空间} \Rightarrow \text{内积空间}$$

后续我们将说明, 赋范空间只需再满足一条平行四边形公式, 即可扩充为内积空间.

对于一般的内积空间 $(X, (\cdot, \cdot))$, 我们总是诱导范数 $\|\cdot\|$ 定义如下:

$$\|x\| = \sqrt{(x, x)}, \quad \forall x \in X$$

下面证明该定义满足范数的三条公理 (Def 2.1.1):

证明. 正定性不难验证. 对于绝对齐性, 根据第一变元线性性及第二变元共轭线性性,

$$\|kx\| = \sqrt{(kx, kx)} = \sqrt{k(x, kx)} = \sqrt{k\overline{k}(x, x)} = |k| \sqrt{(x, x)} = |k| \cdot \|x\|, \quad \forall x \in X, \quad \forall k \in \mathbb{F}$$

而对于三角不等式, 根据我们接下来马上介绍的 **Cauchy-Schwarz's Inequality (Thm 3.1.1)**,

$$\operatorname{Re}(x, y) \leq |(x, y)| \leq \|x\| \cdot \|y\|, \quad \forall x, y \in X$$

Thus

$$\|x + y\|^2 = (x + y, x + y) = (x, x) + 2\operatorname{Re}(x, y) + (y, y) \quad (3.1)$$

$$\leq (x, x) + 2\|x\| \cdot \|y\| + (y, y) \quad (3.2)$$

$$= (\|x\| + \|y\|)^2, \quad \forall x, y \in X \quad (3.3)$$

i.e.

$$\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|, \quad \forall x, y \in X$$

Therefore, $\|\cdot\|$ is a norm defined on X .

□

3.1.1 Cauchy-Schwarz's Inequality

下面我们将介绍大名鼎鼎的 **Cauchy-Schwarz's Inequality**, 其在一般的内积空间中均成立, 并为内积空间中“角度”这一几何概念提供了理论支撑.

定理 3.1.1. [Cauchy-Schwarz's Inequality].

Suppose $(X, (\cdot, \cdot))$ be an inner product space. Let $\|x\| = \sqrt{(x, x)}$, $\forall x \in X$. Then

$$|(x, y)| \leq \|x\| \cdot \|y\|, \quad \forall x, y \in X$$

且等号“=”成立 $\Leftrightarrow x, y$ 线性相关.

证明. 下面考虑一般情况, 即数域 $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ 的情况 (**Def 3.1.1**).

Fix $\forall x, y \in X$. Let $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$,

$$f(t) = \|x + ty\|^2 = (x, x) + 2\operatorname{Re}(x, ty) + |t|^2 (y, y) \quad (3.4)$$

$$= (x, x) + 2\operatorname{Re}(\bar{t}(x, y)) + |t|^2 (y, y) \quad (3.5)$$

Then $f(t) \geq 0$, $\forall t \in \mathbb{C}$. 下面我们只考虑 $\bar{t}(x, y) \in \mathbb{R}$ 的情形, 即

$$t = s \frac{(x, y)}{|(x, y)|}, \quad \forall s \in \mathbb{R}$$

Thus $2\operatorname{Re}(\bar{t}(x, y)) = 2\operatorname{Re}\left(s \cdot \frac{\overline{(x, y)}}{|(x, y)|} \cdot (x, y)\right) = 2s |(x, y)|$. Then we have

$$f(t) = g(s) = (x, x) + 2s |(x, y)| + s^2 (y, y), \quad \forall s \in \mathbb{R}$$

Since $f(t) \geq 0$, $\forall t \in \mathbb{C}$, then $g(s) \geq 0$, $\forall s \in \mathbb{R}$. Thus

$$\Delta_g = 4|(x, y)|^2 - 4(x, x)(y, y) \leq 0$$

i.e.

$$|(x, y)| \leq \|x\| \cdot \|y\|, \quad \forall x, y \in X$$

□

3.2 内积与范数的关系

这一节我们将揭示内积与范数的关系, 即内积空间为特殊的 B^* 空间, 但二者事实上只相差一个平行四边形公式.

3.2.1 内积的连续性

下面我们来说明, 内积 (\cdot, \cdot) 关于其所诱导的范数连续.

命题 3.2.1. [内积的连续性].

对于内积空间 $(X, (\cdot, \cdot))$, 其内积 (\cdot, \cdot) 在 $X \times X$ 上关于其诱导的范数 $\|\cdot\|$ 连续.

注. 该命题严谨叙述应该为 (\cdot, \cdot) 在其诱导的范数 $\|\cdot\|$ 所诱导的度量 $\rho(\cdot, \cdot)$ 下连续, 即连续的概念应当建立在拓扑上, 特别地可为度量所诱导的拓扑.

证明. Suppose $x_n \xrightarrow{\|\cdot\|} x \in X$, $y_n \xrightarrow{\|\cdot\|} y \in X$. Then both $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ and $\{y_n\}_{n=1}^{\infty}$ are bounded.

i.e. $\exists M > 0$, s. t.

$$\|x_n\| \leq M, \|y_n\| \leq M, \forall n \in \mathbb{N}$$

Therefore,

$$\left| (x_n, y_n) - (x, y) \right| = \left| (x_n, y_n) - (x, y_n) + (x, y_n) - (x, y) \right| \quad (3.6)$$

$$\leq \left| (x_n - x, y_n) \right| + \left| (x, y_n - y) \right| \quad (3.7)$$

By **Cauchy-Schwarz's Inequality (Thm 3.1.1)**,

$$\left| (x_n, y_n) - (x, y) \right| \leq \left| (x_n - x, y_n) \right| + \left| (x, y_n - y) \right| \quad (3.8)$$

$$\leq \|x_n - x\| \cdot \|y_n\| + \|x\| \cdot \|y_n - y\| \quad (3.9)$$

$$\leq M \cdot \|x_n - x\| + \|x\| \cdot \|y_n - y\| \rightarrow 0 \quad (3.10)$$

Therefore, $(x_n, y_n) \rightarrow (x, y)$ in \mathbb{K} . $(\cdot, \cdot) : X \times X \longrightarrow \mathbb{K}$ is continuous. \square

3.2.2 极化恒等式与平行四边形公式

本小节将说明赋范空间配备上平行四边形公式后即可成为内积空间, 并给出内积的定义式 – 极化恒等式. 首先来给出内积空间的极化恒等式.

命题 3.2.2. [极化恒等式].

设 $(X, (\cdot, \cdot))$ 为定义在数域 \mathbb{K} 上的内积空间, 则

(i) If $\mathbb{K} = \mathbb{R}$, then

$$(x, y) = \frac{1}{4}(\|x + y\|^2 - \|x - y\|^2), \quad \forall x, y \in X$$

(ii) If $\mathbb{K} = \mathbb{C}$, then

$$(x, y) = \frac{1}{4}(\|x + y\|^2 - \|x - y\|^2) + \frac{i}{4}(\|x + iy\|^2 - \|x - iy\|^2), \quad \forall x, y \in X$$

证明. 当 $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ 时,

$$\frac{1}{4}(\|x + y\|^2 - \|x - y\|^2) = \operatorname{Re}(x, y) \quad (3.11)$$

$$\frac{i}{4}(\|x + iy\|^2 - \|x - iy\|^2) = i\operatorname{Re}(x, iy), \quad \forall x, y \in X \quad (3.12)$$

而

$$\operatorname{Re}(x, iy) = \operatorname{Re}(\bar{i}(x, y)) = \operatorname{Im}(x, y), \quad \forall x, y \in X$$

Therefore,

$$\frac{1}{4}(\|x + y\|^2 - \|x - y\|^2) + \frac{i}{4}(\|x + iy\|^2 - \|x - iy\|^2) \quad (3.13)$$

$$= \operatorname{Re}(x, y) + i\operatorname{Im}(x, y) \quad (3.14)$$

$$= (x, y), \quad \forall x, y \in X \quad (3.15)$$

□

下面我们将说明, 对于 B^* 空间 $(X, \|\cdot\|)$, 若其范数满足平行四边形公式, 则可引入内积 (\cdot, \cdot) , s. t.

$$\sqrt{(x, x)} = \|x\|, \quad \forall x \in X$$

定理 3.2.1. [范数诱导内积].

