

目录

0	代数学基础	2
0.1	常用符号	2
0.2	集合	2
0.3	映射	4
0.4	等价关系和等价类	7
0.5	群	8
0.6	环	13
0.7	域	17
1	向量空间	19
1.1	向量空间	19
1.2	子空间	20
1.3	生成集和线性无关	20
1.4	直和	22
2	线性变换	26
2.1	线性变换	26
2.2	线性变换的表示	29
3	同构定理	34
3.1	商空间	34
3.2	第一同构定理	36
3.3	线性泛函	37
3.4	对偶基	38
3.5	伴随算子	39
4	模 I: 基本性质	42
4.1	模	42
4.2	子模	43
4.3	生成模	44
4.4	自由模	44
4.5	模同态	45
4.6	商环	45
4.7	同构定理	45
5	模 II: 自由与诺特模	47

6	主理想整环上的模	50
7	线性算子的结构	57
8	特征值和特征向量	62
8.1	投影算子	67
9	实数和复数内积空间	69
9.1	范数和距离	70
9.2	等距算子	71
9.3	正交性	71
9.4	Riesz 表示定理	75
10	正规算子的结构理论	77
10.1	线性算子的伴随	77
10.2	正交(/么正)对角化	81
10.3	特殊的正规算子	85
10.4	(半)正定算子	87
10.5	算子的极分解	88
12	度量空间	89
12.1	开集和闭集	89
12.2	度量空间的收敛性	91
12.3	集合的闭包	92
12.4	稠密子集	93
12.5	连续	93
12.6	完备	94
12.7	等距	95
12.8	度量空间的完备化	95
13	希尔伯特空间	96
13.1	希尔伯特空间	96
13.2	无穷级数	97
13.3	近似问题	98
13.4	有界线性变换的 Riesz 表示定理	100

Chapter 0

代数学基础

0.1 常用符号

- \forall : 对所有 (for all).
- \exists : 存在 (there exists).
- $\exists!$: 存在且唯一 (there exists exactly one).
- s.t.: 使得 (such that).
- \mathbb{N} : 自然数.
- \mathbb{Z} : 整数.
- \mathbb{Q} : 有理数.
- \mathbb{R} : 实数.
- \mathbb{C} : 复数.

0.2 集合

元素与集合之间的关系: 对元素 a 和集合 S ,

- $a \in S$ 或
- $a \notin S$.

集合中元素之间的关系: $\forall a, b \in S$,

- $a = b$ 或
- $a \neq b$.

集合与集合之间的关系: 对集合 A, B 和全集 I ,

- (1) 交集: $A \cap B = \{a \mid a \in A \text{ 且 } a \in B\}$.
- (2) 并集: $A \cup B = \{a \mid a \in A \text{ 或 } a \in B\}$.

(3) 差: $B \setminus A = \{a \mid a \in B \text{ 且 } a \notin A\}$.

(4) 补集: $A' = \bar{A} = I \setminus A = \{a \mid a \in I \text{ 且 } a \notin A\}$.

(5) 包含: $\forall a \in A, a \in B$, 则称 A 包含于 B , 或称 B 包含 A , 或称 B 是 A 的子集, 记为 $A \subseteq B$
 $\iff A \cup B = B \iff A \cup B = B$.

证: $A \subseteq B \implies A \cap B = A$: $\because A \subseteq B, \therefore \forall a \in A, a \in B \implies A \subseteq A \cap B$.

$\forall a \in A \cap B$, 由交集定义, $a \in A \implies A \cap B \subseteq A$.

故 $A \cap B = A$.

$A \subseteq B \iff A \cap B = A$: $\because A \cap B = A, \therefore \forall a \in A, a \in B \implies A \subseteq B$.

$A \subseteq B \implies A \cup B = B$: $\because A \subseteq B, \forall a \in A, a \in B, \therefore \forall a \in A \cup B, a \in B \implies A \cup B \subseteq B$.

$\because A \subseteq B, \forall a \in A$, 由并集定义, $a \in A \cup B \implies B \subseteq A \cup B$.

故 $A \cup B = B$.

$A \subseteq B \iff A \cup B = B$: $\forall a \in A$, 由并集定义, $a \in A \cup B$, 又 $\because A \cup B = B, \therefore a \in B \implies A \subseteq B$.

综上, 得证. □

常用公式:

(1) $A \cap (\cup_i B_i) = \cup_i (A \cap B_i)$.

证: $a \in A \cap (\cup_i B_i) \iff a \in A \text{ 且 } a \in \cup_i B_i$

$\iff a \in A \text{ 且 } \exists k, \text{ s.t. } a \in B_k$

$\iff \exists k, \text{ s.t. } a \in A \cap B_k \subseteq \cup_i (A \cap B_i)$

$\iff a \in \cup_i (A \cap B_i)$, 故得证. □

(2) $A \cup (\cap_i B_i) = \cap_i (A \cup B_i)$.

证: $a \in A \cup (\cap_i B_i) \iff a \in A \text{ 或 } a \in \cap_i B_i$

$\iff a \in A \text{ 或 } \forall i, a \in B_i$

$\iff \forall i, a \in A \text{ 或 } a \in B_i$

$\iff \forall i, a \in A \cup B_i$

$\iff a \in \cap_i (A \cup B_i)$, 故得证. □

(3) $(\cup_i A_i)' = \cap_i A_i'$.

证: $a \in (\cup_i A_i)' \iff a \in I \text{ 且 } a \notin \cup_i A_i$

$\iff a \in I \text{ 且 } \forall i, a \notin A_i$

$\iff \forall i, a \in I \text{ 且 } a \notin A_i$

$\iff \forall i, a \in A_i'$

$\iff a \in \cap_i A_i'$, 故得证. □

(4) $(\cap_i A_i)' = \cup_i A_i'$.

证: $a \in (\cap_i A_i)' \iff a \in I \text{ 且 } a \notin \cap_i A_i$

$\iff a \in I \text{ 且 } \exists k, \text{ s.t. } a \notin A_k$

$\iff \exists k, \text{ s.t. } a \in I \text{ 且 } a \notin A_k$

$\iff \exists k, \text{ s.t. } a \in A_k'$

$\iff a \in \cup_i A_i'$, 故得证. □

0.3 映射

定义 0.1 映射: $\forall a \in S_1, \exists! b \in S_2, \text{ s.t. } b = f(a)$, 记作 $f : S_1 \rightarrow S_2, a \mapsto b$, 其中称 S_1 为定义域, S_2 为值域, b 为 a 的像, a 为 b 的原像.

例 0.1 恒等映射: $1_S : S \rightarrow S, a \mapsto 1_S(a) = a$. □

定义 0.2 映射相等: 映射 $f : S_1 \rightarrow S_2, g : S_1 \rightarrow S_3$, 若 $\forall a \in S_1, f(a) = g(a)$, 则称 f 与 g 相等, 记作 $f = g$.

$$\forall a \in S_1, \{f(a)\} \subseteq S_2 \text{ 且 } |\{f(a)\}| = 1.$$

定义 0.3 原像集: $f^{-1}(b) \equiv \{a \in S_1 \mid f(a) = b\}$.

$$f^{-1}(b) \subseteq S_1.$$

$f^{-1}(b)$ 可能 $= \emptyset$.

定义 0.4 像集: $\text{Im } f = f(S_1) \equiv \{b \in S_2 \mid b = f(a) \forall a \in S_1\}$.

$$\text{Im } f \subseteq S_2.$$

基本性质:

$$(1) A \subseteq S_1 \implies A \subseteq f^{-1}(f(A)).$$

$$\text{证: } \forall a \in A, \because A \subseteq S_1, \therefore a \in S_1.$$

$$\text{又 } \because f(a) \in f(A), \therefore a \in f^{-1}(f(A)), \text{ 故 } A \subseteq f^{-1}(f(A)).$$
 □

$$\text{若 } \exists a \in S_1 - A, \text{ s.t. } f(a) \in f(A), \text{ 则 } A \subsetneq f^{-1}(f(A)).$$

$$(2) B \subseteq S_2 \implies B \supseteq f(f^{-1}(B)).$$

$$\text{证: } \because f^{-1}(B) = \{a \in S_1 \mid f(a) \in B\}, \therefore \forall a \in f^{-1}(B), f(a) \in B \implies f(f^{-1}(B)) \subseteq B.$$
 □

$$\text{若 } \exists b \in B, \text{ s.t. } \forall a \in S_1, f(a) \neq b \text{ (即 } B \text{ 中有元素在 } S_1 \text{ 中无原像), 则 } B \supsetneq f(f^{-1}(B)).$$

$$\text{若 } \forall b \in B, \exists a \in A, \text{ s.t. } f(a) = b, \text{ 则 } B = f(f^{-1}(B)).$$

$$(3) f^{-1}(\cup_i B_i) = \cup_i f^{-1}(B_i).$$

$$\text{证: } a \in f^{-1}(\cup_i B_i) \iff \exists k, \text{ s.t. } f(a) \in B_k \iff \exists k, \text{ s.t. } a \in f^{-1}(B_k)$$

$$\iff a \in \cup_i f^{-1}(B_i), \text{ 故得证.}$$
 □

$$(4) f^{-1}(\cap_i B_i) = \cap_i f^{-1}(B_i).$$

$$\text{证: } a \in f^{-1}(\cap_i B_i) \iff \forall i, f(a) \in B_i \iff \forall i, a \in f^{-1}(B_i)$$

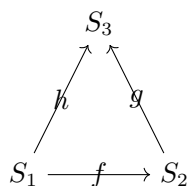
$$\iff a \in \cap_i f^{-1}(B_i), \text{ 故得证.}$$
 □

定义 0.5 映射的复合: 映射 $f : S_1 \rightarrow S_2$, $g : S_2 \rightarrow S_3$, 则称映射 $g \circ f : S_1 \rightarrow S_3$, $a \mapsto g \circ f(a) \equiv g(f(a))$ 为 f 和 g 的复合.

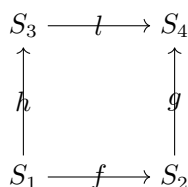
定理 0.1 映射复合的结合律: $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$.

故连续复合 $f_1 \circ f_2 \circ \cdots \circ f_n$ 无需括号.

定义 0.6 交换图: $f : S_1 \rightarrow S_2$, $h : S_1 \rightarrow S_3$, $g : S_2 \rightarrow S_3$, 若 $g \circ f = h$, 则称该图交换.



$f : S_1 \rightarrow S_2$, $g : S_2 \rightarrow S_4$, $h : S_1 \rightarrow S_3$, $l : S_3 \rightarrow S_4$, 若 $g \circ f = l \circ h$, 则称该图交换.



定义 0.7 单射(Injective 或 One-to-one): 映射 $f : S_1 \rightarrow S_2$, 若 $\forall a, b \in S_1$, $f(a) = f(b) \implies a = b$, 则称 f 单射.

单射的性质:

(1) $c \in S_2$, f 单射, 若 $f^{-1}(c) \neq \emptyset$, 则 $|f^{-1}(c)| = 1$.

(2) f 单射 $\iff A = f^{-1}(f(A))$.

定义 0.8 满射(Surjective): 映射 $f : S_1 \rightarrow S_2$, 若 $\forall b \in S_2$, $\exists a \in S_1$, s.t. $f(a) = b$ (即 $\text{Im } f = S_2$), 则称 f 满射.

满射的性质:

(1) f 满射 $\iff \forall \emptyset \neq B \subseteq S_2$, $f^{-1}(B) \neq \emptyset$.

(2) f 满射 $\iff \forall B \subseteq S_2$, $B = f(f^{-1}(B))$.

定义 0.9 双射: 单射且满射.

例 0.2: 恒等映射双射. □

常用结论:

(1) f, g 单射 $\implies g \circ f$ 单射.

证: $\forall a, b \in S_1$, 若 $g \circ f(a) = g \circ f(b)$, $\because g$ 单射, $\therefore f(a) = f(b)$.

又 $\because f$ 单射, $\therefore a = b$, 故 $g \circ f$ 单射. □

(2) $g \circ f$ 单射 $\implies f$ 单射.

证: $\forall a, b \in S_1$, 若 $f(a) = f(b)$, 则 $g \circ f(a) = g \circ f(b)$.

又 $\because g \circ f$ 单射, $\therefore a = b$, 故 f 单射. □

例 0.3 $g \circ f$ 单射, 而 g 非单射的例子: 集合 $S_1 = \{0\}$, $S_2 = \{0, 1\}$, $S_3 = \{0\}$.

映射 $f: S_1 \rightarrow S_2$, $f(a) = 0 \forall a \in S_1$, 单射,

$g: S_2 \rightarrow S_3$, $g(b) = 0 \forall b \in S_2$, 非单射,

$g \circ f: S_1 \rightarrow S_3$, $g(a) = 0$, 单射. □

(3) f, g 满射 $\implies g \circ f$ 满射.

证: $\forall c \in S_3$, $\because g$ 满射, $\therefore \exists b \in S_2$, s.t. $g(b) = c$.

又 $\because f$ 满射, $\therefore \exists a \in S_1$, s.t. $f(a) = b \implies g \circ f(a) = c$, 故 $g \circ f$ 满射. □

(4) $g \circ f$ 满射 $\implies g$ 满射.

证: $\because g \circ f$ 满射, $\therefore \forall c \in S_3$, $\exists a \in S_1$, s.t. $g \circ f(a) = c$

$\implies \exists b = f(a) \in S_2$, s.t. $g(b) = c$, 故 g 满射. □

例 0.4 $g \circ f$ 满射, 而 f 非满射的例子: 集合 $S_1 = \{0\}$, $S_2 = \{0, 1\}$, $S_3 = \{0\}$.

映射 $f: S_1 \rightarrow S_2$, $f(a) = 0 \forall a \in S_1$, 非满射,

$g: S_2 \rightarrow S_3$, $g(b) = 0 \forall b \in S_2$, 满射,

$g \circ f: S_1 \rightarrow S_3$, $g(a) = 0$, 满射. □

定理 0.2: 映射 $f: S_1 \rightarrow S_2$ 单射 $\iff \exists$ 映射 $g: S_2 \rightarrow S_1$, s.t. $g \circ f = 1_{S_1}$, 此时称 g 为 f 的左逆.

证: “ \implies ”: 构造 $g(b) = \begin{cases} a, & a \in f^{-1}(b), \\ \text{任取 } a_0 \in S_1, & f^{-1}(b) = \emptyset, \end{cases}$
 $\forall a \in S_1$, 记 $b = f(a)$, $\because f$ 单射且 $a \in f^{-1}(b) \neq \emptyset$, $\therefore |f^{-1}(b)| = 1$,
 $\implies g \circ f(a) = a \implies g \circ f = 1_{S_1}$.

“ \impliedby ”: $\forall a, b \in S_1$, 若 $f(a) = f(b)$, 则 $a = 1_{S_1}(a) = g \circ f(a) = g \circ f(b) = 1_{S_1}(b) = b$, 故 f 单射.

综上, 得证. □

\because 当 $f^{-1}(b) = \emptyset$ 时, $g(b)$ 的取值可能具有任意性, \therefore 若左逆存在, 则未必唯一.