设 $(X, \|\cdot\|) \in B^*$, 若其范数满足平行四边形公式, 即

$$\|x + y\|^2 + \|x - y\|^2 = 2(\|x\|^2 + \|y\|^2), \quad \forall x, y \in X$$

则可定义由此范数诱导的内积 (\cdot, \cdot) , s. t. $\sqrt{(x, x)} = \|x\|$, $\forall x \in X$, 使之成为内积空间.

证明. 内积按照极化恒等式 (**Prop 3.2.2**) 定义.

下面我们只证明 $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ 的情形, $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ 可类似证明. 即定义

$$(x, y) := \frac{1}{4}(\|x + y\|^2 - \|x - y\|^2), \quad \forall x, y \in X$$

依次验证内积的三条公理 (**Def 3.1.1**), 正定性及共轭对称性显然成立.

下面分两方面来证明关于第一变元线性性: (对加法 & 数乘封闭)

• 对加法封闭: Since

$$(x, z) + (y, z) = \frac{1}{4}(\|x + z\|^2 - \|x - z\|^2 + \|y + z\|^2 - \|y - z\|^2) \quad (3.16)$$

$$= \frac{1}{8}[2(\|x + z\|^2 + \|y + z\|^2) - 2(\|x - z\|^2 + \|y - z\|^2)] \quad (3.17)$$

By 平行四边形公式,

$$(x, z) + (y, z) = \frac{1}{8}[2(\|x + z\|^2 + \|y + z\|^2) - 2(\|x - z\|^2 + \|y - z\|^2)] \quad (3.18)$$

$$= \frac{1}{8}(\|x + y + 2z\|^2 + \|x - y\|^2 - \|x + y - 2z\|^2 - \|x - y\|^2) \quad (3.19)$$

$$= \frac{1}{8}(\|x + y + 2z\|^2 - \|x + y - 2z\|^2) \quad (3.20)$$

$$= \frac{1}{2}(x + y, 2z) = 2\left(\frac{x + y}{2}, z\right), \quad \forall x, y, z \in X \quad (3.21)$$

Let $y = 0$, we get

$$(x, z) = 2\left(\frac{x}{2}, z\right), \quad \forall x, z \in X$$

Thus replace x by $x + y$,

$$(x, z) + (y, z) = 2\left(\frac{x + y}{2}, z\right) = (x + y, z), \quad \forall x, y, z \in X$$

i.e.

$$(x, z) + (y, z) = (x + y, z), \quad \forall x, y, z \in X$$

- 对数乘封闭: Fix $\forall x, y \in X$. Let

$$f: \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R} \quad (3.22)$$

$$t \longmapsto f(t) = (tx, y) \quad (3.23)$$

只需证: $f(t)$ 为线性函数.

By the previous result,

$$f(t_1 + t_2) = f(t_1) + f(t_2), \quad \forall t_1, t_2 \in \mathbb{R}$$

Since $\|\cdot\|$ is continuous (范数的连续性 (Def 2.1.1)), then f is continuous.

Thus f 为线性函数, i.e.

$$f(t) = tf(1), \quad \forall t \in \mathbb{R}$$

Therefore,

$$(tx, y) = t(x, y), \quad \forall t \in \mathbb{R}$$

综上,

$$(ax + \beta y, z) = a(x, z) + \beta(y, z), \quad \forall x, y, z \in X, \quad \forall a, \beta \in \mathbb{R}$$

□

例 3.2.1. [l^p 及 L^p 内积空间].

对于 l^p 空间 (Ex 1.3.1) 及 L^p 空间, 平行四边形公式成立的充要条件均为 $p = 2$.

证明. 充分性可按定义验证. 对于必要性, 只需给出 l^p 空间特例即可 (l^p 空间可视为 L^p 空间的子空间 (阶梯函数)).

Let $x = (1, 0, 0, \dots), y = (0, 1, 0, \dots) \in l^p$, then $\|x\| = \|y\| = 1$,

$$\|x + y\| = (1^p + 1^p)^{\frac{1}{p}} = 2^{\frac{1}{p}}, \quad \|x - y\| = (1^p + |-1|^p)^{\frac{1}{p}} = 2^{\frac{1}{p}}$$

Thus $\|x + y\|^2 + \|x - y\|^2 = 2(\|x\|^2 + \|y\|^2) \Rightarrow 2 \cdot 2^{\frac{2}{p}} = 2 \cdot 2 \Rightarrow p = 2$. □

3.3 正交分解

3.3.1 正交补

这一节开始我们来探索内积空间的几何性质. 首先给出在高等代数中接触过的正交及正交补的概念.

定义 3.3.1. 对于内积空间 $(X, (\cdot, \cdot))$ 中的两个元素 $x, y \in X$, 如果

$$(x, y) = 0$$

则称 x 与 y 正交. 设 $M \subset X$ 为非空子集, 如果 $\forall y \in M, (x, y) = 0$, 则称 x 与 M 正交.

同时, 对于内积空间 $(X, (\cdot, \cdot))$ 的子集 $M \subset X$, 定义其正交补 M^\perp 如下:

$$M^\perp := \{x \in X \mid \forall y \in M, (x, y) = 0\}$$

即为与 M 中所有成员均正交的元素所构成的集合.

注. • $\forall M \subset X, 0 \in M^\perp \neq \emptyset$.

- 正交补继承了补运算的反包含性, 即 $\forall M_1 \subset M_2$, 有 $M_2^\perp \subset M_1^\perp$. (根据定义容易验证)
- $\forall M \subset X, M^\perp \cap M \subset \{0\}$, 即 M 与 M^\perp 交集为 0 或空集.
- M^\perp 为 X 的闭线性子空间, 即对加法、数乘和极限封闭. (并不依赖于 M 的线性性)

证明. 根据内积关于第一变元的线性性 (**Def 3.1.1**), $\forall x, y \in M^\perp$,

$$(ax + \beta y, z) = a(x, z) + \beta(y, z) = 0, \forall z \in M, \forall a, \beta \in \mathbb{K}$$

于是 $ax + \beta y \in M^\perp, \forall a, \beta \in \mathbb{K}$, 即为线性子空间.

$\forall \{x_n\}_{n=1}^\infty \subset M^\perp$ with $x_n \xrightarrow{\|\cdot\|} x_0 \in X$. 根据内积的连续性 (**Prop 3.2.1**),

$$(x_0, y) = \left(\lim_{n \rightarrow \infty} x_n, y \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} (x_n, y) = 0, \forall y \in M$$

Thus $x_0 \in M^\perp$. Therefore, M^\perp 对极限运算封闭, 即为闭线性子空间. □

- 根据 M^\perp 为 X 的闭线性子空间, 不难得到将 M 扩张为线性空间后 M^\perp 不变, 即

$$M^\perp = \text{span}(M)^\perp = \overline{\text{span}(M)}^\perp, \quad \forall M \subset X$$

证明. 分别证明两个等式:

$M^\perp = \text{span}(M)^\perp$: Trivial.