定理 0.3: 映射 $f: S_1 \rightarrow S_2$ 满射 $\iff \exists$ 映射 $h: S_2 \rightarrow S_1$, s.t. $f \circ h = 1_{S_2}$, 此时称 h 为 f 的右逆.

证: “ \implies ”: $\because f$ 满射, $\therefore \forall b \in S_2$, $\exists a \in S_1$, s.t. $f(a) = b$, 故可构造 $h(b) = a \in f^{-1}(b)$,

从而 $f \circ h(b) = b \implies f \circ h = 1_{S_2}$.

“ \impliedby ”: $\forall b \in S_2$, $\exists a = h(b) \in S_1$, s.t. $f \circ h(b) = 1_{S_2}(b) = b$, 故 f 满射. □

\because 当 $|f^{-1}(b)| \geq 1$, $h(b)$ 的取值可能具有任意性, \therefore 若右逆存在, 则未必唯一.

定理 0.4: 若映射 f 同时存在左逆和右逆, 则其左逆 = 右逆, 此时称 f 可逆, 且此时 f 双射.

证: $\because f$ 同时 \exists 左逆和右逆, 由定理 0.2 和 0.3 得 f 双射.

设左逆 $g: S_2 \rightarrow S_1$, s.t. $g \circ f = 1_{S_1}$, 右逆 $h: S_2 \rightarrow S_1$, s.t. $f \circ h = 1_{S_2}$.

假设 $g \neq h$, 则 $\exists b \in S_2$, s.t. $g(b) \neq h(b)$.

又 $\because f$ 单射, $\therefore b = 1_{S_2}(b) = f \circ g(b) \neq f \circ h(b)$.

$\because f$ 满射, $\therefore \exists a \in S_1$, s.t. $b = f(a) \implies f(a) = b \neq f \circ g(b) = f \circ g \circ f(a) = 1_{S_2}(f(a)) = f(a)$, 这显然是荒谬的, 故假设错误, $g = h$. \square

0.4 等价关系和等价类

定义 0.10 卡氏积: 集合 S_1 和 S_2 的卡氏积 $S_1 \times S_2 \equiv \{(a, b) \mid a \in S_1, b \in S_2\}$.

集合 S 的卡氏积 $S \times S \equiv \{(a, b) \mid a, b \in S\}$.

注意, 一般 $(a, b) \neq (b, a)$.

定义 0.11 关系: 卡氏积的子集 $\mathcal{R} \subseteq S \times S$, 称为 S 上的关系.

例 0.5: 自然数集 \mathbb{N} 的卡氏积 $\mathbb{N} \times \mathbb{N} = \{(n, m) \mid n, m \in \mathbb{N}\}$.

小于关系: $\mathcal{R}_1 = \{(n, m) \mid n - m < 0\}$. $(1, 2) \in \mathcal{R}_1$, 记作 $1\mathcal{R}_1 2$.

等于关系: $\mathcal{R}_2 = \{(n, m) \mid n - m = 0\}$. $(1, 1) \in \mathcal{R}_2$, 记作 $1\mathcal{R}_2 1$. \square

定义 0.12 图: 对映射 $f: S_1 \rightarrow S_2$, 有关系 $G_f = \{(a, f(a)) \mid a \in S_1\} \subseteq S_1 \times S_2$, 称 G_f 为 f 的图.

(第一个坐标在此关系中仅出现一次, 不会重复.)

映射与图一一对应.

定义 0.13 等价关系: 关系 $\mathcal{R} \in S \times S$, 若满足

反身性: $\forall a \in S, (a, a) \in \mathcal{R}$ (即 $a \sim a \forall a \in S$)

(2) 对称性: 若 $(a, b) \in \mathcal{R}$, 则 $(b, a) \in \mathcal{R}$ (即 $a \sim b \iff b \sim a$)

(3) 传递性: 若 $(a, b) \in \mathcal{R}, (b, c) \in \mathcal{R}$, 则 $(a, c) \in \mathcal{R}$ (即 $a \sim b, b \sim c \implies a \sim c$)

则称 \mathcal{R} 为 S 上的等价关系. 若元素 a, b 具有等价关系, 记作 $a \sim b$.

定义 0.14 等价类: 由具有等价关系的元素组成的集合. $\forall a \in S, [a] \equiv \{b \in S \mid b \sim a\}$ 称为 a 的等价类, a 为该等价类的代表元.

$\because a \in [a], \therefore [a]$ 必 $\neq \emptyset$.

$c \in S$, 则有且仅有以下两种情况:

(1) $c \in [a] \iff c \sim a \iff a \sim c \iff a \in [c] \iff [a] = [c]$.

(2) $c \notin [a] \iff [a] \cap [c] = \emptyset$.

证: 若 $[a] \cap [b] \neq \emptyset$, 则 $\exists c \in [a] \cap [b]$
 $\iff c \in [a]$ 且 $c \in [b]$, 即 $c \sim a$ 且 $c \sim b$
 $\implies a \sim b \implies [a] = [b]$, 得证. □

等价类的性质:

- (1) $a \in [b] \iff b \in [a] \iff [a] = [b]$.
- (2) $a \notin [b] \iff [a] \cap [b] = \emptyset$.
- (3) $\forall a, b \in S$, 要么 $[a] = [b]$, 要么 $[a] \cap [b] = \emptyset$.
- (4) $S = \cup_{i \in K, a_i \in S} [a_i]$, 其中 $[a_i] \cap [a_j] = \emptyset \forall i \neq j$.

证:

(1)(2)(3) 前文已证.

- (4) $S = \cup_{a \in S} [a]$, 合并各等价类, 即得证. □

等价类这一概念可用于将大问题分解为小问题加以解决.

定义 0.15 剖分: 集合 $S \neq \emptyset$, 若 $S = \cup_{i \in K, S_i \subseteq S} S_i$ 且 $S_i \cap S_j = \emptyset \forall i \neq j$, 则称 $\{S_i \subseteq S \mid i \in K\}$ 为 S 的剖分.

可由集合的等价类得到它的一个剖分.

定义 0.16 商类: 所有等价类的集合. $\frac{S}{\sim} \equiv \{[a] \mid a \in S\}$. $\pi: S \rightarrow \frac{S}{\sim}, a \mapsto [a]$ 称为自然映射.

自然映射满射, 但未必单射.

定义 0.17 运算: 映射 $*$: $S \times S \rightarrow S$ 称为 S 上的运算, 记作 $(S, *)$.

$$\forall a, b \in S, a * b \in S.$$

0.5 群

定义 0.18 群: 若 $(G, *)$ 满足

结合律: $(a * b) * c = a * (b * c)$,
 (故 $a_1 * a_2 * \cdots * a_n$ 无需括号, 可写为 $\prod_{i=1}^n a_i$.)

(2) 有单位元 e : s.t. $e * a = a * e = a$,

(3) 有逆元: $\forall a \in G, \exists b$, s.t. $a * b = b * a = e$, 则称 b 为 a 的逆, 记作 $b = a^{-1}$,

则称 $(G, *)$ 为群.

定理 0.5: 每个群的单位元是唯一的.

证: 假设 e_1, e_2 均为单位元, 则 $e_1 = e_1 * e_2 = e_2$, 得证. □

定理 0.6: 每个元素的逆元是唯一的.

证: 假设 b_1 和 b_2 均为 a 的逆元, 则 $b_1 a = b_2 a = e \implies b_1 = b_2$, 得证. □

例 0.6: (\mathbb{Z}, \times) 非群, 因 0 无逆元. □

特殊的群:

(1)

例 0.7 循环群: $G = \{a^i \mid i \in \mathbb{Z}\}$. □

(2)

例 0.8 交换群(Abel 群): $\forall a, b \in G, a * b = b * a$. □

群的性质:

(1) $c * c = c \iff c = e$.

(2) $(a^{-1})^{-1} = a$.

(3) $(a * b)^{-1} = b^{-1} * a^{-1}$.

(4) 左消去律: $a * b = a * c \iff b = c$,

右消去律: $b * a = c * a \iff b = c$.

定义 0.19 群的阶: $|G| \equiv$ 群中元素的个数.

定义 0.20 有限群: 若 $|G| < \infty$, 则称 G 为有限群.

定义 0.21 群元素的阶: $g \in G, 0 \neq n \in \mathbb{N}$, 若 $g^n = e$, 则称最小的这样的 n 为 g 的阶, 记作 $|g|$, 若 n 不存在, 则称 g 无穷阶.

若 $|G| < \infty$, 则 $\forall g \in G, |g| < \infty$.

证: $g \in G, g^2 \in G, \dots, g^n \in G \implies \{g, g^2, \dots, g^n\} \subseteq G$.

$\because |G| < \infty, \therefore |\{g, g^2, \dots, g^n\}| < \infty$

\implies 当 $n > |G|$, $\{g, g^2, \dots, g^n\}$ 中必有元素重复, 故 $\exists n_1 < n_2$, s.t. $g^{n_1} = g^{n_2} \implies e = g^{n_1} g^{-n_1} = g^{n_2} g^{-n_1} = g^{n_2 - n_1}$.

最小的这样的 $n_2 - n_1$ 即为 $|g|$, 故 $|g| < \infty$. □

定义 0.22 子群: 对群 $(G, *)$, $\emptyset \neq H \subseteq G$, 若 $(H, *)$ 亦为群, 则称 $(H, *)$ 为 $(G, *)$ 的子群, 记作 $(H, *) < (G, *)$.

例 0.9: $(\mathbb{Q}, +)$ 为群, $(\mathbb{Q}^* \equiv \mathbb{Q} - \{0\}, \times)$ 亦为群, 虽然 $\mathbb{Q}^* \subseteq \mathbb{Q}$, 但由于两者运算不同, 故 (\mathbb{Q}^*, \times) 并非 $(\mathbb{Q}, +)$ 的子群. \square

定理 0.7: $(H, *) < (G, *) \iff H \subseteq G, \forall a, b \in H, a * b \in H$ 且 $a^{-1} \in H \iff H \subseteq G, \forall a, b \in H, a * b^{-1} \in H$.

证: $(H, *) < (G, *) \iff H \subseteq G, \forall a, b \in H, a * b \in H$ 且 $a^{-1} \in H$: 由子群和群的定义即得证.

$(H, *) < (G, *) \implies H \subseteq G, \forall a, b \in H, a * b^{-1} \in H$: 由子群和群的定义即得证.

$(H, *) < (G, *) \iff H \subseteq G, \forall a, b \in H, a * b^{-1} \in H$: 取 $b = a$, 得 $a * a^{-1} = e \in H \implies H$ 有单位元.

取 $a = e$, 得 $\forall b \in H, \exists e * b^{-1} = b^{-1} \in H \implies H$ 有逆元.

H 中的运算 $*$ 的结合律继承自 G 中的 $*$ 的结合律.

综上, H 为群. 又 $\because H \subseteq G, \therefore H < G$. \square

定义 0.23 平凡子群: $(G, *)$ 和 $(\{e\}, *)$ 为 $(G, *)$ 的平凡子群.

定义 0.24 真子群(非平凡子群): 除平凡子群以外的子群.

定义 0.25 单群: 无真子群的群.

定理 0.8 任意多个子群的交为子群: $(G, *)$ 为群, $(H_i, *) < (G, *) \forall i$, 则 $(\cap_{i \in K} H_i, *) < (G, *)$.

证: $\forall a, b \in \cap_{i \in K} H_i \implies \forall i \in K, a, b \in H_i$.

$\because (H_i, *) < (G, *)$, $\therefore H_i \subseteq G, a * b^{-1} \in H_i \subseteq \cap_{i \in K} H_i \subseteq G \implies a * b^{-1} \in \cap_{i \in K} H_i \implies (\cap_{i \in K} H_i, *) < (G, *)$. \square

定理 0.9: $(H, *) < (G, *)$, 则 H 的单位元即为 G 的单位元.

证: 设 G 的单位元为 e .

$\forall a \in H, \because H < G, \therefore a \in G, e * a = a * e = a \implies e$ 为 $(H, *)$ 的单位元.

又 $\because (H, *)$ 的单位元是唯一的, 故得证. \square

例 0.10: $(\mathbb{Z}, +)$ 为群, $(\mathbb{E} = \langle 2 \rangle \equiv \{\text{偶数}\}, +)$, $(\langle 3 \rangle \equiv \{3n \mid n \in \mathbb{Z}\}, +) < (\mathbb{Z}, +)$. \square

定义 0.26 陪集(Coset): 真子群 $H < G, \forall g \in G$, 左陪集 $gH \equiv \{g * h \mid \forall h \in H\}$, 右陪集 $Hg \equiv \{h * g \mid \forall h \in H\}$.

简便起见, 以下讨论针对左陪集, 右陪集同理.

例 0.11: \mathbb{E} 在 \mathbb{Z} 中的陪集: $\forall n \in \mathbb{Z}, n\mathbb{E} = \{n + m \mid m \in \mathbb{E}\} = \begin{cases} \mathbb{E}, & n \text{ 为偶数}, \\ 1\mathbb{E} = \mathbb{O} \equiv \{\text{奇数}\}, & n \text{ 为奇数}, \end{cases}$ 故 \mathbb{E} 在 \mathbb{Z} 中仅有两个陪集: \mathbb{E} 和 \mathbb{O} , 且 $\mathbb{Z} = \mathbb{E} \cup \mathbb{O}, \mathbb{E} \cap \mathbb{O} = \emptyset$. \square

陪集的性质: 真子群 $H < G, \forall g_1, g_2 \in G$,

(1) $g_1H \cap g_2H = \emptyset$ 或 $g_1H = g_2H$.

证: 若 $g_1H \cap g_2H \neq \emptyset$, 则 $\exists c \in g_1H \cap g_2H$

$\iff c \in g_1H$ 且 $c \in g_2H$

$\iff \exists h_1, h_2, \text{ s.t. } c = g_1 * h_1 = g_2 * h_2 \implies g_2^{-1} * g_1 = h_2 * h_1^{-1}.$

又 $\because h_2 * h_1^{-1} \in H, \therefore g_2^{-1} * g_1 \in H \implies (g_2^{-1} * g_1)H = H \implies g_1H = g_2H.$ □

(2) $|gH| = |H|.$

证: 要证 $|gH| = |H|$, 只需证 $H \rightarrow gH$ 双射.

若 $ga = gb$, 则 $a = b$, 故 $H \rightarrow gH$ 单射.

$\forall c \in gH, \exists a = g^{-1}c \in H, \text{ s.t. } ga = c$, 故 $H \rightarrow gH$ 满射.

综上, $H \rightarrow gH$ 双射, 故得证. □

(3) $G = H \cup g_1H \cup g_2H \cup \dots \cup g_\alpha H$, 其中 $g_iH \cap g_jH = \emptyset \forall i \neq j$, α 仅为一个指标.