$\text{span}(M)^\perp = \overline{\text{span}(M)}^\perp$: By 反包含性, $\overline{\text{span}(M)}^\perp \subset \text{span}(M)^\perp$.

Fix $x \in \text{span}(M)^\perp$. $\forall y \in \overline{\text{span}(M)}$.

(a) If $y \in \text{span}(M)$, then since $x \in \text{span}(M)^\perp$, then $(x, y) = 0$.

(b) If $y \in \overline{\text{span}(M)} \setminus \text{span}(M)$, then $\exists \{y_n\}_{n=1}^\infty \subset \text{span}(M)$, s. t. $y_n \xrightarrow{\|\cdot\|} y$.

By 内积的连续性 (Prop 3.2.1),

$$(x, y) = \left(x, \lim_{n \rightarrow \infty} y_n \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} (x, y_n) = 0$$

Therefore,

$$(x, y) = 0, \quad \forall y \in \overline{\text{span}(M)}^\perp$$

$$\text{span}(M)^\perp \subset \overline{\text{span}(M)}^\perp \Rightarrow \text{span}(M)^\perp = \overline{\text{span}(M)}^\perp.$$

□

- $\forall \{x_i\}_{i=1}^n \subset X$, 若 x_i 两两正交, 即 $(x_i, x_j) = 0, \forall i \neq j$, 则满足勾股定理, i.e.

$$\left\| \sum_{i=1}^n x_i \right\|^2 = \sum_{i=1}^n \|x_i\|^2$$

证明. 只需对 $n = 2$ 情形证明, 即 $\forall (x, y) = 0$, WTS: $\|x + y\|^2 = \|x\|^2 + \|y\|^2$.

Since $(x, y) = 0$, then

$$\|x + y\|^2 = (x + y, x + y) = (x, x) + 2\text{Re}(x, y) + (y, y) \quad (3.24)$$

$$= (x, x) + (y, y) \quad (3.25)$$

$$= \|x\|^2 + \|y\|^2, \quad \forall x, y \in M^\perp \quad (3.26)$$

再由归纳法容易证明原命题.

□

3.3.2 内积空间的严格凸性

回顾严格凸 (Def 2.3.1) 的定义, 下面我们说明内积空间均为严格凸的 B^* 空间.

命题 3.3.1. [内积空间的严格凸性].

内积空间 $(X, (\cdot, \cdot))$ 必严格凸.

证明. $\forall x, y \in X$ with $\|x\| = \|y\| = 1, x \neq y$. Fix x and y .

Let

$$f : [0, 1] \longrightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \quad (3.27)$$

$$\hat{n} \longmapsto f(\hat{n}) = \|(1 - \hat{n})x + \hat{n}y\| \quad (3.28)$$

By 范数的连续性 (Def 2.1.1), $f \in C[0, 1]$. Since 平行四边形公式 can be represented as

$$\|x + y\|^2 + \|x - y\|^2 = 2(\|x\|^2 + \|y\|^2) \quad (3.29)$$

$$\Leftrightarrow \left\| \frac{x + y}{2} \right\|^2 + \left\| \frac{x - y}{2} \right\|^2 = \frac{1}{2}(\|x\|^2 + \|y\|^2) \quad (3.30)$$

Take

$$x \Rightarrow (1 - \hat{n})x + \hat{n}y, \quad y \Rightarrow (1 - \mu)x + \mu y, \quad \forall 0 \leq \hat{n} < \mu \leq 1$$

Then by 平行四边形公式, since $\|(\mu - \hat{n})(x - y)\| > 0$,

$$\left\| \left(1 - \frac{\hat{n} + \mu}{2}\right)x + \frac{\hat{n} + \mu}{2}y \right\|^2 = \frac{1}{2}(\|(1 - \hat{n})x + \hat{n}y\|^2 + \|(1 - \mu)x + \mu y\|^2) - \|(\mu - \hat{n})(x - y)\|^2 \quad (3.31)$$

$$< \frac{1}{2}(\|(1 - \hat{n})x + \hat{n}y\|^2 + \|(1 - \mu)x + \mu y\|^2) \quad (3.32)$$

i.e.

$$f\left(\frac{\hat{n} + \mu}{2}\right) < \frac{1}{2}(f(\hat{n}) + f(\mu)), \quad \forall 0 \leq \hat{n} < \mu \leq 1$$

Since $f \in C[0, 1]$ continuous, then f is **strictly convex** (严格凸).

With $f(0) = f(1) = 1$, we can easily proof that X is also **strictly convex**.

(对 $\forall \hat{n}_0 \in (0, 1)$, 可用二分法得到一系列区间端点 $\hat{n}_n \rightarrow \hat{n}_0$, 从而得到严格不等式 $f(\hat{n}_0) < 1$)

□

3.3.3 Hilbert 空间的闭凸子集 (最佳逼近问题)

回顾我们曾在介绍赋范空间严格凸性时, 给出过对于严格凸赋范空间, 其空间上一点到有限维子空间的最佳逼近问题解的存在唯一性 (Prop 2.3.2). 而对于 Hilbert 空间, 我们同样有类似的定理, 并且可以用更一般的“闭凸子集”代替“有限维子空间”的条件.

首先给出 Hilbert 空间的定义.

定义 3.3.2. 完备的内积空间 $(X, (\cdot, \cdot))$ 称为 Hilbert 空间, 记 $X \in \mathcal{H}$.

注. 此处的“完备”指的是由内积 (\cdot, \cdot) 所诱导的范数 $\|\cdot\|$ 再诱导的度量 ρ 是完备的.

下面给出 Hilbert 空间上最佳逼近问题解的存在唯一性定理.

定理 3.3.1. [Hilbert 空间最佳逼近问题解的存在唯一性].

设 $(X, (\cdot, \cdot)) \in \mathcal{H}$, $M \subset X$ 为闭凸子集, then for $\forall x \in X$, \exists 唯一的 $x_0 \in M$, s. t.

$$\|x - x_0\| = \text{dist}(x, M)$$

注. Hilbert 空间的完备性及闭凸子集保证了解的存在性, 而内积空间的严格凸性 (Prop 3.3.1) 则自动保证了解的唯一性.

证明.

- 存在性: Since $\text{dist}(x, M) = \inf_{y \in M} \|x - y\|$, then for $\forall \epsilon = \frac{1}{n}$, $\exists x_n \in M$, s. t.

$$\text{dist}(x, M) \leq \|x - x_n\| < \text{dist}(x, M) + \frac{1}{n}, \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

i.e.

$$\|x - x_n\| \rightarrow \text{dist}(x, M) \text{ as } n \rightarrow \infty$$

下证 $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset M$ 为 Cauchy sequence:

By 平行四边形公式,

$$\|x_n - x_m\|^2 = \left\| (x_n - x) + (x - x_m) \right\|^2 \quad (3.33)$$

$$= 2(\|x_n - x\|^2 + \|x - x_m\|^2) - \left\| 2x - (x_m + x_n) \right\|^2 \quad (3.34)$$

$$= 2(\|x_n - x\|^2 + \|x - x_m\|^2) - 4 \left\| x - \frac{x_m + x_n}{2} \right\|^2 \quad (3.35)$$

Since $M \subset X$ 为闭凸子集, $x_m, x_n \in X$, then $\frac{x_m + x_n}{2} \in M$, thus $\left\| x - \frac{x_m + x_n}{2} \right\| \geq \text{dist}(x, M)$,

$$\|x_n - x_m\|^2 = 2(\|x_n - x\|^2 + \|x - x_m\|^2) - 4 \left\| x - \frac{x_m + x_n}{2} \right\|^2 \quad (3.36)$$

$$\leq 2(\|x_n - x\|^2 + \|x - x_m\|^2) - 4 \text{dist}(x, M)^2 \quad (3.37)$$

Since $\text{dist}(x, M) \leq \|x - x_n\| < \text{dist}(x, M) + \frac{1}{n}$, then for $\forall \epsilon > 0$, $\exists N_\epsilon \in \mathbb{N}$, s. t.

$$\|x_n - x_m\|^2 \leq 4\epsilon^2, \quad \forall n, m \geq N_\epsilon$$

Thus $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset M$ is a Cauchy sequence.

Since $X \in \mathcal{H}$ is complete, then $\exists x_0 \in X$, s. t.

$$x_n \xrightarrow{\|\cdot\|} x_0$$

Since $M \subset X$ is closed, $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset M$, then $x_n \rightarrow x_0 \in M$. By 范数的连续性 (Def 2.1.1),

$$\|x - x_0\| = \left\| x - \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \right\| = \lim_{n \rightarrow \infty} \|x - x_n\| = \text{dist}(x, M)$$

- 唯一性: 同 Prop 2.3.2 唯一性证明. 即利用内积空间的严格凸性 (Prop 3.3.1).

□

3.3.4 投影定理 (正交分解)

下面我们给出 **Hilbert** 空间上的投影定理 (正交分解), 它事实上给出了 Hilbert 空间直和分解的理论依据.

定理 3.3.2. [Hilbert 空间上的投影定理].

设 $(X, (\cdot, \cdot)) \in \mathcal{H}$, $M \subset X$ 为闭 (线性) 子空间, then for $\forall x \in X$, \exists 唯一的 $x_0 \in M, x_1 \in M^\perp$, s. t.

$$x = x_0 + x_1$$

注. 事实上该投影定理给出 Hilbert 空间的直和分解, 即 \forall 闭子空间 $M \subset X$,

$$X = M \oplus M^\perp$$

更一般地, 对于 \forall 子集 $M \subset X$, 根据 $M^\perp = \text{span}(M)^\perp = \overline{\text{span}(M)}^\perp$ (**Def 3.3.1**),

$$X = \overline{\text{span}(M)} \oplus M^\perp$$

证明.

- **存在性:** Since $M \subset X$ 为闭子空间, 故为线性空间, 同时为闭凸子集, then by **Thm 3.3.1**, $\exists x_0 \in M$, s. t.

$$\|x - x_0\| = \text{dist}(x, M)$$

下面证明 $x - x_0 \in M^\perp$: $\forall y \in M$,

$$\|x - x_0 - y\|^2 = \|x - x_0\|^2 + \|y\|^2 - 2\text{Re}(x - x_0, y)$$

Since M is linear, then $x_0 + y \in M$,

$$\|x - x_0 - y\|^2 = \|x - (x_0 + y)\|^2 \geq \text{dist}(x, M)^2 = \|x - x_0\|^2$$

i.e.

$$\|y\|^2 \geq 2\text{Re}(x - x_0, y), \quad \forall y \in M$$

Fix $y \in M$. Since M is linear, then $ty \in M, \forall t \in \mathbb{R}$, replace y as ty ,

$$t^2\|y\|^2 \geq 2t \text{Re}(x - x_0, y), \quad \forall t \in \mathbb{R}$$

i.e.

$$\|y\|^2 \cdot t^2 - 2 \operatorname{Re}(x - x_0, y) \cdot t \geq 0, \quad \forall t \in \mathbb{R}$$

Calculate 上述二次函数判别式, we have

$$\Delta = 4 \operatorname{Re}(x - x_0, y)^2 \leq 0 \Rightarrow \operatorname{Re}(x - x_0, y) = 0$$

Similarly, replace y as $ity \in M$, $\forall t \in \mathbb{R}$,

$$t^2 \|y\|^2 \geq 2t \operatorname{Re}(x - x_0, iy) = 2t \operatorname{Re}(i(x - x_0, y)) \quad (3.38)$$

$$= 2t \operatorname{Re}\left(\frac{(x - x_0, y)}{i}\right) \quad (3.39)$$

$$= 2t \operatorname{Im}(x - x_0, y) \quad (3.40)$$

Calculate 判别式, we can get

$$\operatorname{Im}(x - x_0, y) = 0$$

Therefore,

$$(x - x_0, y) = \operatorname{Re}(x - x_0, y) + i \operatorname{Im}(x - x_0, y) = 0, \quad \forall y \in M$$

i.e.

$$x - x_0 \in M^\perp$$

Let $x_1 = x - x_0 \in M^\perp$, thus $x = x_0 + x_1$ for some $x_0 \in M, x_1 \in M^\perp$.

- 唯一性: Suppose $x = x_0 + x_1 = y_0 + y_1$, where $x_0, y_0 \in M, x_1, y_1 \in M^\perp$. Then

$$x_0 - y_0 = y_1 - x_1$$

Since both M and M^\perp are linear, then $x_0 - y_0 \in M$ and $y_1 - x_1 \in M^\perp$. Thus

$$x_0 - y_0 = y_1 - x_1 \in M \cap M^\perp$$

Since $M \cap M^\perp \subset \{0\}$ (**Def 3.3.1**), then

$$x_0 = y_0, \quad x_1 = y_1$$

□

3.3.5 正交补的性质

这一小节我们来补充 **Hilbert** 空间中正交补的性质.

命题 3.3.2. [**Hilbert** 空间中正交补的性质].

设 $(X, (\cdot, \cdot)) \in \mathcal{H}$, $M \subset X$ 为闭子空间, 则

(i) $X = M \oplus M^\perp$. 更一般地, 对于 \forall 子集 $M \subset X$,

$$X = \overline{\text{span}(M)} \oplus M^\perp$$

(ii) 若 $M \subsetneq X$ 为真闭子空间, 则 $M^\perp \neq \{0\}$.

(iii) $M = (M^\perp)^\perp$

(iv) 设 $M \subset X$ 为子空间, 且 $M^\perp = \{0\}$, 则 $\overline{M} = X$.

证明.

(iii) **Claim:** \forall 闭子空间 $M \subset X$, $M \subset (M^\perp)^\perp$.

• $\forall x \in M$. Fix x . $\forall y \in M^\perp$, then $(x, y) = 0$, $\forall y \in M^\perp$. Thus

$$(x, y) = 0, \quad \forall y \in M^\perp$$

$$\text{Then } x \in (M^\perp)^\perp \Rightarrow M \subset (M^\perp)^\perp.$$

By **Thm 3.3.2** (即本命题 (i)),

$$X = M \oplus M^\perp \subset (M^\perp)^\perp \oplus M^\perp$$

Thus $X = M \oplus M^\perp = (M^\perp)^\perp \oplus M^\perp$. Therefore, $M = (M^\perp)^\perp$.

(iv) Since $M \subset \overline{M}$, then

$$X = M \oplus M^\perp \subset \overline{M} \oplus M^\perp$$

Thus $X = \overline{M} \oplus M^\perp$. Since $M^\perp = \{0\}$, then $X = \overline{M}$.

□

3.3.6 最佳逼近元的内积刻画

作为投影定理 (正交分解) 的推广, 对于 **Thm 3.3.1** 中给出的 **Hilbert** 空间上闭凸子集的最佳逼近问题, 下面我们用内积来给出其最佳逼近元的刻画.

定理 3.3.3. [Hilbert 空间上闭凸子集最佳逼近元的内积刻画].

设 $(X, (\cdot, \cdot)) \in \mathcal{H}$, $M \subset X$ 为闭凸子集, then for $\forall x \in X$,

$$y \in M \text{ 为 } x \text{ 在 } M \text{ 上最佳逼近元} \Leftrightarrow \operatorname{Re}(x - y, y - z) \geq 0, \forall z \in M$$

注. 此处最佳逼近元 $y \in M$ 的存在唯一性可由 **Thm 3.3.1** 得到.