证: $G = \cup_{g \in G} gH$, 去除这些并集中的重复集合, 即得证. □

(4) $g_1H = g_2H \iff g_1^{-1} * g_2 \in H.$

证: “ \implies ”: $g_1H = g_2H \implies \exists h_1, h_2 \in H, \text{ s.t. } g_1 * h_1 = g_2 * h_2$

$\iff g_1^{-1} * g_2 = h_1 * h_2^{-1}.$

又 $\because h_1, h_2 \in H, \therefore h_1 * h_2^{-1} \in H \implies g_1^{-1} * g_2 \in H.$

“ \impliedby ”: $g_1^{-1} * g_2 \in H \implies g_1^{-1} * g_2H = H \implies g_1H = g_2H.$ □

(5)

定理 0.10 拉格朗日(Lagrange) 定理: $|G| < \infty$, 真子集 $H < G$, 则 $|H| \mid |G|^a$.

^a $a \mid b$ 表示 b 可被 a 整除.

故若 $|G|$ 为质数, 则其子群仅有 $\{e\}$ 和 G 两个, 即 G 为单群, 此时 $\forall g \in G, G = \{g, g^2, \dots, g^{|G|}\}$, 即 G 为有限阶循环交换群.

最小的有限非交换群为 6 阶.

根据 (3), 由陪集可得剖分, 由剖分可得等价关系, 由此我们引入:

(6) $g_1 \sim g_2 \iff g_1^{-1} * g_2 \in H.$

例 0.12: 群 $(\mathbb{Z}, -)$, 可分为两个子群: $(\mathbb{E}, -)$ 和 $(\mathbb{O}, -)$, 其中 $\mathbb{E} \cap \mathbb{O} = \emptyset$, 故由这两个子群可得 \mathbb{Z} 的一个剖分, 这两个子群中的元素各存在等价关系: $n \sim m \iff n - m \in \mathbb{E}.$ □

定理 0.11 正规子群: 若 $gH = Hg$, 则 $\frac{G}{H}$ 与 G 和 H 具有相同的代数结构, 此时称 H 为 G 的正规子群.

定义 0.27 商群: H 为 G 的正规子群, 商群: $\frac{G}{H} = \{[g] \equiv gH \mid g \in G\}$.

问题 0.1: $\frac{G}{H}$ 与 G 和 H 是否或在何种条件下具有相同的代数结构? □

答: $\frac{G}{H}$ 与 G 和 H 具有相同的代数结构, 即 $\forall [g_1], [g_2] \in \frac{G}{H}, [g_1] * [g_2] = [g_1 * g_2] \in \frac{G}{H}$,

即存在映射 $\frac{G}{H} * \frac{G}{H} \rightarrow \frac{G}{H}, ([g_1], [g_2]) \mapsto [g_1 * g_2]$,

即若 $g_1 \sim g'_1, g_2 \sim g'_2$, 则 $g_1 * g_2 \sim g'_1 * g'_2$,

即若 $g_1 H = g'_1 H, g_2 H = g'_2 H$, 则 $(g_1 * g_2)H = (g'_1 * g'_2)H$.

$\because g_1 H = g'_1 H, \therefore \exists h_1, h'_1 \in H, \text{ s.t. } g_1 h_1 = g'_1 h'_1 \iff g_1 = g'_1 * h'_1 * h_1^{-1};$

$\because g_2 H = g'_2 H, \therefore \exists h_2, h'_2 \in H, \text{ s.t. } g_2 h_2 = g'_2 h'_2 \iff g_2 = g'_2 * h'_2 * h_2^{-1}$

$\implies g_1 * g_2 = g'_1 * h'_1 * h_1^{-1} * g'_2 * h'_2 * h_2^{-1}.$

若 $\exists h' \in H, \text{ s.t. } (h'_1 * h_1^{-1}) * g'_2 = g'_2 * h',$ 则 $g_1 * g_2 = g'_1 * g'_2 * h' * h'_2 * h_2^{-1} = g'_1 * g'_2 * h,$ 其中 $h = h' * h'_2 * h_2^{-1}$

$\implies (g_1 * g_2)H = (g'_1 * g'_2 * h)H = (g'_1 * g'_2)H.$

故当 $gH = Hg$ 时, $\frac{G}{H}$ 与 G 和 H 具有相同的代数结构. □

定理 0.12: 交换群的任一子群为正规子群.

例 0.13: $(\mathbb{Z}, +)$ 的子群均为循环群, $\langle m \rangle \equiv \{mn \mid n \in \mathbb{Z}\}, \mathbb{Z}_m \equiv \frac{\mathbb{Z}}{\langle m \rangle}$ 有 m 个等价类: $\mathbb{Z}_m = \cup_{i=0}^{m-1} [i]$, 其中 $[i] = i\langle m \rangle = \{i + mn \mid n \in \mathbb{Z}\}$. □

定义 0.28 群同态: 对群 $(G_1, *)$ 和 (G_2, \circ) , 若映射 $f: G_1 \rightarrow G_2$ 满足 $f(a * b) = f(a) \circ f(b)$ (即映射保持代数结构), 则称 f 为 G_1 到 G_2 的群同态.

(类似于集合间的映射)

定义 0.29 单同态: 单射的群同态.

定义 0.30 满同态: 满射的群同态.

定义 0.31 同构: 双射的群同态.

定理 0.13: f 为 G_1 到 G_2 的群同态, e_1 和 e_2 分别是 G_1 和 G_2 的单位元, 则 $f(e_1) = e_2$.

证: $f(e_1) = f(e_1 * e_1) = f(e_1) \circ f(e_1) \implies f(e_1) = e_2$. □

定理 0.14: f 为 G_1 到 G_2 的群同态, $f(a^{-1}) = [f(a)]^{-1}$.

证: $e_2 = f(e_1) = f(a * a^{-1}) = f(a) \circ f(a^{-1}) \implies f(a^{-1}) = [f(a)]^{-1}$. □

定义 0.32 群同态的核(Kernel): 单位元的原像. f 为 G_1 到 G_2 的群同态, e_1 和 e_2 分别是 G_1 和 G_2 的单位元, 则称 $\ker f \equiv f^{-1}(e_2) = \{a \in G_1 \mid f(a) = e_2\}$ 为 f 的核.

$\because e_1 \in \ker f, \therefore \ker f$ 必 $\neq \emptyset$.

$\ker f < G_1$.

证: $\forall a, b \in \ker f, f(a * b^{-1}) = f(a) \circ f(b^{-1}) = f(a) \circ [f(b)]^{-1} = e_2 * e_2^{-1} = e_2 \implies a * b^{-1} \in \ker f$, 故 $\ker f < G_1$. \square

定义 0.33 群同态的像: f 为 G_1 到 G_2 的群同态, 则称 $\text{Im } f \equiv f(G_1) = \{f(a) \mid a \in G_1\}$ 为 f 的像.

$\text{Im } f \in G_2$.

定理 0.15: f 单同态 $\iff \ker f = \{e_1\}$.

证: “ \implies ”: $\forall a, b \in \ker f, f(a) = f(b) = e_2$.

又 $\because f$ 单同态, $\therefore a = b = e_1$.

“ \impliedby ”: 若 $f(a) = f(b)$, 则 $e_2 = f(a) \circ [f(b)]^{-1} = f(a) \circ f(b^{-1}) = f(a * b^{-1}) \implies a * b^{-1} \in \ker f = \{e_1\}$.

又 $\because \ker f = \{e_1\}$, $\therefore a = b = e_1$, 故 f 单同态.

综上, 得证. \square

0.6 环

定义 0.34 环: 若 $(R, +, \cdot)$ 满足

$(R, +)$ 为交换群 (单位元记作 0),

(2) 结合律: $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$,

(3) 左分配律: $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$,

右分配律: $(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$,

则称 $(R, +, \cdot)$ 为环.

例 0.14: $(\mathbb{Z}, +, \times)$ 为环. \square

常用结论:

(1) $0 \cdot a = a \cdot 0 = 0$.

证: $a \cdot 0 = 0 \cdot a = (0 + 0) \cdot a = 0 * a + 0 * a = 0 * a + a * 0 \implies 0 \cdot a = a \cdot 0 = 0$. \square

(2) $(-a) \cdot b = -(a \cdot b) = a \cdot (-b)$.

证: $(-a) \cdot b + a \cdot b = [a + (-a)] \cdot b = 0 \cdot b = 0 \implies (-a) \cdot b = -(a \cdot b)$.

$a \cdot (-b) + a \cdot b = a \cdot [b + (-b)] = a \cdot 0 = 0 \implies a \cdot (-b) = -(a \cdot b)$. \square

(3) $(\sum_i a_i) \cdot (\sum_j b_j) = \sum_{i,j} a_i \cdot b_j$.

证: 由左右分配律即得证. \square

特殊的环:

(1)

定义 0.35 交换环: 若 $\forall a, b \in R, a \cdot b = b \cdot a$, 则称 R 为交换环.

(2)

定义 0.36 有单位元的环: 若 $\exists 1 \in R, \text{s.t. } \forall a \in R, 1 \cdot a = a \cdot 1 = a$, 则称 R 为有单位元的环, 称 1 为 R 的单位元.

例 0.15: $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ 交换且有单位元. □

例 0.16: $(M_{n \times n}, +, \times)^1$ 非交换, 有单位元 $I_{n \times n}$. □

例 0.17: $(\mathbb{E}, +, \times)$ 交换, 无单位元. □

定义 0.37 零因子: $0 \neq a \in R$, 若 $\exists 0 \neq b \in R, \text{s.t. } a \cdot b = 0$ 或 $b \cdot a = 0$, 则称 a 为 R 的零因子.

定义 0.38 整环: 有单位元, 交换, 无零因子的环.

定义 0.39 子环: $\emptyset \neq R_1 \subseteq R$, 若 $(R_1, +, \cdot)$ 亦为环, 则称 R_1 为 R 的子环.

$\because (R_1, +)$ 为交换群, $\therefore (R_1, +) < (R, +)$.

定理 0.16 子环的判定: R_1 为 R 的子环 $\iff \forall a, b \in R_1, a - b \in R_1, a \cdot b \in R_1$.

定理 0.17: R 为有单位元的交换环, 则 R 为整环 $\iff \forall 0 \neq r \in R, a, b \in R$, 若 $r \cdot a = r \cdot b$, 则必有 $a = b$.

证: “ \implies ”: $r \cdot a = r \cdot b \iff r \cdot (a - b) = r \cdot a - r \cdot b = 0$.

$\because r \neq 0$ 且 R 为整环 (无零因子), $\therefore a - b = 0 \implies a = b$.

“ \impliedby ”: 假设 $\exists R$ 的零因子 $a \neq 0, \text{s.t. } r_0 \cdot a_0 = 0$, 其中 $r_0 \neq 0$.

令 $r = r_0$, 若 $r \cdot a = r \cdot b = 0$, 则 $r \cdot (a - b) = 0 \implies a - b = 0$ 或 $a - b = a_0$ 或 $a - b = a_0 + a_0, \dots$, 与题设 $a = b$ 矛盾, 故假设错误, R 无零因子.

又 $\because R$ 为有单位元的交换环, $\therefore R$ 为整环.

综上, 得证. □

定义 0.40 理想: $\emptyset \neq I \subseteq R$, 若 $\forall a, b \in I, \forall r \in R, a - b \in I, r \cdot a \in I, a \cdot r \in I$, 则称 I 为 R 的理想.

¹ $M_{n \times m} \equiv \{(a_{i,j})_{m \times n} \mid a_{i,j} \in \mathbb{R}\}$.

定义 0.41 平凡理想: $(\{0\}, +, \cdot)$ 和 $(R, +, \cdot)$ 为 $(R, +, \cdot)$ 的平凡理想.

定义 0.42 单环: 只有平凡理想的环.

定理 0.18: 任意多个理想的交为理想.

证: $\because 0 \in \cap_{i \in K} I_i, \therefore \cap_{i \in K} I_i = \emptyset$.

$\because \forall a, b \in \cap_{i \in K} I_i, \therefore \forall k \in K, a, b \in I_k$.

又 $\because \forall k \in K, (I_k, +) < (R, +), \therefore \forall k \in K, a - b \in I_k \implies a - b \in \cap_{i \in K} I_i$.

$\forall k \in K, a \in I_k, \therefore I_k$ 为理想, $r \cdot a \in I_k, a \cdot r \in I_k \implies r \cdot a \in \cap_{i \in K} I_i, a \cdot r \in \cap_{i \in K} I_i$.

综上, $\cap_{i \in K} I_i$ 为 R 的理想. □

定理 0.19: 若 $I_1 \subseteq I_2 \subseteq \dots$ 是 R 中理想的升链, 则 $\cup_i I_i$ 是 R 的理想.

定义 0.43 生成理想: R 为交换环, $\emptyset \neq S \subseteq R$, 由 S 生成的理想是 R 中包含 S 的最理想, 即 R 中包含 S 的所有理想的交, 记作 $\langle S \rangle$.

证: 假设 I_0 是 R 中包含 S 的最理想, $J = \{I_k \mid k \in K\}$ 是 R 中包含 S 的所有理想的集合.

显然 $I_0 \in J \implies \cap_k I_k \subseteq I_0$.

$\because \cap_k I_k$ 为理想, 又 $\because I_0$ 为最小的理想, $\therefore |I_0| \leq |\cap_k I_k|$.

综上, 必有 $I_0 = \cap_k I_k$. □

- 由某个元素 a 生成的理想: $\langle a \rangle = \{ra \mid r \in R\}$.
- 由多个元素 $\{a_1, \dots, a_n\}$ 生成的理想: $\langle a_1, \dots, a_n \rangle = \{\sum_{i=1}^n r_i a_i \mid r_i \in R\}$.
- 由集合 S 生成的理想: $\langle S \rangle = \{\sum_{i=1}^m r_i a_i \mid r_i \in R, a_i \in S, m \in \mathbb{Z}^+\}$.

可用理想得等价关系: I 是 R 的理想, 则 $r_1 \sim r_2 \iff r_1 - r_2 \in I$, 从而得到等价关系: $[a] = a + I = \{a + r \mid r \in I\}$.

定义 0.44 商环: $\frac{R}{\sim} \equiv \{[a] \mid a \in R\}$.

$([a], [b]) \mapsto [a + b]$ 和 $([a], [b]) \mapsto [a \cdot b]$ 均为运算.

证: 要证 $([a], [b]) \mapsto [a + b]$ 和 $([a], [b]) \mapsto [a \cdot b]$ 均为运算, 即证这些映射与代表元无关,

即证 $a \sim a', b \sim b', [a'] + [b'] = [a + b], [a'] \cdot [b'] = [a \cdot b]$.

$\because a \sim a', b \sim b', \therefore a - a' \in I, b - b' \in I \implies a + b - (a' + b') = (a - a') + (b - b') \in I$
 $\implies a + b \sim a' + b'$, 故 $[a'] + [b'] = [a' + b'] = [a + b]$, $([a], [b]) \mapsto [a + b]$ 与代表无关, 是运算.

$\because a \sim a', b \sim b', \therefore a' - a \in I, b' - b \in I$.

设 $a' - a \equiv h_1 \in I, b' - b \equiv h_2 \in I$, 则 $a' \cdot b' = (a + h_1) \cdot (b + h_2) = a \cdot b + a \cdot h_2 + h_1 \cdot b + h_1 \cdot h_2$,

其中 $\because h_1, h_2 \in I, \therefore h_1 \cdot h_2 \in I$, 而 $\because I$ 为理想, $\therefore a \cdot h_2 \in I, h_1 \cdot b \in I$

$\implies a' \cdot b' - a \cdot b = a \cdot h_2 + h_1 \cdot b + h_1 \cdot h_2 \in I \implies a \cdot b \sim a' \cdot b'$, 故 $[a'] \cdot [b'] = [a' \cdot b'] = [a \cdot b]$, $([a], [b]) \mapsto [a \cdot b]$ 与代表无关, 是运算. □

定义 0.45 环同态: $(R_1, +, *)$ 和 $(R_2, +, \cdot)$ 为环, 若映射 $f: R_1 \rightarrow R_2$ 满足

$$(1) f(a + b) = f(a) + f(b),$$

$$(2) f(a \cdot b) = f(a) \cdot f(b),$$

则称 f 为 R_1 到 R_2 的环同态.

由环同态的定义, f 必为 $(R_1, +)$ 到 $(R_2, +)$ 的群同态, 故 $f(0) = 0$, $f(a^{-1}) = [f(a)]^{-1}$.

定义 0.46 核: $\ker f \equiv \{a \in R_1 \mid f(a) = 0\}$.

定义 0.47 像: $\operatorname{Im} f \equiv \{f(a) \mid a \in R_1\}$.

$$\operatorname{Im} f \subseteq R_2.$$

定理 0.20: $\ker f$ 为理想.

证: $\forall a, b \in \ker f, \forall r \in R_1, f(a - b) = f(a + (-b)) = f(a) + f(-b) = f(a) - f(b) = 0 - 0 = 0 \implies a - b \in \ker f$.

$$f(r \cdot a) = f(r) \cdot f(a) = f(r) \cdot 0 = 0 \implies r \cdot a \in I.$$

同理 $a \cdot r \in I$.

综上, $\ker f$ 为 R_1 的理想. □

定义 0.48 单同态: 单射的环同态.

$$\text{单同态} \iff \ker f = \{0\}.$$

定义 0.49 满同态: 满射的环同态.

$$\text{满同态} \iff \operatorname{Im} f = R_2.$$

定义 0.50 同构: 双射的环同态. 若环 R_1, R_2 之间 \exists 同构, 则称 R_1 与 R_2 同构, 称为 $R_1 \approx R_2$.

定义 0.51 典范同态: I 为 R 的理想, $\pi: R \rightarrow \frac{R}{I}, a \mapsto [a]$ 称为典范同态.

典范同态是满同态.

例 0.18: $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ 为环.

$$\langle 2 \rangle = \mathbb{O} \equiv \{2n \mid n \in \mathbb{Z}\}.$$

$$\langle 3 \rangle \equiv \{3n \mid n \in \mathbb{Z}\}.$$

$$\langle 2, 3 \rangle \equiv \{2n + 3m \mid n, m \in \mathbb{Z}\} = \mathbb{Z}.$$

$$\langle 1 \rangle \equiv \mathbb{Z}.$$

\mathbb{Z} 的任何理想均由一个数生成. 更准确地说, 若 I 为 \mathbb{Z} 的理想, 则 $I = \langle n \rangle$, 其中 n 为 I 中最小的正整数. □

(此处其实用到了这样一个定理: 任一由自然数组成的集合均存在最小正整数.)

证: 若 $p \in \mathbb{Z}$, $p \in \langle n \rangle$, 不妨假设 $p > n$, 设 $p = kn + r$, 其中 $0 \leq r < n$.

若 $r \neq 0$, 则 $r = p - kn \in I$, 但 $0 \leq r < n$ 而 n 为 $\langle n \rangle$ 中最小的正整数矛盾, 故 $r = 0$, $p = kn$. □

定义 0.52 剩余类环: $\mathbb{Z}_n \equiv \frac{\mathbb{Z}}{\langle n \rangle} = \{[0], [1], \dots, [n-1]\}$.

例 0.19: $\mathbb{Z}_6 \equiv \frac{\mathbb{Z}}{\langle 6 \rangle} = \{[0], [1], [2], [3], [4], [5]\}$, 其中 $\langle 6 \rangle \equiv \{6n \mid n \in \mathbb{Z}\}$, $[m] = \{m + 6n \mid n \in \mathbb{Z}\}$.

$\therefore [2] \cdot [3] = [6] = [0]$, $\therefore \mathbb{Z}_6$ 有零因子. □

0.7 域

定义 0.53 域: 若 $(F, +, \cdot)$ 满足

$(F, +)$ 为交换群 (单位元记作 0),

(2) (F^*, \cdot) 为交换群 (单位元记作 1), 其中 $F^* = F - \{0\}$,

(3) 左分配律: $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$,

右分配律: $(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$,

则称 $(F, +, \cdot)$ 为域.

由于有 0 和 1 这两个元素, $|F| \geq 2$.

当 $|F| = 2$ 时, $F = \{0, 1\} \approx \mathbb{Z}_2 = \frac{\mathbb{Z}}{\langle 2 \rangle}$.

例 0.20: \mathbb{Z}_2 是最小的有限域.

\mathbb{Q} 为最小的无限域. □

定义 0.54 有理数: $\mathbb{Q} = \{\frac{m}{n} \mid n \neq 0, n, m \in \mathbb{Z}\}$, 即 $\forall q \in \mathbb{Q}, \exists m, n \in \mathbb{Z}, n \neq 0, \text{ s.t. } q = \frac{m}{n}$.

定义 0.55 域的特征: $\text{char } F \equiv$ 使得 $n \cdot 1 = \overbrace{1 + 1 + \dots + 1}^{n \text{ 个 } 1 \text{ 相加}} = 0$ 的最小正整数.

例 0.21: $\text{char } \mathbb{Z}_2 = 2$.

$\text{char } \mathbb{Q} = \infty$. □

$p = \text{char } F$ 必为质数, 否则 $\exists m, n < p, \text{ s.t. } 0 = p \cdot 1 = (nm) \cdot 1 = (m \cdot 1) \cdot (n \cdot 1) \implies n \cdot 1 = 0$ 或 $m \cdot 1 = 0$ 与域的特征的定义矛盾.

当 p 为质数且 $\text{char } \mathbb{Z}_p = p$ 时, \mathbb{Z}_p 为域.

定义 0.56 域同态: $(F_1, +, \cdot)$ 和 $(F_2, +, \cdot)$ 为域, 若映射 $f: F_1 \rightarrow F_2$ 满足

(1) $f(a + b) = f(a) + f(b)$,

(2) $f(a \cdot b) = f(a) \cdot f(b)$,

则称 f 为 F_1 到 F_2 的域同态.

域同态的性质:

(1) $f(0) = 0$.

(2) $f(1) = 1$ 或 0 .

证: $f(1) = f(1 \cdot 1) = f(1) \cdot f(1) \implies f(1) - f(1) \cdot f(1) = 0 \implies f(1) = 0$ 或 1 . □

(3) 若 $f(1) = 0$, 则 $\forall r \in F_1, f(r) = f(r \cdot 1) = f(r) \cdot f(1) = f(r) \cdot 0 = 0$.

(4) 若 $f(1) = 1$, 则 $\ker f = \{0\}$, 此时 f 单射.

证: $\forall r \in F^*, r^{-1} \in F^*, 1 = f(1) = f(r \cdot r^{-1}) = f(r) \cdot f(r^{-1}) \implies f(r) \neq 0, f(r^{-1}) \neq 0$, 故 $\forall r \neq 0, f(r) \neq 0$, $\ker f = \{0\}$. □

Chapter 1

向量空间

1.1 向量空间

定义 1.1 向量空间: 交换群 $(V, +)$ 和域 F , 数乘映射 $\alpha: F \times V \rightarrow V$, 若满足

$$\alpha(r, u + v) = \alpha(r, u) + \alpha(r, v) \text{ (可简写为 } r(u + v) = ru + rv),$$

$$(2) \alpha(r + t, u) = \alpha(r, u) + \alpha(t, u) \text{ (可简写为 } (r + t)u = ru + tu),$$

$$(3) \alpha(r \cdot t, u) = \alpha(r, \alpha(t, u)) \text{ (可简写为 } (rt)u = r(tu)),$$

$$(4) \text{ 有单位元: } \exists 1 \in F, \text{ s.t. } \alpha(1, u) = u \text{ (可简写为 } 1u = u),$$

则称 V 是 F 上的向量空间.

例 1.1 直角坐标系: $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ 为域, $(\mathbb{R}^2 \equiv \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{R}\}, +)$ 为交换群, 满足

$$(1) r((x_1, y_1) + (x_2, y_2)) = r(x_1 + x_2, y_1 + y_2) = (rx_1 + rx_2, ry_1 + ry_2) = (rx_1, ry_1) + (rx_2, ry_2) = r(x_1, y_1) + r(x_2, y_2),$$

$$(2) (r + t)(x, y) = ((r + t)x, (r + t)y) = (rx + tx, ry + ty) = (rx, ry) + (tx, ty) = r(x, y) + t(x, y),$$

$$(3) (rt)(x, y) = (rtx, rty) = r(tx, ty) = r(t(x, y)),$$

$$(4) 1(x, y) = (x, y),$$

故 \mathbb{R}^2 为 \mathbb{R} 上的向量空间. □

$0v = 0$. (注意两个 0 的区别, 等号左边的 0 为域 F 中的零元, 等号右边的 0 为 V 中的零向量.)

证: $0v = (0 + 0)v = 0v + 0v \implies 0v = 0$. □

$r \in F, 0 \in V$, 则 $r0 = 0$.

证: $r0 = r(0 + 0) = r0 + r0 \implies r0 = 0$. □

$$-1v = -v.$$

证: $-1v = -(1v) = -v$. □

例 1.2: \mathbb{R}^2 为 \mathbb{R} 上的向量空间.

\mathbb{R}^2 为 \mathbb{Q} 上的向量空间.

\therefore 对 $c \in \mathbb{C}, v \in \mathbb{R}^2, cv \notin \mathbb{R}^2, \therefore \mathbb{R}^2$ 不是 \mathbb{C} 上的向量空间. □

例 1.3: $F^n \equiv \{(r_1, \dots, r_n) \mid r_i \in F\}$, 满足 $(r_1, \dots, r_n) + (l_1, \dots, l_n) = (r_1 + l_1, \dots, r_n + l_n)$, $r(r_1, \dots, r_n) = (rr_1, \dots, rr_n)$, 故 F^n 为 F 上的向量空间. \square

证: $\because r((r_1, \dots, r_n) + (l_1, \dots, l_n)) = r(r_1 + l_1, \dots, r_n + l_n) = (rr_1 + rl_1, \dots, rr_n + rl_n) = (rr_1, \dots, rr_n) + (rl_1, \dots, rl_n) = r(r_1, \dots, r_n) + r(l_1, \dots, l_n)$,

且 $(r+t)(r_1, \dots, r_n) = ((r+t)r_1, \dots, (r+t)r_n) = (rr_1 + tr_1, \dots, rr_n + tr_n) = (rr_1, \dots, rr_n) + (tr_1, \dots, tr_n) = r(r_1, \dots, r_n) + t(r_1, \dots, r_n)$,

且 $(r \cdot t)(r_1, \dots, r_n) = (rtr_1, \dots, rtr_n) = r(tr_1, \dots, tr_n) = r(t(r_1, \dots, r_n))$,

且 $1(r_1, \dots, r_n) = (r_1, \dots, r_n)$,

$\therefore F^n$ 为 F 上的向量空间. \square

1.2 子空间

定义 1.2 子空间: $\emptyset \neq S \subseteq V$, 若 S 为 V 的子群, 且在相同的数乘下构成 F 上的向量空间, 则称 S 是 V 的子空间.

定理 1.1 子空间的判定(课本定理1.1): S 为 V 的子空间 $\iff \forall a, b \in S, \forall r, t \in F, ra + tb \in S$ (即线性运算封闭).

证: “ \implies ”: $\because ra \in S, -tb \in S$ 且 S 为 V 的子群, $\therefore ra - (-tb) = ra + tb \in S$.

“ \impliedby ”: 令 $r = 1, t = -1$, 有 $a - b \in S \implies S < V$.

令 $t = 0$, 有 $ra \in S$, 故 S 为 V 的子空间.

综上, 得证. \square

子空间的交是子空间.

证: 设 S_1, \dots, S_n 为 V 的子空间, 则 S_1, \dots, S_n 为 V 的子群 $\implies \cap_{i=1}^n S_i$ 为 V 的子群.

$\forall u, v \in \cap_{i=1}^n S_i, \forall k, u, v \in S_k \implies u, v$ 满足与 F 中向量相同的数乘映射.

综上, 得证. \square

若 S, T 是 V 的子空间, 则 $S + T \equiv \{u + v \mid u \in S, v \in T\}$ 为 V 的子空间.

证: $\forall w_1, w_2 \in S + T, r, t \in F$,

$w_1 \in S + T \implies w_1 = u_1 + v_1, u_1 \in S, v_1 \in T$,

$w_2 \in S + T \implies w_2 = u_2 + v_2, u_2 \in S, v_2 \in T$

$\implies rw_1 + tw_2 = r(u_1 + v_1) + t(u_2 + v_2) = (ru_1 + tu_2) + (rv_1 + tv_2)$, 其中 $ru_1 + tu_2 \in S, rv_1 + tv_2 \in T \implies rw_1 + tw_2 \in S + T$, 故 $S + T$ 为 V 的子空间. \square

1.3 生成集和线性无关

定义 1.3 生成子空间和生成集: $\emptyset \neq S \subseteq V$, S 的生成子空间 $\langle S \rangle \equiv$ 包含 S 的最小子空间 $= \{\sum_{i=1}^n r_i u_i \mid r_i \in F, u_i \in S, n \in \mathbb{N}\}$ 其中称 S 为生成集.

例 1.4: 向量空间 \mathbb{R}^2 中,

$$S_x = \langle \{(1, 0)\} \rangle = \{(x, 0) \mid x \in \mathbb{R}\} = x \text{ 轴},$$

$$S_y = \langle \{(0, 1)\} \rangle = \{(0, y) \mid y \in \mathbb{R}\} = y \text{ 轴},$$

$$\langle \{(1, 0), (0, 1)\} \rangle = \langle \{(1, 1), (1, -1)\} \rangle = \mathbb{R}^2, \text{ 故对同一生成子空间, 生成集不唯一.}$$

□

定义 1.4 线性无关: 非零元 u_1, \dots, u_m , 若 $r_1 u_1 + \dots + r_m u_m = 0 \implies r_1 = \dots = r_m = 0$, 则称 u_1, \dots, u_m 线性无关.

若 S 中任意有限个元素线性无关, 则称 S 线性无关.

例 1.5: $(1, 0)$ 与 $(0, 1)$ 线性无关.

□

$$\text{证: } r_1(1, 0) + r_2(0, 1) = (r_1, r_2) = 0 = (0, 0) \implies r_1 = 0, r_2 = 0.$$

□

例 1.6: \mathbb{R}^2 上线性无关, 即两非零元夹角非零.

□

单个非零元 v 线性无关.

证: $rv = 0$ 且 $v \neq 0 \implies r = 0$, 故 v 线性无关.