证明.

- 必要性 \Rightarrow : $\forall z \in M$. Since $M \subset X$ is convex, then $tz + (1 - t)y \in M, \forall t \in [0, 1]$.

Since $y \in M$ 为唯一最佳逼近元 (**Thm 3.3.1**), then

$$\|x - (tz + (1 - t)y)\|^2 \geq \|x - y\|^2 \quad (3.41)$$

$$\Leftrightarrow \|(x - y) + t(y - z)\|^2 \geq \|x - y\|^2 \quad (3.42)$$

$$\Leftrightarrow t^2\|y - z\|^2 + 2t\operatorname{Re}(x - y, y - z) \geq 0, \forall t \in [0, 1] \quad (3.43)$$

Calculate 该二次函数判别式, we get

$$\Delta = 4\operatorname{Re}(x - y, y - z)^2 \leq 0 \Rightarrow \operatorname{Re}(x - y, y - z) = 0, \forall z \in M$$

- 充分性 \Leftarrow : 由条件 $\operatorname{Re}(x - y, y - z) \geq 0, \forall z \in M$, we can get

$$\|x - (tz + (1 - t)y)\|^2 \geq \|x - y\|^2, \forall z \in M, \forall t \in [0, 1]$$

Take $t = 1$, then we have

$$\|x - z\| \geq \|x - y\|, \forall z \in M$$

Thus $y \in M$ 为 x 在 M 上的最佳逼近元. By **Thm 3.3.1**, we have proved the uniqueness of y .

□

3.4 正交系

3.4.1 正交系与 Bessel 不等式

这一节我们来介绍有关正交系的相关概念, 首先给出正交系的定义.

定义 3.4.1. 设 $(X, (\cdot, \cdot))$ 为内积空间, $\{e_n\}_{n \geq 1} \subset X$. 若 $\{e_n\}_{n \geq 1}$ 满足两两正交, 即

$$(e_n, e_m) = 0, \quad \forall n \neq m$$

则称 $\{e_n\}_{n \geq 1}$ 为 X 的一个 正交系. 若进一步有 $\|e_n\| = 1, \forall n \geq 1$, 即

$$(e_i, e_j) = \delta_{ij}^1, \quad \forall i, j$$

则称之为 标准正交系, 此时称 $\{(x, e_n)\}_{n \geq 1}$ 为 $x \in X$ 关于 $\{e_n\}_{n \geq 1}$ 的 Fourier 系数.

注. 此处 $\{e_n\}_{n \geq 1}$ 既可为有限项, 也可为无穷项. 大部分情况下我们将其视作无穷项的一般情况讨论, 即 $\{e_n\}_{n=1}^\infty$.

下面给出在欧氏空间 \mathbb{R}^n 中十分显然的一个定理, 这里将其拓展到了一般的内积空间中.

定理 3.4.1. [Bessel's Inequality].

设 $(X, (\cdot, \cdot))$ 为内积空间, $\{e_n\}_{n=1}^\infty \subset X$ 为 X 的一个标准正交系, then

$$\sum_{n=1}^{\infty} |(x, e_n)|^2 \leq \|x\|^2, \quad \forall x \in X$$

注. 事实上, 若 $(X, (\cdot, \cdot)) \in \mathcal{H}$, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n)e_n$ 即为 $x \in X$ 在闭线性子空间

$$\overline{\text{span}(e_n)_{n \in \mathbb{N}}} \subset X$$

上的投影. 在下面的证明过程中也会有所体现.

证明. Fix $\forall x \in X, \forall m \in \mathbb{N}$. Let $M = \overline{\text{span}(e_1, \dots, e_m)} \subset X$ be a closed linear subspace.

Since

$$\left(x - \sum_{n=1}^m (x, e_n) e_n, e_k\right) = (x, e_k) - (x, e_k) = 0, \quad \forall k = 1 \sim m$$

Then for $M = \overline{\text{span}(e_n)},_{1 \leq n \leq m}$,

$$\left(x - \sum_{n=1}^m (x, e_n) e_n, y\right) = 0, \quad \forall y \in M$$

Thus $x - \sum_{n=1}^m (x, e_n) e_n \in M^\perp$, and

$$x = \sum_{n=1}^m (x, e_n) e_n + \left(x - \sum_{n=1}^m (x, e_n) e_n\right)$$

Since $\sum_{n=1}^m (x, e_n) e_n \in M$, then

$$\left(\sum_{n=1}^m (x, e_n) e_n, x - \sum_{n=1}^m (x, e_n) e_n\right) = 0$$

Hence by 勾股定理 (Def 3.3.1),

$$\|x\|^2 = \left\| \sum_{n=1}^m (x, e_n) e_n \right\|^2 + \left\| x - \sum_{n=1}^m (x, e_n) e_n \right\|^2 \geq \left\| \sum_{n=1}^m (x, e_n) e_n \right\|^2$$

Since $(e_i, e_j) = 0, \forall i \neq j$, then by 勾股定理 (Def 3.3.1),

$$\left\| \sum_{n=1}^m (x, e_n) e_n \right\|^2 = \sum_{n=1}^m \left\| (x, e_n) e_n \right\|^2 = \sum_{n=1}^m |(x, e_n)|^2$$

Thus

$$\|x\|^2 \geq \left\| \sum_{n=1}^m (x, e_n) e_n \right\|^2 = \sum_{n=1}^m |(x, e_n)|^2, \quad \forall m \in \mathbb{N}$$

Letting $m \rightarrow \infty$, we have

$$\sum_{n=1}^{\infty} |(x, e_n)|^2 \leq \|x\|^2$$

□

3.4.2 正交系的完备性与完全性

这一小节我们来介绍完备与完全正交系, 并说明其在 Hilbert 空间中等价.

定义 3.4.2. 设 $(X, (\cdot, \cdot))$ 为内积空间, $\{e_n\}_{n \geq 1} \subset X$ 为 X 的一个标准正交系. 若对于 $\forall x \in X$, Parseval 等式成立 (Bessel 不等式 (Thm 3.4.1) 取等情况), i.e.

$$\sum_{n=1}^{\infty} |(x, e_n)|^2 = \|x\|^2, \quad \forall x \in X$$

则称 $\{e_n\}_{n \geq 1}$ 在 X 中 完备 (complete).

定义 3.4.3. 设 $(X, (\cdot, \cdot))$ 为内积空间, $\{e_n\}_{n \geq 1} \subset X$ 为 X 的一个标准正交系. 若对于 $\forall x \in X$,

$$(x, e_n) = 0, \quad \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow x = 0$$

则称 $\{e_n\}_{n \geq 1}$ 是 完全的 (perfect).

下面我们就来说明在 Hilbert 空间中上述两个定义等价.

定理 3.4.2. [Hilbert 空间中标准正交系完备与完全等价].

设 $(X, (\cdot, \cdot)) \in \mathcal{H}$, $\{e_n\}_{n \geq 1} \subset X$ 为 X 的一个标准正交系, 则下列叙述等价:

- (i) $\{e_n\}_{n \geq 1}$ 完备.
- (ii) $x = \sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) e_n, \quad \forall x \in X.$
- (iii) $\forall x, y \in X,$

$$(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) \overline{(y, e_n)}$$

- (iv) $\{e_n\}_{n \geq 1}$ 完全.