□

定义 1.5 线性相关: u_1, \dots, u_m , 若 \exists 不全为零的 r_1, \dots, r_m , s.t. $r_1 u_1 + \dots + r_m u_m = 0$, 则称 u_1, \dots, u_m 线性相关.

若 u, v 线性相关, 则两者共线.

证: $\because u, v$ 线性无关, $\therefore \exists r, t$ 不全为零, s.t. $ru + tv = 0 \implies ru = -tv$.

不妨设 $0 \neq r \in F$, 则 $ru = -tv \implies u = r^{-1}ru = -r^{-1}tv = -\frac{t}{r}v$

□

定义 1.6 线性表示: v 可由 u_1, \dots, u_n 线性表示 $\iff \exists r_1, \dots, r_n \in F$, s.t. $v = \sum_{i=1}^n r_i u_i$.

定理 1.2 (课本定理1.6): S 线性无关 $\iff \langle S \rangle$ 中的每个向量可由 S 中元素唯一地线性表示 $\iff S$ 中任一向量不能由 S 中其余向量线性表示.

证: 设 $S = \{u_1, \dots, u_m\}$.

第一个 “ \implies ”: $v \in \langle S \rangle$, 则 v 可由 S 中的元素线性表示, 即 $\exists r_1, \dots, r_m$, s.t. $v = r_1 u_1 + \dots + r_m u_m$.

要证这种线性表示是唯一的, 假设 v 的另一种线性表示为 $v = r'_1 u_1 + \dots + r'_m u_m$.

$v - v = (r_1 - r'_1)u_1 + \dots + (r_m - r'_m)u_m = 0$, 又 $\because S$ 线性无关, 即 u_1, \dots, u_m 线性无关, $\therefore r_1 - r'_1 = \dots = r_m - r'_m = 0 \implies r'_1 = r_1, \dots, r'_m = r_m$, 故两种线性表示相同.

第一个 “ \impliedby ”: $0 \in \langle S \rangle$, $\because 0 = 0u_1 + \dots + 0u_m$ 是且是 0 唯一的线性表示, $\therefore S$ 线性无关.

第二个 “ \implies ”: 不妨假设 u_1 可由 u_2, \dots, u_m 线性表示, 即 $u_1 = t_2 u_2 + \dots + t_m u_m$.

若 $r_1 u_1 + \dots + r_m u_m = 0$, 则 $r_1 = \dots = r_m = 0$ 或 $r_1 \neq 0, r_2 = -r_1 t_2, \dots, r_m = -r_1 t_m$, 从而 S 线性相关, 矛盾, 故假设错误, u_1 不可由 u_2, \dots, u_m 线性表示.

第二个 “ \impliedby ”: 假设 S 线性相关, 则 \exists 不全为零的 r_1, \dots, r_m , s.t. $r_1 u_1 + \dots + r_m u_m = 0$, 不妨设 r_1 非零, 则 $u_1 = -\frac{r_2}{r_1} u_2 - \dots - \frac{r_m}{r_1} u_m$, 即 u_1 可由 S 中其余向量线性表示, 矛盾, 故假设错误, S 线性无关.

□

定理 1.3 (课本定理1.7): $\emptyset \neq S \subseteq V$, 下列等价:

- (1) S 线性无关, 且 $V = \langle S \rangle$.
- (2) $\forall v \in V$, 可用 S 中元素唯一地线性表示.
- (3) S 是 V 的极小生成集 (即 S 去除任意元素都无法生成 V , 或 S 的任意真子集都无法生成 V).
- (4) S 是 V 的极大线性无关集 (即 S 增加任意元素都线性相关, $\forall u \in V$ 且 $u \notin S$, $S \cup \{u\}$ 线性相关).

证: 由定理 1.2 证得 (1)(2) 等价.

设 $S = \{u_1, \dots, u_m\}$.

(1) \implies (3): 假设 $\exists S' \subsetneq S$, s.t. $V = \langle S' \rangle$, 则 $\forall v \in S - S' \subseteq V$, $v = \sum_{i=1}^m r_i u_i$, 其中 $r_i \in F$, $u_i \in S'$, $m \in \mathbb{N}$, 即 v 可由 S 中的部分向量线性表示, 与 S 线性无关矛盾, 故假设错误, S 是 V 的极小生成集.

(3) \implies (1): S 为 V 的生成集, 即 $V = \langle S \rangle$.

假设 S 线性相关, 即 $\exists r_1, \dots, r_m$ 不全为零, s.t. $\sum_{i=1}^m r_i u_i = 0$, 不妨设 $r_1 \neq 0$, 则 $u_1 = -\frac{r_2}{r_1} u_2 + \dots + \frac{r_m}{r_1} u_m$, 则 $S - \{u_1\}$ 仍可以生成 V , 矛盾, 故假设错误, S 线性无关.

(1) \implies (4): 假设 S 不是极大线性无关集, 则 $\exists v \in V \setminus \langle S \rangle$, s.t. $S \cup \{v\}$ 线性无关.

又 $\because V = \langle S \rangle$, $\therefore v = \sum_{i=1}^m r_i u_i$, 其中 $r_i \in F$, $u_i \in S$, $m \in \mathbb{N}$, 即线性无关集 $S \cup \{v\}$ 中的向量 v 可由其中的部分向量线性表示, 与 $S \cup \{v\}$ 线性无关矛盾, 故假设错误, S 是极大线性无关集.

(4) \implies (1): $\because S$ 是 V 的极大线性无关集, $\therefore S$ 线性无关.

假设 $V \neq \langle S \rangle$, $\exists v \in V \setminus \langle S \rangle$, s.t. v 无法由 S 中的元素线性表示 $\implies S \cup \{v\}$ 为线性无关集, 与 S 为最大线性无关集矛盾, 故假设错误, $V = \langle S \rangle$.

综上, 得证. □

定义 1.7 基: 任何生成向量空间 V 的线性无关集. 基的阶数称为 V 的维数, 记作 $\dim V$.

定理 1.4 (课本定理1.12): 向量空间的任何基都有相同的阶, 即 $\dim V$ 不依赖于基的选取.

例 1.7: $e_1 = (1, 0, \dots, 0)$, $e_2 = (0, 1, \dots, 0)$, \dots , $e_n = (0, 0, \dots, 1)$ 为 F^n 的一组基. □

证: $r_1 e_1 + \dots + r_n e_n = (r_1, \dots, r_n) = 0 \implies r_1 = \dots = r_n = 0$, 故 e_1, \dots, e_n 线性无关.

又 $\langle \{e_1, \dots, e_n\} \rangle = \{r_1 e_1 + \dots + r_n e_n = (r_1, \dots, r_n) \mid r_i \in F, \text{ 其中 } i = 1, \dots, n\} = F^n$, 故得证. □

找基的方法:

- (1) 若 $0 \neq u_1 \in V$, 则 $\{u_1\}$ 线性无关.
- (2) 若 $u_2 \in V \setminus \langle u_1 \rangle$ 且 u_2 与 u_1 线性无关, 则 $\{u_1, u_2\}$ 线性无关.
- (3) 重复以上操作, 直至无法找到新的线性无关元素, 即得到极大线性无关集, 此即向量空间的基.

定理 1.5 (课本定理1.9): 线性无关集 $I \subseteq V$, S 是 V 的生成集, 且 $I \subseteq S$, 则 $\exists V$ 的基 \mathcal{B} , s.t. $I \subseteq \mathcal{B} \subseteq S$.

1.4 直和

定义 1.8 直和: (1) **外直和:** 若 V_1, \dots, V_n 是 F 上的向量空间, $V_1 \oplus \dots \oplus V_n \equiv \{(v_1, \dots, v_n) \mid v_i \in V_i\}$, 满足

$$\begin{aligned} - (v_1, \dots, v_n) + (u_1, \dots, u_n) &= (v_1 + u_1, \dots, v_n + u_n), \\ - r(v_1, \dots, v_n) &= (rv_1, \dots, rv_n), \end{aligned}$$

则 $V_1 \oplus \dots \oplus V_n$ 为 F 的向量空间, $V_1 \oplus \dots \oplus V_n$ 为 V_1, \dots, V_n 的**外直和**.

(2) **内直和:** V 是 F 上的向量空间, V_1, \dots, V_n 是 V 的子空间, 若 $V = \sum_{i=1}^n V_i$, 其中 $v_i \in V_i$ 且 $V_i \cap (\cup_{j \neq i} V_j) = \{0\}$, 则称 V 为 V_1, \dots, V_n 的**内直和**, 记作 $V = \bigoplus_{i=1}^n V_i$, 称 V_i 为**直和项**.

内/外直和的关系: $V = V_1 \oplus \dots \oplus V_n$, $V'_1 = \{(v_1, 0, \dots, 0) \mid v_i \in V_i\}, \dots, V'_n = \{(0, 0, \dots, v_n) \mid v_n \in V_n\}$ 是 V 的子空间, 则 $V = \sum_{i=1}^n V'_i$ 且 $V'_i \cap (\cup_{j \neq i} V'_j) = \{0\} \implies V_i = \bigoplus_{i=1}^n V'_i$, 故内/外直和是等价的, 以下我们不明确区分内/外直和, 均用内直和.

例 1.8: $\mathbb{R}^2 = S_x \oplus S_y$. □

定理 1.6 (课本定理1.5): $\{V_i \mid i \in J\}$ 是 V 的子空间集合, $V = \sum_{i \in J} V_i$, 则下列等价:

- (1) $V = \bigoplus_{i \in J} V_i$.
- (2) $V_i \cap (\sum_{j \neq i} V_j) = \{0\}$.
- (3) $0 = 0 + \dots + 0$ 是 0 的唯一分解式.
- (4) V 中任一向量 v 具有唯一分解式 $v = v_1 + \dots + v_n$, 分解式中的有限个非零元 $v_i \in V_i$ 组成的集合称为**支集**.

证: (1) \iff (2): 由直积的定义即得证.

(2) \implies (3): 假设 $0 = s_{i1} + \dots + s_{in}$ 且 s_{ij} 不全为零, 不妨设 $s_{i1} \neq 0$, 则 $V_{i1} \ni s_{i1} = -s_{i2} - \dots - s_{in} \in \sum_{j=2}^n V_{ij} \implies s_{i1} \in V_{i1} \cap (\cup_{j=2}^n V_{ij})$, $s_{i1} \neq 0$ 与 $V_{i1} \cap (\cup_{j=2}^n V_{ij}) = \{0\}$ 矛盾, 故假设错误, $0 = 0 + \dots + 0$ 是 0 的唯一分解式.

(3) \implies (4): $\forall v \in V, v = u_1 + \dots + u_n$, 其中 $u_i \in V_i$.

假设 $v = w_1 + \dots + w_m$, 其中 $w_i \in V_i$.

$0 = v - v = u_1 + \dots + u_n - w_1 - \dots - w_m$, 将属于相同子空间的元素合并到一起, 得 $0 = (u_{t_1} - w_{t_1}) + \dots + (u_{t_k} - w_{t_k}) + \dots + (u_{t_n} - w_{t_n})$, 由 (2) 知 $u_{t_i} = w_{t_i}$, 故 v 具有唯一分解式 $v = v_1 + \dots + v_n$.

(4) \implies (2): 假设 $V_i \cap (\cup_{j \neq i} V_j) \neq \{0\}$, 则 $V_i \cap (\sum_{j \neq i} V_j) \supsetneq \{0\}$, 即 $\exists 0 \neq u \in V_i \cap (\cup_{j \neq i} V_j)$,

不妨设 $u \in V_1$ 且 $u \in V_2$, 则 $v = v_1 + \dots + v_n = (v_1 + u) + (v_2 - u) + \dots + v_n$, 其中 $v_i \in V_i$ 且 $v_1 + u \in V_1$, $v_2 - u \in V_2$, v 的分解式不唯一, 矛盾, 故假设错误, $V_i \cap (\sum_{j \neq i} V_j) = \{0\}$.

综上, 得证. □

定理 1.7 (课本定理1.8): $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$ 是向量空间 V 的基 $\iff V = \langle v_1 \rangle \oplus \dots \oplus \langle v_n \rangle$.

证: “ \implies ”: $\because \mathcal{B}$ 为 V 的基, $\therefore V = \langle \mathcal{B} \rangle = \langle v_1, \dots, v_n \rangle = \{\sum_{i=1}^n r_i v_i \mid r_i \in F\} = \langle v_1 \rangle + \dots + \langle v_n \rangle$.

$\because \mathcal{B}$ 为 V 的基, $\therefore v_1, \dots, v_n$ 线性无关 $\implies \forall 0 \neq u \in \langle v_i \rangle, u = r_i v_i$ 且无法由 $\{v_j \mid j \neq i\}$ 线性表示 $\implies u \notin V_i \cap (\cup_{j \neq i} V_j)$.

又 $\because 0 = 0v_i \in \langle v_i \rangle$ 且 $0 = \sum_{j \neq i} 0v_j \implies 0 \in V_i \cap (\cup_{j \neq i} V_j)$, $\therefore V_i \cap (\cup_{j \neq i} V_j) = \{0\}$.

故 $V = \langle v_1 \rangle \oplus \dots \oplus \langle v_n \rangle$.

“ \Leftarrow ”: 一方面, $V = \langle v_1 \rangle + \cdots + \langle v_n \rangle = \langle v_1, \cdots, v_n \rangle = \langle \mathcal{B} \rangle$;

另一方面, 假设 $\{v_1, \cdots, v_n\}$ 线性相关, 则 \exists 不全为零的 r_1, \cdots, r_n , s.t. $\sum_i r_i v_i = 0$,

不妨设 $r_i \neq 0$, 则 $r_i v_i = -\sum_{j \neq i} r_j v_j \Rightarrow 0 \neq r_i v_i \in V_i$ 且 $r_i v_i = -\sum_{j \neq i} r_j v_j \in \cup_{j \neq i} V_j \Rightarrow r_i v_i \in V_0 \cap (\cup_{j \neq i} V_j) \Rightarrow V_0 \cap (\cup_{j \neq i} V_j) \neq \{0\}$, 与直和的定义矛盾, 故假设错误, $\{v_1, \cdots, v_n\}$ 线性无关.

故 $\mathcal{B} = \{v_1, \cdots, v_n\}$ 是 V 的基.

综上, 得证. □

定理 1.8 (课本定理1.4): S 为 V 的子空间, 则 $\exists V$ 的子空间 S^c , s.t. $V = S \oplus S^c$, 称 S^c 为 S 的补空间.

证: \mathcal{B}_1 为 S 的基, 则 \mathcal{B}_1 为 V 中的线性无关集.

\mathcal{B}_1 总可以扩张 (即添加一些元素) 成 V 的基, 即 $\exists \mathcal{B}_2$, s.t. $\mathcal{B}_1 \cap \mathcal{B}_2 = \emptyset$, $\mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2$ 线性无关且 $V = \langle \mathcal{B}_1 \rangle + \langle \mathcal{B}_2 \rangle \Rightarrow V = \langle \mathcal{B}_1 \rangle \oplus \langle \mathcal{B}_2 \rangle$, 故 $S^c = \langle \mathcal{B}_2 \rangle$. □

例 1.9: $\mathbb{R}^2 = S_x \oplus S_y = S_l \oplus S_{l'}$, 其中 S_l 和 $S_{l'}$ 分别为过原点、不共线的直线 l 和 l' . □

补空间总存在, 但不唯一.

定理 1.9 (课本定理1.13): (1) \mathcal{B} 是 V 的基, 若 $\mathcal{B} = \mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2$ 且 $\mathcal{B}_1 \cap \mathcal{B}_2 = \emptyset$, 则 $V = \langle \mathcal{B}_1 \rangle \oplus \langle \mathcal{B}_2 \rangle$.

(2) $V = S \oplus T$, 若 \mathcal{B}_1 是 S 的基, \mathcal{B}_2 是 T 的基, 则 $\mathcal{B}_1 \cap \mathcal{B}_2 = \emptyset$, $\mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2$ 是 V 的基.

证: (1) $\because \mathcal{B}$ 是 V 的基, $\therefore \forall u \in V, u = \sum_{i=1}^k r_i v_i$, 其中 $r_i \in F, v_i \in \mathcal{B}, k \in \mathbb{N}$.

$\langle \mathcal{B}_1 \rangle = \{\sum_{i=1}^n r_i v_i \mid r_i \in F, v_i \in \mathcal{B}_1, n \in \mathbb{N}\}, \langle \mathcal{B}_2 \rangle = \{\sum_{i=1}^n r_i v_i \mid r_i \in F, v_i \in \mathcal{B}_2, n \in \mathbb{N}\}.$

$u = \sum_{i=1}^t r_i v_i + \sum_{i=t+1}^k r_i v_i$, 其中 $v_1, \cdots, v_t \in \mathcal{B}_1, v_{t+1}, \cdots, v_k \in \mathcal{B}_2 \Rightarrow V = \langle \mathcal{B}_1 \rangle + \langle \mathcal{B}_2 \rangle$.

$\forall u \in \langle \mathcal{B}_1 \rangle \cap \langle \mathcal{B}_2 \rangle, u \in \langle \mathcal{B}_1 \rangle \Rightarrow u = \sum_{i=1}^n r_i v_i$, 其中 $r_i \in F, v_i \in \mathcal{B}_1$,

且 $u \in \langle \mathcal{B}_2 \rangle \Rightarrow u = \sum_{i=1}^n l_i w_i$, 其中 $l_i \in F, w_i \in \mathcal{B}_2$

$\Rightarrow 0 = u - u = \sum r_i v_i - \sum l_i w_i$.

又 $\because \mathcal{B}$ 为基, $\mathcal{B} = \mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2$ 且 $\mathcal{B}_1 \cap \mathcal{B}_2 = \emptyset, \therefore r_i, w_i$ 线性无关 $\Rightarrow r_i = l_i = 0 \forall i \Rightarrow u = 0$.

综上, $V = \langle \mathcal{B}_1 \rangle \oplus \langle \mathcal{B}_2 \rangle$.

(2) $V = S \oplus T \iff V = S + T$ 且 $S \cap T = \{0\}$.

假设 $\exists 0 \neq v \in \mathcal{B}_1 \cap \mathcal{B}_2$, 则 $\langle v \rangle = S \cap T = \{0\} \Rightarrow v = 0$, 矛盾, 故假设错误, $\mathcal{B}_1 \cap \mathcal{B}_2 = \emptyset$.

$\because V = S + T, \therefore \forall u \in V, u = u_1 + u_2$, 其中 $u_1 \in S, u_2 \in T$.

$\because \mathcal{B}_1$ 是 S 的基, \mathcal{B}_2 是 T 的基, $\therefore u_1 = \sum_{i=1}^k r_i v_i, u_2 = \sum_{i=k+1}^n r_i v_i$, 其中 $r_i \in F$, 对 $i = 1, \cdots, k, v_i \in \mathcal{B}_1$, 对 $i = k+1, \cdots, n, v_i \in \mathcal{B}_2$

$\Rightarrow u = \sum_{i=1}^n r_i v_i$, 其中 $r_i \in F, v_i \in \mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2$, 即 $V = \langle \mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2 \rangle$.

假设 $\mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2$ 线性相关, 则 $\exists r_i \in F$ 不全为零, $\sum_{i=1}^n r_i v_i = \sum_{i=1}^k r_i v_i + \sum_{i=k+1}^n r_i v_i = 0$, 其中 $r_i \in F$, 对 $i = 1, \cdots, k, v_i \in \mathcal{B}_1$, 对 $i = k+1, \cdots, n, v_i \in \mathcal{B}_2$.

$\because \mathcal{B}_1$ 和 \mathcal{B}_2 为基, $\therefore \mathcal{B}_1$ 和 \mathcal{B}_2 线性无关 $\Rightarrow \sum_{i=1}^k r_i v_i \neq 0, \sum_{i=k+1}^n r_i v_i \neq 0$, 与 $0 = 0 + \cdots + 0$ 是 0 的唯一分解式矛盾, 故假设错误, $\mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2$ 线性无关 $\Rightarrow \mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2$ 是 V 的基.

综上, 得证. □

定理 1.10 (课本定理1.14): S, T 为 V 的子空间, $\dim S + \dim T = \dim(S \cap T) + \dim(S + T)$.
 特别地, 若 T 为 S 的补空间, 则 $\dim S + \dim T = \dim(S \oplus T)$.

证: 设 $S \cap T$ 的基为 \mathcal{B} .

$\because S \cap T$ 为 S 的子空间, \therefore 可将 \mathcal{B} 扩张成 S 的基 $\mathcal{A} \cup \mathcal{B}$, 其中 $\mathcal{A} \cap \mathcal{B} = \emptyset$.

$\because S \cap T$ 为 T 的子空间, \therefore 可将 \mathcal{B} 扩张成 T 的基 $\mathcal{B} \cup \mathcal{C}$, 其中 $\mathcal{B} \cap \mathcal{C} = \emptyset$.

接下来需要用到这样一个事实: $\mathcal{A} \cup \mathcal{B} \cup \mathcal{C}$ 是 $S + T$ 的基. 所以先来证明它:

证: $\forall w \in S + T, w = u + v$, 其中 $u \in S, v \in T \implies u \in \langle \mathcal{A} \cup \mathcal{B} \rangle, v \in \langle \mathcal{B} \cup \mathcal{C} \rangle$, 故 $\langle \mathcal{A} \cup \mathcal{B} \cup \mathcal{C} \rangle = S + T$.

不妨设 $\sum_{i=1}^n r_i v_i = 0$, 其中 $v_i \in \mathcal{A} \cup \mathcal{B} \cup \mathcal{C}$.

设 $v_1, \dots, v_k \in \mathcal{A}$, 则 $\sum_{i=1}^k r_i v_i = -\sum_{i=k+1}^n r_i v_i$.

令 $x = \sum_{i=1}^k r_i v_i$, 则 $x = \sum_{i=1}^k r_i v_i \in \langle \mathcal{A} \rangle$ 且 $x = -\sum_{i=k+1}^n r_i v_i \in \langle \mathcal{B} \cup \mathcal{C} \rangle \implies x \in \langle \mathcal{A} \rangle \cap \langle \mathcal{B} \cup \mathcal{C} \rangle$.

$\because x \in \langle \mathcal{A} \rangle, \therefore x \in S$.

又 $\because x \in \langle \mathcal{B} \cup \mathcal{C} \rangle, \therefore x \in T \implies x \in S \cap T = \langle \mathcal{B} \rangle \implies x \in \langle \mathcal{A} \rangle \cap \langle \mathcal{B} \rangle \implies x = \sum_{i=1}^k r_i v_i = -\sum_{i=k+1}^n r_i v_i = 0$.

又 $\because \mathcal{A}$ 和 $\mathcal{B} \cup \mathcal{C}$ 线性独立, $\therefore r_i = 0 \forall i \implies \mathcal{A} \cup \mathcal{B} \cup \mathcal{C}$ 线性无关.

综上, $\mathcal{A} \cup \mathcal{B} \cup \mathcal{C}$ 是 $S + T$ 的基. □

故

$$\dim S + \dim T = |\mathcal{A} \cup \mathcal{B}| + |\mathcal{B} \cup \mathcal{C}| = |\mathcal{A}| + |\mathcal{B}| + |\mathcal{B}| + |\mathcal{C}| = |\mathcal{A}| + |\mathcal{B}| + |\mathcal{C}| + \dim(S \cap T) = \dim(S + T) + \dim(S \cap T).$$

□

Chapter 2

线性变换

2.1 线性变换

定义 2.1 线性变换: 向量空间之间的线性映射. F 为域, V, W 为 F 上的向量空间, 映射 $\tau : V \rightarrow W$, 若 $\tau(ru + tv) = r\tau(u) + t\tau(v)$, $r, t \in F$, $u, v \in V$, 则称 τ 为 V 到 W 的线性变换.

记 $\mathcal{L}(V, W) \equiv \{V \text{ 到 } W \text{ 的线性变换}\}$, $\mathcal{L}(V) \equiv \mathcal{L}(V, V) = \{V \text{ 到 } V \text{ 的线性变换}\} = \{V \text{ 上的线性算子}\}$.

取 $r = 1, t = 1$, 则 $\tau(u + v) = \tau(u) + \tau(v)$, 故 τ 是 V 到 W 的群同态, 从而 $\tau(0) = 0$, $\tau(-v) = -\tau(v)$.

定义 2.2 单线性变换: 单射的线性变换.

定义 2.3 满线性变换: 满射的线性变换.

定义 2.4 同构: 双射的线性变换. 若两个向量空间 V, W 之间存在同构, 则称 V 与 W 同构, 记作 $V \approx W$.

取 $\tau, \sigma \in \mathcal{L}(V, W)$, $v \xrightarrow{\tau} \tau(v)$, $v \xrightarrow{\sigma} \sigma(v)$, 则 $v \xrightarrow{\tau+\sigma} \tau(v) + \sigma(v)$ 也是线性变换, 且 $\tau + \sigma \in \mathcal{L}(V, W)$.

证: 由映射的像的唯一性, 若 $v = u$, 则 $\tau(v) = \tau(u)$, $\sigma(v) = \sigma(u) \implies (\tau + \sigma)(v) = \tau(v) + \sigma(v) = \tau(u) + \sigma(u) = (\tau + \sigma)(u)$, 故 $\tau + \sigma$ 是映射.

$(\tau + \sigma)(ru + tv) = \tau(ru + tv) + \sigma(ru + tv) = r\tau(u) + t\tau(v) + r\sigma(u) + t\sigma(v) = r[\tau(u) + \sigma(u)] + t[\tau(v) + \sigma(v)] = r(\tau + \sigma)(u) + t(\tau + \sigma)(v)$, 故 $\tau + \sigma$ 为 V 到 W 的线性变换. \square

由此定义了线性变换之间的加法.

$(\mathcal{L}(V, W), +)$ 为交换群.

证: $(\mathcal{L}(V, W), +)$ 满足

(1) **结合律:** $\forall v \in V$, $[(\tau + \sigma) + \delta](v) = (\tau + \sigma)(v) + \delta(v) = \tau(v) + \sigma(v) + \delta(v) = \tau(v) + (\sigma(v) + \delta(v)) = \tau(v) + (\sigma + \delta)(v) = [\tau + (\sigma + \delta)](v) \implies (\tau + \sigma) + \delta = \tau + (\sigma + \delta)$,

(2) **有单位元 0:** 零映射 $0(v) = 0$, $\forall \tau \in \mathcal{L}(V, W)$, $(0 + \tau)(v) = 0(v) + \tau(v) = 0 + \tau(v) = \tau(v) + 0 = \tau(v) + 0(v) = (\tau + 0)(v)$,

(3) 有逆元: $\forall \tau \in \mathcal{L}(V, W), \exists -\tau \in \mathcal{L}(V, W), \text{ s.t. } (-\tau)(v) = -\tau(v) \implies [\tau + (-\tau)](v) = \tau(v) - \tau(v) = 0 = 0(v),$

(4) 交换律: $\forall v \in V, (\tau + \sigma)(v) = \tau(v) + \sigma(v) = \sigma(v) + \tau(v) = (\sigma + \tau)(v),$

故 $\mathcal{L}(V, W)$ 为交换群. □

$\forall r \in F, \forall v \in \mathcal{L}(V, W), v \xrightarrow{\tau} \tau(v),$ 则 $v \xrightarrow{r\tau} r\tau(v)$ 是线性变换, 且 $r\tau \in \mathcal{L}(V, W).$

证: 由映射的像的唯一性, $\because v \xrightarrow{\tau} \tau(v)$ 是唯一的, $\therefore v \xrightarrow{r\tau} r\tau(v)$ 是唯一的, 故 $r\tau$ 是映射.

$(r\tau)(sv + tu) = r[s\tau(v) + t\tau(u)] = s(r\tau)(v) + t(r\tau)(v) \implies r\tau \in \mathcal{L}(V, W).$ □

$\mathcal{L}(V, W)$ 是 F 上的向量空间.

证: 前面已证, $(\mathcal{L}(V, W), +)$ 为交换群, 且其满足

(1) $\forall v \in V, [(r + t)\tau](v) = (r + t)\tau(v) = r\tau(v) + t\tau(v) = (r\tau + t\tau)(v) \implies (r + t)\tau = r\tau + t\tau,$

(2) $\forall v \in V, [(rt)\tau](v) = (rt)\tau(v) = r[t\tau(v)] = [r(t\tau)](v) \implies (rt)\tau = r(t\tau),$

(3) $\forall v \in V, [r(\tau + \sigma)](v) = r(\tau + \sigma)(v) = r[\tau(v) + \sigma(v)] = r\tau(v) + r\sigma(v) = (r\tau + r\sigma)(v) \implies r(\tau + \sigma) = r\tau + r\sigma,$

(4) \exists 恒等映射 $1: \mathcal{L}(V, W) \rightarrow \mathcal{L}(V, W), \tau \xrightarrow{1} \tau, \text{ s.t. } \forall v \in V, (1\tau)(v) = 1[\tau(v)] = \tau(v) \implies 1\tau = \tau,$

故得证. □

定理 2.1 (课本定理2.1): (1) $\mathcal{L}(V, W)$ 是 F 上的向量空间.

(2) $\tau \in \mathcal{L}(V, W), \sigma \in \mathcal{L}(W, U),$ 则 $\sigma \circ \tau \in \mathcal{L}(V, U).$

(3) τ 是 V 到 W 的同构, 则 $\tau^{-1} \in \mathcal{L}(W, V).$

(4) $\mathcal{L}(V)$ 既是向量空间, 也是环, 且两者的加法运算是相同的, 故 $\mathcal{L}(V)$ 是代数.

$\mathcal{L}(V)$ 是环.