注. • 事实上, 上述叙述均等价于 $\overline{\text{span}_{n \geq 1}(e_n)}^\perp = \{0\}$, 在证明中会有所体现. 又因为 $\overline{\text{span}_{n \geq 1}(e_n)} \subset X$ 为 X 的子空间, 根据 Prop 3.3.2 (iv),

$$\overline{\text{span}_{n \geq 1}(e_n)}^\perp = \{0\} \Leftrightarrow \overline{\text{span}_{n \geq 1}(e_n)} = X$$

即上述叙述等价于 $\text{span}_{n \geq 1}(e_n)$ 在 X 中稠密.

- 对于内积空间 $(X, (\cdot, \cdot))$, $\{e_n\}_{n \geq 1} \subset X$ 为 X 的一个标准正交系. 考虑映射

$$T : X \longrightarrow l^2 \quad (3.44)$$

$$x \longmapsto \left((x, e_n) \right)_{n=1}^{\infty} \quad (3.45)$$

根据 **Bessel's Inequality (Thm 3.3.1)**,

$$\sum_{n=1}^{\infty} |(x, e_n)|^2 \leq \|x\|^2 < \infty, \quad \forall x \in X$$

Thus the definition of $f : X \longrightarrow l^2$ is reasonable. Also we can show that f is **surjective** (满射):

$\forall (a_n)_{n=1}^{\infty} \in l^2$. Let

$$x = \sum_{n=1}^{\infty} a_n e_n \in \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1} \subset X$$

Then $(x, e_n) = a_n, \quad \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow Tx = (a_n)_{n=1}^{\infty} \in l^2$. Hence $f : X \longrightarrow l^2$ is surjective.

下面我们来说明:

对于一般的内积空间 $(X, (\cdot, \cdot))$, $T|_{\overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}} : \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1} \longrightarrow l^2$ 为等距同构²

根据上述说明, 不难证明 $T|_{\overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}}$ 为双射. 下面证明其等距性.

$\forall x, y \in \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}$,

$$\left(\rho_{l^2}(Tx, Ty) \right)^2 = \sum_{n=1}^{\infty} |(x, e_n) - (y, e_n)|^2 = \sum_{n=1}^{\infty} |(x - y, e_n)|^2$$

Since $x - y \in \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}$, then by **Bessel's Inequality (Parseval's Equality, Thm 3.3.1)**,

$$\left(\rho_{l^2}(Tx, Ty) \right)^2 = \sum_{n=1}^{\infty} |(x - y, e_n)|^2 = \|x - y\|^2 = \left(\rho_X(x, y) \right)^2, \quad \forall x, y \in \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}$$

i.e.

$$\rho_{l^2} \circ T = \rho_X$$

Therefore, $T|_{\overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}} : \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1} \longrightarrow l^2$ 为等距同构.

²对于本定理的条件, 即对于 **Hilbert** 空间 X 上的完备的标准正交系 $\{e_n\}_{n \geq 1}$, $T : X \longrightarrow l^2$ 即为等距同构.

对于一般的内积空间, 将 T 限制在 $\overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}$ 上有两个作用: (i) 是保证双射; (ii) 是保证 **Parseval's Equality**.

证明.

1. 首先 (i) 与 (ii) 的等价性是显然的:

- Since $\left(\sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) e_n, x - \sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) e_n\right) = 0$, and

$$x = \sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) e_n + \left(x - \sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) e_n\right)$$

Then by 勾股定理 (Def 3.3.1)

$$\|x\|^2 = \left\| \sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) e_n \right\|^2 + \left\| x - \sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) e_n \right\|^2$$

Thus

$$\{e_n\}_{n \geq 1} \text{ 完备} \Leftrightarrow \left\| x - \sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) e_n \right\|^2 = \|x\|^2 - \left\| \sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) e_n \right\|^2 = 0, \quad \forall x \in X \quad (3.46)$$

$$\Leftrightarrow x = \sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) e_n, \quad \forall x \in X \quad (3.47)$$

2. 上述叙述 (i)、(ii)、(iii)、(iv) 均等价于 $\overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}^{\perp} = \{0\}$:

- Since $x = \sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) e_n \in \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}, \quad \forall x \in X \Leftrightarrow \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}^{\perp} = \{0\}$, then

$$(i) \Leftrightarrow (ii) \Leftrightarrow \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}^{\perp} = \{0\}$$

- $\forall x, y \in X$ with $x = x_0 + x_1, y = y_0 + y_1$, where $x_0, y_0 \in \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}, x_1, y_1 \in \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}^{\perp}$.

Then $x_0 = \sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) e_n$ and $y_0 = \sum_{n=1}^{\infty} (y, e_n) e_n$.

Since

$$(x, y) = (x_0, y_0) + (x_0, y_1) + (x_1, y_0) + (x_1, y_1) = (x_0, y_0) + (x_1, y_1)$$

and

$$(x_0, y_0) = \left(\sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) e_n, \sum_{n=1}^{\infty} (y, e_n) e_n \right) = \sum_{n=1}^{\infty} (x, e_n) \overline{(y, e_n)}$$

Thus

$$(iii) \Leftrightarrow (x_1, y_1) = 0, \quad \forall x, y \in X$$

遍历 $x, y \in X$, 不难说明同时遍历了 $x_1, y_1 \in \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}^{\perp}$. Therefore,

$$(iii) \Leftrightarrow (x_1, y_1) = 0, \quad \forall x_1, y_1 \in \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}^{\perp} \Leftrightarrow \overline{\text{span}(e_n)}_{n \geq 1}^{\perp} = \{0\}$$

- Since for $\forall x \in X$,

$$(x, e_n) = 0, \forall n \in \mathbb{N} \Leftrightarrow x \in \overline{\text{span}(e_n)_{n \geq 1}}^\perp$$

Therefore,

$$(iv) \Leftrightarrow \overline{\text{span}(e_n)_{n \geq 1}}^\perp = \{0\}$$

□

3.4.3 可分 Hilbert 空间的分类

这一小节我们将给出可分 Hilbert 空间的所有分类, 即在等距同构的意义下, 只有 \mathbb{K}^n 与 l^2 两类可分 Hilbert 空间.

首先回顾一下高等代数中接触过的 Gram-Schmidt 正交化过程, 可以应用到一般的内积空间之中:

设 $(X, (\cdot, \cdot))$ 为内积空间, $\{x_n\}_{n \geq 1} \subset X$ 线性无关且至多可数. Let

$$y_1 = x_1, \quad e_1 = \frac{y_1}{\|y_1\|} \quad (3.48)$$

$$y_2 = x_2 - (x_2, e_1)e_1, \quad e_2 = \frac{y_2}{\|y_2\|} \quad (3.49)$$

$$\dots \quad \dots \quad (3.50)$$

$$y_n = x_n - (x_n, e_{n-1})e_{n-1}, \quad e_n = \frac{y_n}{\|y_n\|} \quad (3.51)$$

$$\dots \quad \dots \quad (3.52)$$

上述过程即为 Gram-Schmidt 正交化过程. 可以证明, $\{x_n\}_{n \geq 1}$ 与 $\{e_n\}_{n \geq 1}$ 可互相表出, 即

$$\text{span}_{n \geq 1}(x_n) = \text{span}_{n \geq 1}(e_n)$$

下面我们就来给出可分 Hilbert 空间的分类.

定理 3.4.3. [可分 Hilbert 空间的分类].

设 $(X, (\cdot, \cdot)) \in \mathcal{H}$,

若 X 为有限维 (n 维) 可分 Hilbert 空间, 则 X 与 \mathbb{K}^n 等距同构.

若 X 为无穷维可分 Hilbert 空间, 则 X 与 l^2 等距同构.