证: 前面已证, $(\mathcal{L}(V), +)$ 为交换群, 且满足

(1) 结合律: \because 映射的复合有结合律, $\therefore \mathcal{L}(V)$ 中元素的复合有结合律,

(2) 左右分配律: $\forall v \in V, [(\sigma + \tau)\delta](v) = (\sigma + \tau)[\delta(v)] = \sigma[\delta(v)] + \tau[\delta(v)] = (\sigma\delta)(v) + (\tau\delta)(v) \implies (\sigma + \tau)\delta = \sigma\delta + \tau\delta,$
 $[\sigma(\tau + \delta)](v) = \sigma[(\tau + \delta)(v)] = \sigma[\tau(v) + \delta(v)] = \sigma[\tau(v)] + \sigma[\delta(v)] = \sigma\tau(v) + \sigma\delta(v) \implies \sigma(\tau + \delta) = \sigma\tau + \sigma\delta,$

故得证. □

定义 2.5 核空间: $\ker \tau \equiv \{v \mid \tau(v) = 0\} \subseteq V.$

定义 2.6 像空间: $\text{Im } \tau \equiv \{\tau(v) \mid v \in V\}.$

定理 2.2 (课本定理2.3): $\tau \in \mathcal{L}(V, W)$, 则

- (1) τ 满线性变换 $\iff \text{Im } \tau = W$.
- (2) τ 单线性变换 $\iff \ker \tau = \{0\}$.

定理 2.3 (课本定理2.2): \mathcal{B} 是 V 的基, $\tau \in \mathcal{L}(V, W)$, 则 τ 可由 τ 在 \mathcal{B} 上的像唯一确定.

证: 已知 $\tau(b_i) \forall b_i \in \mathcal{B}$.

$$\forall v \in V, v = \sum_{i=1}^n r_i b_i, r_i \in F, b_i \in \mathcal{B}, n \in \mathbb{Z}^+ \implies \tau(v) = \tau\left(\sum_{i=1}^n r_i b_i\right) = \sum_{i=1}^n r_i \tau(b_i). \quad \square$$

同构的向量空间有很多性质可以相互传递, 下面我们就来讨论这件事.

定理 2.4 (课本定理2.4): $\tau \in \mathcal{L}(V, W)$ 同构, S 是 V 真子集, 则

- (1) $V = \langle S \rangle \iff W = \langle \tau(S) \rangle$.
- (2) S 线性无关 $\iff \tau(S)$ 线性无关.
- (3) S 是 V 的基 $\iff \tau(S)$ 是 W 的基.

证: (1) “ \implies ”: $\because V = \langle S \rangle, \therefore \forall v \in V, v = \sum_i r_i s_i$.

$$\text{又 } \because \tau \text{ 同构}, \therefore \forall w \in W, \exists v = \tau^{-1}(w) \in V, \text{ s.t. } w = \tau(v) \implies \tau(v) = \tau\left(\sum_i r_i s_i\right) = \sum_i r_i \tau(s_i).$$

$$\text{“}\Leftarrow\text{”}: \because W = \langle \tau(S) \rangle, \therefore \forall w \in W, w = \sum_i r_i \tau(s_i).$$

$$\text{又 } \because \tau \text{ 同构}, \therefore \forall w \in W, \exists v = \tau^{-1}(w) \in V, \text{ s.t. } v = \tau^{-1}(w) = \tau^{-1}\left(\sum_i r_i \tau(s_i)\right) = \sum_i r_i \tau^{-1}(\tau(s_i)) = \sum_i r_i s_i.$$

综上, (1) 得证.

(2) “ \implies ”: 假设 $\sum_i r_i \tau(s_i) = 0$, 则 $\tau\left(\sum_i r_i s_i\right) = 0$.

$$\text{又 } \because \tau \text{ 同构}, \therefore \ker \tau = \{0\} \implies \sum_i r_i s_i = 0.$$

$$\text{又 } \because S \text{ 线性无关}, \therefore r_i = 0 \forall i \implies \tau(S) \text{ 线性无关}.$$

$$\text{“}\Leftarrow\text{”}: \text{假设 } \sum_i r_i s_i = 0, \text{ 则 } \tau\left(\sum_i r_i s_i\right) = \sum_i r_i \tau(s_i) = 0.$$

$$\text{又 } \because \tau(S) \text{ 线性无关}, \therefore r_i = 0 \forall i \implies S \text{ 线性无关}.$$

综上, (2) 得证.

(3) \Leftarrow (1), (2).

\square

定理 2.5 (课本定理2.6): $V \approx W \iff \dim V = \dim W$.

定理 2.6 (课本定理2.7): 若 $\dim V = n$, 则 $V \approx F^n$.

定理 2.7 (课本定理2.8): $\tau \in \mathcal{L}(V, W)$, 则

(1) $(\ker \tau)^c \approx \text{Im } \tau$.

(2) $\dim V = \dim \ker \tau + \dim \text{Im } \tau \equiv \text{null } \tau + \text{rk } \tau$, 其中称 $\text{null } \tau \equiv \dim \ker \tau$ 为 τ 的**零度**, $\text{rk } \tau \equiv \dim \text{Im } \tau$ 为 τ 的**秩**.

证: (1) 设映射 $\tau^c : \ker(\tau)^c \rightarrow \text{Im } \tau$, $u \mapsto \tau(u)$.

先证 τ^c 是单射: $\ker(\tau^c) = \ker(\tau) \cap \ker(\tau)^c$ (即 $\ker(\tau^c)$ 中的元素同时满足 $\ker(\tau)$ 的条件, 且在定义域 $\ker(\tau)^c$ 中).

$\because V = \ker(\tau) \oplus \ker(\tau)^c$, $\therefore \ker(\tau) \cap \ker(\tau)^c = \{0\} \implies \ker(\tau^c) = \{0\}$, 故 τ^c 单射.

再证 τ^c 是满射: 一方面, $\text{Im}(\tau^c) \subseteq \text{Im}(\tau)$;

另一方面, $\forall v \in V$, $v = u + w$, 其中 $u \in \ker(\tau)$, $w \in \ker(\tau)^c \implies \tau(v) = \tau(u + w) = \tau(u) + \tau(w) = 0 + \tau(w) = \tau(w) \in \text{Im}(\tau^c) \implies \text{Im}(\tau) \subseteq \text{Im}(\tau^c)$.

故 $\text{Im}(\tau^c) = \text{Im}(\tau)$, 即 τ^c 满射.

综上, (1) 得证.

(2) $\dim V = \dim \ker(\tau) + \dim \ker(\tau)^c = \dim \ker(\tau) + \dim \text{Im}(\tau)$.

□

x 为 n 维向量, $\text{null } A = \dim\{x \mid Ax = 0\} = n - \text{rk } A$.

2.2 线性变换的表示

“表示”其实就是用已知的东西展现未知的东西, 在这里, 我们用已知的矩阵乘法展现未知的线性变换, 这就是线性变换的表示.

F 为域, $F^n = \{(r_1, \dots, r_n) \mid r_i \in F\}$, 满足 $(r_1, \dots, r_n) + (l_1, \dots, l_n) = (r_1 + l_1, \dots, r_n + l_n)$ 及 $r(r_1, \dots, r_n) = (rr_1, \dots, rr_n)$, $\dim F^n = n$, F^n 的标准基为 $\{e_1 = (1, 0, \dots, 0), e_2 = (0, 1, \dots, 0), \dots, e_n = (0, 0, \dots, 1)\}$; $F^m = \{(r_1, \dots, r_m) \mid r_i \in F\}$, $\dim F = m$, 标准基为 $\{f_1 = (1, 0, \dots, 0), f_2 = (0, 1, \dots, 0), \dots, f_m = (0, 0, \dots, 1)\}$. 如何确定/展现 F^n 到 F^m 的线性变换?

根据定理 2.3, 我们只需确定一组基在线性变换下的表现, 就可以确定这一线性变换. 因此, $\forall \tau \in \mathcal{L}(F^n, F^m)$, 若 $\tau(e_i) = (a_{1i}, \dots, a_{mi}) = \sum_{j=1}^m a_{ji} f_j$.

$\forall (r_1, \dots, r_n) \in F^n$,

$$\begin{aligned} \tau((r_1, \dots, r_n)) &= \tau\left(\sum_{i=1}^n r_i e_i\right) = \sum_{i=1}^n r_i \tau(e_i) = \sum_{i=1}^n r_i \left(\sum_{j=1}^m a_{ji} f_j\right) = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n r_i a_{ji}\right) f_j = \left(\sum_{i=1}^n r_i a_{1i}, \dots, \sum_{i=1}^n r_i a_{mi}\right) \\ &= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau(e_1) & \tau(e_2) & \cdots & \tau(e_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix} = M_\tau \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

其中 $M_\tau = \begin{pmatrix} \tau(e_1) & \tau(e_2) & \cdots & \tau(e_n) \end{pmatrix}$.

故 $\forall \vec{r} \in F^n$, $\tau(\vec{r}) = M_\tau \vec{r}$.

综上:

$$\mathcal{L}(F^n, F^m) \approx M_{m \times n}(F), \quad \tau \mapsto M_\tau = \begin{pmatrix} \tau(e_1) & \cdots & \tau(e_n) \end{pmatrix}.$$

$f: \mathcal{L}(F^n, F^m) \rightarrow M_{m \times n}(F)$, $\tau \mapsto M_\tau$ 是线性变换.

证: 由上述的 M_τ 构造过程知, 给定 τ , $f(\tau) = M_\tau$ 是唯一的, 故 f 是映射.

$$\begin{aligned} f(r\tau + t\sigma) &= M_{r\tau + t\sigma} = \begin{pmatrix} (r\tau + t\sigma)(e_1) & \cdots & (r\tau + t\sigma)(e_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r\tau(e_1) + t\sigma(e_1) & \cdots & r\tau(e_n) + t\sigma(e_n) \end{pmatrix} \\ &= r \begin{pmatrix} \tau(e_1) & \cdots & \tau(e_n) \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} \sigma(e_1) & \cdots & \sigma(e_n) \end{pmatrix} = rM_\tau + tM_\sigma = rf(\tau) + tf(\sigma). \end{aligned}$$

故 f 是线性的.

综上, f 为线性变换. □

f 单射.

证: $\ker f \equiv \{\tau \mid f(\tau) = 0\} = \{\tau \mid M_\tau = 0\} \implies \forall \tau \in \ker f, M_\tau = \begin{pmatrix} \tau(e_1) & \cdots & \tau(e_n) \end{pmatrix} = 0_{m \times n}$
 $\implies \forall v \in V, \tau(v) = M_\tau v = 0 \implies \tau = 0$.

故 $\ker f = \{0\}$ (这里的“0”代表的是零变换) $\iff f$ 单射. □

f 满射.

证: $\forall A \in M_{m \times n}(F)$, 可由 $\begin{pmatrix} \tau(e_1) & \cdots & \tau(e_n) \end{pmatrix} = M_\tau = A$ 构造 τ , 从而 f 满射. □

综上, f 同构.

取 V 的基 $\mathcal{B} = \{b_1, \dots, b_n\}$, 则 $\forall v \in V, v = \sum_i r_i b_i$.

当 \mathcal{B} 定序, $\phi_{\mathcal{B}}: V \rightarrow F^n, v \mapsto \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix} \equiv [v]_{\mathcal{B}}$ 是一个映射.

证: 由于 \mathcal{B} 是 V 的基, 展开式 $v = \sum_i r_i b_i$ 唯一确定.

又 $\because \mathcal{B}$ 定序, \therefore 映射 $v \mapsto \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}$ 唯一确定, 故 $\phi_{\mathcal{B}}$ 为映射.

$$\forall u, v \in V, u = \sum_{i=1}^n w_i b_i, v = \sum_{i=1}^n r_i b_i,$$

$$\begin{aligned} \phi_{\mathcal{B}}(r\vec{u} + t\vec{v}) &= \phi_{\mathcal{B}} \left(r \left(\sum_{i=1}^n w_i b_i \right) + t \left(\sum_{i=1}^n r_i b_i \right) \right) = \phi_{\mathcal{B}} \left(\sum_{i=1}^n (rw_i + tr_i) b_i \right) = \begin{pmatrix} rw_1 + tr_1 \\ \vdots \\ rw_n + tr_n \end{pmatrix} \\ &= r \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix} = r\phi_{\mathcal{B}}(\vec{u}) + t\phi_{\mathcal{B}}(\vec{v}), \end{aligned}$$

故 $\phi_{\mathcal{B}}$ 为 V 到 F^n 的线性变换. □

$\phi_{\mathcal{B}}$ 单射.

证: $\ker \phi_{\mathcal{B}} = \{v \mid \phi_{\mathcal{B}}(v) = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}\}.$

$$\phi_{\mathcal{B}}(v) = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \implies v = \sum_{i=1}^n 0b_i = 0.$$

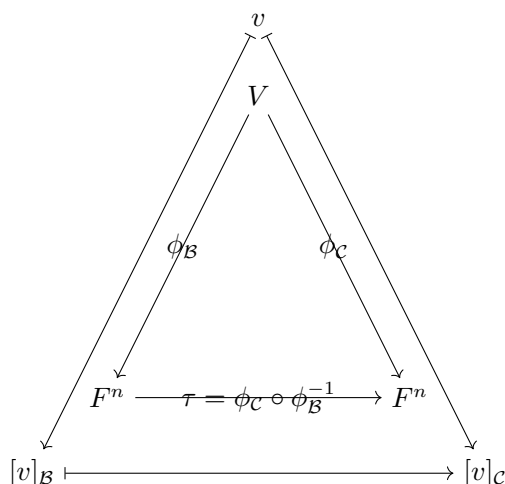
故 $\ker \phi_{\mathcal{B}} = \{0\} \iff \phi_{\mathcal{B}}$ 单射. □

$\phi_{\mathcal{B}}$ 满射.

证: $\forall \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix} \in F^n, \exists v = \sum_{i=1}^n r_i b_i \in V, \text{ s.t. } \phi_{\mathcal{B}}(v) = \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}, \text{ 故 } \phi_{\mathcal{B}} \text{ 满射.}$ □

综上, $\phi_{\mathcal{B}}$ 同构.