注. • 事实上, 对于内积空间, 其具有两种维数, 分别为正交维数及线性维数. 大部分情况下 (包括此处) 均讨论的为其正交维数, 即标准正交系的最大元素个数.

对于线性维数, 即 X 作为线性空间的维数, 可以证明的是, 对于 **Hilbert** 空间,

其线性维数要么有限, 要么不可数. (正交维数有限 \Leftrightarrow 线性维数有限)³

- 该定理说明, 在等距同构意义下, 可分的 Hilbert 空间只有 \mathbb{K}^n (有限维) 和 l^2 (无穷维).

证明.

- If X 为无穷维可分 Hilbert 空间, then \exists 可数稠密子集 $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset X$.

Since X 正交维数为 ∞ , then $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset X$ 线性无关. 对 $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ 进行 Gram-Schmidt 正交化, 得到标准正交系 $\{e_n\}_{n=1}^\infty$, s. t.

$$\text{span}_{n \geq 1}(x_n) = \text{span}_{n \geq 1}(e_n)$$

Since $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset \text{span}_{n \geq 1}(x_n)$ and $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset X$ dense, then

$$X = \overline{\{x_n\}_{n=1}^\infty} \subset \overline{\text{span}_{n \geq 1}(x_n)} = \overline{\text{span}_{n \geq 1}(e_n)} \Rightarrow \overline{\text{span}_{n \geq 1}(e_n)} = X$$

Therefore, by **Thm 3.4.2's Remark**,

$$T|_{\overline{\text{span}_{n \geq 1}(e_n)}} = T : X \longrightarrow l^2 \text{ 为等距同构}$$

- If X 为 n 维可分 Hilbert 空间, Similarly.

□

³对于命题“无可数无穷维 Hilbert 空间”, 可根据 **Baire's Theorem (Thm 1.2.1)** 反证: 可数无穷维 Hilbert 空间为第一纲集, 这与 Baire's Theorem 矛盾. 事实上该命题可推广为“无可数无穷维 Banach 空间”.

对于 Hilbert 空间不可数线性维数的讨论, 可参考文献:

吴亚敏. 希尔伯特空间 H 中两种维数的比较 [C]. //第七届中国智能计算大会论文集. 2013:157-158.

第四章 线性算子与线性泛函

4.1 线性算子 & 线性泛函

这一节我们主要来给出线性算子及线性泛函相关概念的定义. 线性算子为高等代数中学过的线性变换 (线性映射) 的推广, 即更多的在无穷维线性空间上进行讨论. 而线性泛函是线性算子的一个特例, 即将线性泛函的陪域取作数域, 相当于定义域较大的函数, 即为函数的推广.

定义 4.1.1. 设 X, Y 为定义在数域 \mathbb{K} 上的线性空间. 若映射 $T: X \rightarrow Y$ 为线性映射, 即

$$T(ax + \beta y) = aT(x) + \beta T(y), \quad \forall x, y \in X, \quad \forall a, \beta \in \mathbb{K}$$

则称 T 为 X 到 Y 上的一个 线性算子. 特别地, 若 $Y = \mathbb{K} \in \{\mathbb{R}, \mathbb{C}\}$, 则称 T 为 线性泛函.

注. • 此处我们沿用高代与范畴论中的记号, 将从线性空间 X 到 Y 上的所有线性算子构成的空间记作 $\text{Hom}(X, Y)$. 不难说明 $\text{Hom}(X, Y)$ 也是个定义在数域 \mathbb{K} 上的线性空间.

- 回顾高代中有关有限维线性空间的对偶空间的结论:

数域 \mathbb{K} 上有限维线性空间的所有线性泛函构成空间 (对偶空间) 同构于 \mathbb{K}^n .

证明. 设 X 为数域 \mathbb{K} 上 n 维线性空间, $\{e_i\}_{i=1}^n \subset X$ 为一组基.

Then for $\forall f \in \text{Hom}(X, \mathbb{K})$,

$$f(x) = f\left(\sum_{i=1}^n x_i e_i\right) = \sum_{i=1}^n x_i f(e_i), \quad \forall x = \sum_{i=1}^n x_i e_i \in X$$

Consider the mapping

$$T : \text{Hom}(X, \mathbb{K}) \longrightarrow \mathbb{K}^n \quad (4.1)$$

$$f \longmapsto (f(e_1), \dots, f(e_n)) \quad (4.2)$$

It's not hard to prove that T is an isomorphism between $\text{Hom}(X, \mathbb{K})$ and \mathbb{K}^n , i.e.

$$\text{Hom}(X, \mathbb{K}) \cong \mathbb{K}^n$$

□

对于线性空间 X 到 Y 上的线性算子 $\text{Hom}(X, Y)$, 为了考虑其连续性, 下面将 X, Y 限制为 B^* 空间, 给出连续算子的定义.

定义 4.1.2. 设 $X, Y \in B^*$, $T \in \text{Hom}(X, Y)$. 若 T 连续, 即在 X 中每点处连续, 则称 T 为连续算子, 记 X 到 Y 的连续算子全体为 $L(X, Y)$. 特别地, 若 $Y = \mathbb{K} \in \{\mathbb{R}, \mathbb{C}\}$, 记 $X^* = L(X, \mathbb{K})$.

注. • 事实上, 此处记号 X^* 是对高代中对偶空间概念的推广, 即当 X 为有限维线性空间时, $X^* = L(X, \mathbb{K})$ 就是 X 上的对偶空间, 故更多讨论无穷维的情况. 这一点由下述命题保证:

有限维 B^* 空间 $(X, \|\cdot\|)$ 上的线性函数 $f : X \longrightarrow \mathbb{K}$ 连续.

证明. 根据有限维 B^* 空间范数的等价性 (**Thm 2.2.2**) 容易证明, 于是 $\text{Hom}(X, \mathbb{K}) = X^*$. □

- 对于 $\forall T \in \text{Hom}(X, \mathbb{K})$, 根据 T 的线性性, 不难得到 $T \in L(X, Y) \Leftrightarrow T$ 在 $x = 0$ 处连续.

下面再给出有界算子的概念.

定义 4.1.3. 设 $X, Y \in B^*$ 且 $T \in \text{Hom}(X, Y)$. 如果 T 将任何有界集映为有界集, 则称 T 为 有界 (线性) 算子.

注. 此处给出 T 有界的几个等价定义, 即对于 $\forall T \in \text{Hom}(X, Y)$,

$$T \text{ 有界} \Leftrightarrow \text{单位球 (面) 的像有界} \Leftrightarrow \exists M > 0, \text{ s.t. } \|Tx\|_Y \leq M \|x\|_X, \forall x \in X$$

证明.

- T 有界 \Leftrightarrow 单位球 (面) 的像有界: 必要性显然. 下面证充分性 \Leftarrow : $\exists M > 0$, s.t.

$$\|Tx\|_Y \leq M \|x\|_X = M, \forall x \in B(0, 1) \subset X$$

$\forall A \subset X$ bounded, i.e. $\exists r > 0$, s.t. $A \subset B(0, r)$. Then by the linearity of $T \in \text{Hom}(X, Y)$,

$$\|Tx\|_Y = \left\| T\left(\|x\|_X \cdot \frac{x}{\|x\|_X}\right) \right\|_Y = \|x\|_X \cdot \left\| T\left(\frac{x}{\|x\|_X}\right) \right\|_Y \leq r \cdot M < \infty, \forall x \in A$$

Therefore, $T(A) \subset \mathbb{K}$ bounded. T bounded.

- 单位球 (面) 的像有界 $\Leftrightarrow \exists M > 0$, s.t. $\|Tx\|_Y \leq M \|x\|_X, \forall x \in X$:
充分性显然. 下面证明必要性 \Rightarrow : $\exists M > 0$, s.t.

$$\|Tx\|_Y \leq M, \forall x \in \partial B(0, 1)$$

Then for $\forall x \in X$,

$$\left\| T\left(\frac{x}{\|x\|_X}\right) \right\|_Y = \frac{\|Tx\|_Y}{\|x\|_X} \leq M, \forall x \in M$$

i.e. $\|Tx\|_Y \leq M \|x\|_X, \forall x \in X$.

□

下面来介绍有关线性算子的十分重要的结论, 即对于 B^* 空间上的线性算子, 连续与有界等价.

命题 4.1.1. [B^* 空间线性算子连续 \Leftrightarrow 有界].

Suppose $X, Y \in B^*, T \in \text{Hom}(X, Y)$, then

$$T \text{ 连续} \Leftrightarrow T \text{ 有界}$$

证明.

- 充分性 \Leftarrow : Suppose $T \in \text{Hom}(X, Y)$ bounded, then

By B^* 空间上有界线性算子等价定义 (Def 4.1.3), $\exists M > 0$, s. t.

$$\|Tx\|_Y \leq M \|x\|_X, \quad \forall x \in X$$

Thus $T : X \rightarrow Y$ is lipschitz continuous, specifically continuous.

- 必要性 \Rightarrow : Suppose $T \in \text{Hom}(X, Y)$ continuous.

反证法. 假设 T 无界, 则 $\forall n \in \mathbb{N}, \exists x_n \in X$, s. t.

$$\|Tx_n\|_Y > n \|x_n\|_X, \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

i.e.

$$\left\| T \left(\frac{1}{n} \cdot \frac{x_n}{\|x_n\|_X} \right) \right\|_Y > 1, \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Let $y_n = \frac{x_n}{n\|x_n\|_X} \in X$, then letting $n \rightarrow \infty$, we have

$$\|y_n\|_X \rightarrow 0, \quad \|Ty_n\|_Y > 1 \not\rightarrow 0 \text{ as } n \rightarrow \infty$$

Therefore, $T(x)$ is discontinuous at $x = \vec{0}$. 从而 T 不连续, 矛盾.

□

下面给出 B^* 空间上线性泛函连续的充要条件, 即其核空间为闭集.

命题 4.1.2. [B^* 空间上线性泛函连续的充要条件].

Suppose $X \in B^*, f \in \text{Hom}(X, \mathbb{K})$. Then

$$f \in X^* \Leftrightarrow \text{Ker}f \subset X \text{ closed}$$

注. 回顾线性空间 X, Y 之间线性映射 $f \in \text{Hom}(X, Y)$ 的核空间的定义

$$\text{Ker}f = \{x \in X \mid f(x) = 0 \in Y\} \subset X$$

此命题即说明了 B^* 空间上线性泛函连续 \Leftrightarrow 其核空间为闭集.

证明.

- 必要性 \Rightarrow : Suppose $f \in X^* = L(X, Y)$ continuous. Then

For $\forall \{x_n\}_{n=1}^\infty \subset \text{Ker}f$ with $x_n \xrightarrow{\|\cdot\|_X} x \in X$ converges, since f is continuous, then

$$f(x) = f\left(\lim_{n \rightarrow \infty} x_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = 0$$

Thus $x \in \text{Ker}f$. $\text{Ker}f$ is closed.

- 充分性 \Leftarrow : 不妨设 $\text{Ker}f \subsetneq X$ 为 X 的真闭子集 (否则 $f \equiv 0$ 自然连续).

Consider the Quotient Space $(X/\text{Ker}f, \|\cdot\|_0) \in B^*$ (范数的定义及合理性可回顾 **Def 2.4.1**).

下面说明 $X/\text{Ker}f$ 为 1 维线性空间 (可将 $X/\text{Ker}f$ 中的成员理解为 f 的等值面):

Fix $\forall x_0 \notin \text{Ker}f$, then $f(x_0) \neq 0$. Since $f(x_0) \neq 0$, then $\forall [y] \in X/\text{Ker}f$, it's clear that

$$[y] = \frac{f(y)}{f(x_0)}[x_0], \quad \forall [y] \in X/\text{Ker}f$$

Thus $X/\text{Ker}f$ can be linearly expressed by $\{[x_0]\} \subset X/\text{Ker}f$. 故 $\dim(X/\text{Ker}f) = 1$. Let

$$\tilde{f}: X/\text{Ker}f \longrightarrow \mathbb{K}$$

$$[x] \mapsto f(x)$$

不难证明 \tilde{f} 是个线性映射 (well-defined, 与代表元无关, 保持线性运算).

下面证明 $\tilde{f} \in \text{Hom}(X/\text{Ker}f, \mathbb{K})$ 有界, 即 一维 B^* 空间上的线性泛函均有界:

Since $\dim(X/\text{Ker}f) = 1$, then for \forall fixed $x_0 \notin \text{Ker}f$, $\exists \hat{n}_x \in \mathbb{K}$, s. t.

$$[x] = \hat{n}_x[x_0] = [\hat{n}_x x_0], \quad \forall [x] \in X/\text{Ker}f$$

Suppose $\frac{|\tilde{f}([x_0])|}{\|[x_0]\|_0} = M \in \mathbb{R}_{\neq 0}$. i.e. $|\tilde{f}([x_0])| = M \cdot \|[x_0]\|_0$. Then

$$|\tilde{f}([x])| = |\tilde{f}(\hat{n}_x[x_0])| = |\hat{n}_x| \cdot |\tilde{f}([x_0])| = |\hat{n}_x| \cdot M \cdot \|[x_0]\|_0 = M \cdot \|[x]\|_0, \quad \forall [x] \in X/\text{Ker}f$$

根据 B^* 空间上有界线性算子的等价定义 (Def 4.1.3), $\tilde{f} : (X/\text{Ker}f, \|\cdot\|_0) \longrightarrow (\mathbb{K}, |\cdot|)$ 有界.
从而

$$|f(x)| = |\tilde{f}([x])| = M \cdot \|[x]\|_0 = M \cdot \inf_{z \in \text{Ker}f} \|x - z\|$$

Since $\vec{0} \in \text{Ker}f$, then $\inf_{z \in \text{Ker}f} \|x - z\| \leq \|x - \vec{0}\| = \|x\|$. Therefore,

$$|f(x)| \leq M \cdot \|x\|, \quad \forall x \in X$$

从而 $f \in \text{Hom}(X, \mathbb{K})$ 有界.

根据 B^* 空间线性算子连续与有界等价 (Prop 4.1.1), $f \in L(X, \mathbb{K}) = X^*$ 连续.

□

附录 A *Supplementary Content*

A.1 度量空间稠密子集的等价刻画

引理 A.1.1. 度量空间稠密子集的等价刻画.

Suppose (X, ρ) be a metric space. Then for $A \subset X$,

$$A \text{ is dense in } X \Leftrightarrow \forall x \in X, \exists \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset A, \text{ s. t. } x_n \xrightarrow{\rho} x$$

证明.

\Rightarrow : Trivial. $\forall x \in X$, since A is dense in X , then

$$A \cap B(x, r) \cap X \neq \emptyset, \forall r > 0 \quad (\text{A.1})$$

不妨设 $B(x, 1) \cap X \setminus \{x\} \neq \emptyset$. Then we take

$$x_n \in A \cap B(x, \frac{1}{n}), \forall n \in \mathbb{N} \quad (\text{A.2})$$

where we get $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset A$ with $x_n \xrightarrow{\rho} x$.

\Leftarrow : $\forall x \in X \setminus A$, WTS: $x \in \overline{A} \setminus A$. Trivial.

□