$\dim V = n$, 取 V 的一组定序基 $\mathcal{B} = \{b_1, \dots, b_n\}$, 另一组定序基 $\mathcal{C} = \{c_1, \dots, c_n\}$, 向量 v 在 \mathcal{B} 下的坐标表示为 $[v]_{\mathcal{B}}$, 在 \mathcal{C} 下的坐标表示为 $[v]_{\mathcal{C}}$, τ 将 $[v]_{\mathcal{B}}$ 转换为 $[v]_{\mathcal{C}}$, 映射关系如以下的交换图所示. 如何表示映射 τ ?



$$[v]_{\mathcal{C}} = \tau([v]_{\mathcal{B}}) = M_{\tau}[v]_{\mathcal{B}}, \text{ 其中 } M_{\tau} = \begin{pmatrix} \tau(e_1) & \cdots & \tau(e_n) \end{pmatrix}.$$

$$\tau: F^n \rightarrow F^n, \quad e_i \mapsto \tau(e_i) = \phi_{\mathcal{C}}(\phi_{\mathcal{B}}^{-1}(e_i)) = \phi_{\mathcal{C}}(b_i)$$

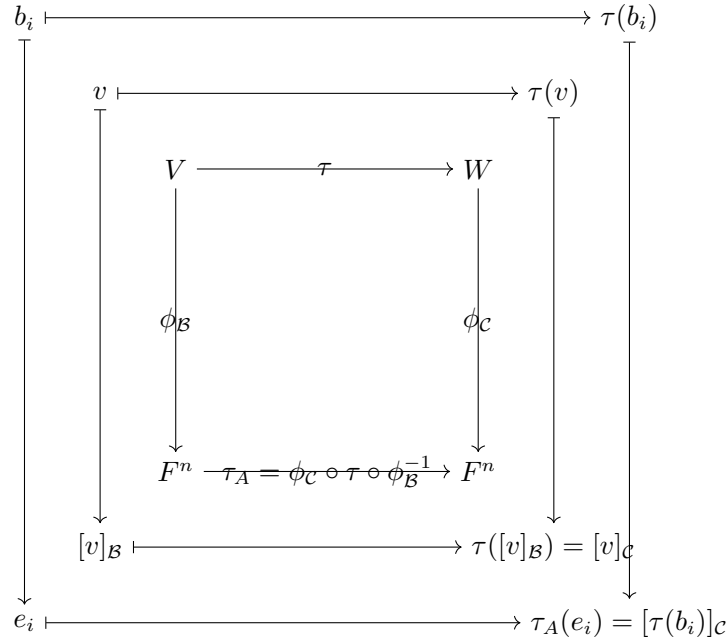
$$\implies M_{\tau} = \begin{pmatrix} [b_1]_{\mathcal{C}} & \cdots & [b_n]_{\mathcal{C}} \end{pmatrix} \equiv M_{\mathcal{BC}}.$$

定理 2.8 (课本定理2.12):

$$[v]_{\mathcal{C}} = M_{\mathcal{BC}}[v]_{\mathcal{B}}$$

其中 $[v]_{\mathcal{B}}$ 和 $[v]_{\mathcal{C}}$ 分别是向量 v 在基 \mathcal{B} 和 \mathcal{C} 表象下的坐标表示, $M_{\mathcal{BC}}$ 是在两种坐标表示之间线性变换对应的矩阵.

$\dim V = n, \dim W = n$, 故 $V \approx W \approx F^n$, 取 V 的一组定序基 $\mathcal{B} = \{b_1, \dots, b_n\}$, W 的一组定序基 $\mathcal{C} = \{c_1, \dots, c_n\}$, τ 为 V 到 W 的线性变换, 映射关系如下所示. 如何表示 τ ?



$$\begin{aligned} M_{\tau_A} &= \begin{pmatrix} \tau_A(e_1) & \cdots & \tau_A(e_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_C \circ \tau \circ \phi_B^{-1}(e_1) & \cdots & \phi_C \circ \tau \circ \phi_B^{-1}(e_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_C \circ \tau(b_1) & \cdots & \phi_C \circ \tau(b_n) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} [\tau(b_1)]_C & \cdots & [\tau(b_n)]_C \end{pmatrix} \equiv [\tau]_{BC}. \end{aligned}$$

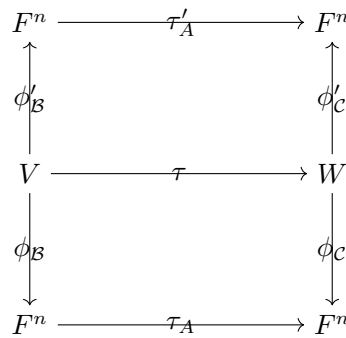
定理 2.9 (课本定理2.14):

$$[\tau(v)]_C = [\tau]_{BC} [v]_B$$

其中 $[\tau(v)]_C$ 是 $\tau(v)$ 在基 C 表象下的坐标表示, $[v]_B$ 是 v 在基 B 表象下的坐标表示, $[\tau]_{BC}$ 是从基 B 表象到基 C 表象的线性变换的矩阵表示.

定理 2.10 (课本定理2.15): $\mathcal{L}(V, W) \rightarrow \mathcal{L}(F^n, F^m) \approx M_{m \times n}(F)$, $\tau \mapsto \tau_A \mapsto [\tau]_{BC}$.

若我们改变 V 和 W 的基, 那么映射所联系的向量的坐标会如何?



$$\tau'_A = \phi'_C \phi_C^{-1} \tau_A \phi_B \phi_B'^{-1}.$$

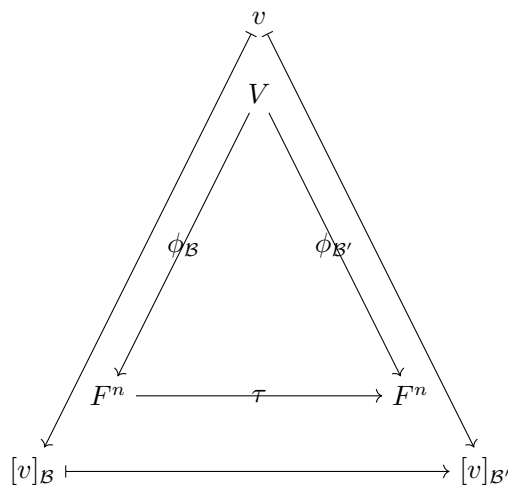
定理 2.11 (课本定理2.16):

$$[\tau]_{\mathcal{B}'\mathcal{C}'} = M_{\mathcal{C}\mathcal{C}'}[\tau]_{\mathcal{B}\mathcal{C}}M_{\mathcal{B}'\mathcal{B}}$$

其中 $[\tau]_{\mathcal{B}\mathcal{C}}$ 和 $[\tau]_{\mathcal{B}'\mathcal{C}'}$ 分别是线性变换 τ 在基 $(\mathcal{B}, \mathcal{C})$ 和 $(\mathcal{B}', \mathcal{C}')$ 下的表示, 矩阵 $M_{\mathcal{B}'\mathcal{B}}$ 和 $M_{\mathcal{C}\mathcal{C}'}$ 分别对应了从基 \mathcal{B} 到基 \mathcal{B}' 和从基 \mathcal{C} 到基 \mathcal{C}' 的变换矩阵.

$M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}$ 可逆.

证: 设 $\phi_{\mathcal{B}} : V \rightarrow F^n, v = \sum_{i=1}^n r_i b_i \mapsto [v]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}$, $\phi_{\mathcal{B}'} : V \rightarrow F^n, v = \sum_{i=1}^n r'_i b'_i \mapsto [v]_{\mathcal{B}'} = \begin{pmatrix} r'_1 \\ \vdots \\ r'_n \end{pmatrix}$, 即



$M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'} = M_{\tau} = \begin{pmatrix} [b_1]_{\mathcal{B}'} & \cdots & [b_n]_{\mathcal{B}'} \end{pmatrix}$, s.t. $[v]_{\mathcal{B}'} = M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}[v]_{\mathcal{B}}$.

同理可构造 $M_{\mathcal{B}'\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} [b'_1]_{\mathcal{B}} & \cdots & [b'_n]_{\mathcal{B}} \end{pmatrix}$, s.t. $[v]_{\mathcal{B}} = M_{\mathcal{B}'\mathcal{B}}[v]_{\mathcal{B}'}$.

$\forall [v]_{\mathcal{B}} \in F^n, M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}M_{\mathcal{B}'\mathcal{B}}[v]_{\mathcal{B}} = M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}[v]_{\mathcal{B}'} = [v]_{\mathcal{B}} \implies M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}M_{\mathcal{B}'\mathcal{B}} = n \times n$ 维的单位矩阵, 即 $M_{\mathcal{B}'\mathcal{B}}$ 是 $M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}$ 的逆, 故 $M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}$ 可逆. \square

定理 2.12 (课本定理2.18): $B = PAQ$, 其中 P 和 Q 可逆, 则 B 与 A 等价.

定理 2.13 (课本定理2.19): $B = PAP^{-1}$, 其中 P 可逆, 则 B 与 A 相似.

(因为 B 和 A 是同一线性算子在两组不同的基下的表示.)

Chapter 3

同构定理

3.1 商空间

定义 3.1 商空间: F 为域, V 为 F 上的向量空间, S 为 V 的子空间, 则称 $\frac{V}{S} \equiv \{[v] \mid v \in V\}$ 为 F 的商空间, 其中 $[v] \equiv \{u \in V \mid u - v \in S\} = S + v$.

$\frac{V}{S}$ 为 F 上的向量空间.

证: $[u] + [v] = \{a \in V \mid a - u \in S\} + \{b \in V \mid b - v \in S\} = \{(a + b) \in V \mid a - u \in S, b - v \in S\}$.

$[u + v] = \{w \in V \mid w - (u + v) \in S\}$.

$\forall (a + b) \in [u] + [v], (a - u) + (b - v) = (a + b) - (u + v) \in S \implies (a + b) \in [u + v] \implies [u] + [v] \subseteq [u + v]$.

$\forall w \in [u + v], \exists c, d \in S, \text{ s.t. } w = c + d + (u + v) = (c + u) + (d + v), \text{ 其中 } (c + u) \in [u], (d + v) \in [v] \implies w \in [u] + [v] \implies [u + v] \subseteq [u] + [v]$.

故 $[u] + [v] = [u + v]$.

假设 $u \sim u', v \sim v'$, 即 $[u] = [u'], [v] = [v']$.

$\therefore [u] = [u'], \therefore u + S = u' + S \implies \exists s_1, s'_1 \in S, \text{ s.t. } u + s_1 = u' + s'_1 \iff u' = u + s_1 - s'_1$,

$\therefore [v] = [v'], \therefore v + S = v' + S \implies \exists s_2, s'_2 \in S, \text{ s.t. } v + s_2 = v' + s'_2 \iff v' = v + s_2 - s'_2$

$\implies u' + v' = u + s_1 - s'_1 + v + s_2 - s'_2$, 其中 $\therefore s_1, s'_1, s_2, s'_2 \in S, \therefore s_1 - s'_1 \in S, s_2 - s'_2 \in S$.

又 $\therefore V$ 是交换群, $\therefore u' + v' = u + v + (s_1 - s'_1 + s_2 - s'_2)$

$\implies (u' + v') + S = (u + v + (s_1 - s'_1 + s_2 - s'_2)) + S \implies [u' + v'] = [u + v]$,

即 $[u] + [v] = [u + v]$ 与代表元选取无关, 故 $[u] + [v] = [u + v]$ 为运算.

$r[u] = r\{v \in V \mid v - u \in S\} = \{rv \mid v \in V, v - u \in S\} = \{rv \in V \mid rv - ru \in S\} = [ru]$.

假设 $u \sim u'$, 即 $[u] = [u']$.

$\therefore [u] = [u'], \therefore u + S = u' + S \implies \exists s, s' \in S, \text{ s.t. } u + s = u' + s' \iff u' = u + s - s'$

$\implies ru' = r(u + s - s') = ru + r(s - s')$, 其中 $s - s' \in S \implies (ru') + S = (ru + r(s - s')) + S = (ru) + S \implies r[u'] = [ru]$,

即 $r[u] = [ru]$ 与代表元选取无关, 故 $r[u] = [ru]$ 为运算.

$(\frac{V}{S}, +)$ 满足

(1) **结合律:** $([v] + [u]) + [w] = [u + v] + [w] = [u + v + w] = [u + (v + w)] = [u] + [v + w] = [u] + ([v] + [w]),$

(2) **有单位元** $[0]$: $[0] + [u] = [0 + u] = [u] = [u + 0] = [u] + [0],$

(3) **有逆元:** $\forall v \in V, \exists -v, \text{ s.t. } [a] + [-a] = [a + (-a)] = [0] = [(-a) + a] = [-a] + [a],$

且 $[u] + [v] = [u + v] = [v + u] = [v] + [u]$, 即 $(\frac{V}{S}, +)$ 交换, 故 $(\frac{V}{S}, +)$ 为交换群. (总之就是因为 $\frac{V}{S}$ 中的元素 $[v]$ 保持了 V 中的元素 v 的各种运算性质, 所以 $(V, +)$ 是交换群就可以推出 $\frac{V}{S}$ 也是交换群.)

$\frac{V}{S}$ 满足

- (1) $r([u + v]) = r([u] + [v]) = r[u] + r[v]$,
- (2) $(r + t)[u] = [(r + t)u] = [ru + tu] = [ru] + [tu] = r[u] + t[u]$,
- (3) $(r \cdot t)[u] = [(r \cdot t)u] = [r(tu)] = r[tu] = r(t[u])$,
- (4) 有单位元 1: $[1][u] = [1u] = [u]$,

故 $\frac{V}{S}$ 为 F 上的向量空间. □

定理 3.1 (课本定理3.2): (1) $\Pi_S : V \rightarrow \frac{V}{S}, v \mapsto [v]$ 是线性变换.

(2) Π_S 是满线性变换, 即 $\text{Im } \Pi_S = \frac{V}{S}$.

(3) $\ker \Pi_S = S$.

证: (1) 显然 Π_S 是唯一的, 故 Π_S 是映射.

如前所证, V 和 $\frac{V}{S}$ 均为 F 上的向量空间.

$\because [u] + [v] = [u + v], r[u] = [ru], \therefore r[u] + t[v] = [ru] + [tv] = [ru + tv]$, 故 Π_S 为线性变换.

(2) $\forall [v] \in \frac{V}{S}, \exists v \in V, \text{ s.t. } \Pi_S(v) = [v]$, 故 Π_S 是满线性变换.

(3) $\ker \Pi_S = \{v \in S \mid \Pi_S(v) = [0]\}$.

$v \in \ker \Pi_S, \Pi_S(v) = [v] = v + S = [0] = 0 + S = S \iff v \in S$, 故 $\ker \Pi_S \subseteq S$. □

定理 3.2 (课本定理3.3): (1) S, T 为 V 的子空间且 $S \subseteq T$, 则 $\frac{T}{S}$ 是 $\frac{V}{S}$ 的子空间.

(2) 取 X 为 $\frac{V}{S}$ 的子空间, 则 $\exists V$ 的子空间 T , s.t. $\emptyset \neq S \subseteq T, \frac{T}{S} = X$.

证: (1) $\frac{T}{S} = \{[u] \mid u \in T\}, \frac{V}{S} = \{[v] \mid v \in V\}$.

$\forall [u] \in \frac{T}{S}, u \in T, \because T$ 是 V 的子空间, $\therefore u \in V \implies [u] \in \frac{V}{S}$, 故 $\frac{T}{S} \subseteq \frac{V}{S}$.

$\forall [u_1], [u_2] \in \frac{T}{S}, \forall r, t \in F, r[u_1] + t[u_2] = [ru_1 + tu_2]$.

$\because u_1, u_2 \in T, \therefore ru_1 + tu_2 \in T \implies [ru_1 + tu_2] \in \frac{T}{S}$, 故 $\frac{T}{S}$ 为向量空间.

综上, 得证.

(2) 取 $T = \cup_{[v] \in X} [v]$. 显然 $T \subseteq V$.

$\forall u, v \in T$, 根据 T 的定义, $[u], [v] \in X$.

$\because X$ 为子空间, $\therefore r[u] + t[v] = [ru + tv] \in X \subseteq T = \cup_{[v] \in X} [v] \implies ru + tv \in T$.

故 T 为 V 的子空间.

$\because S = [0] \in X, \therefore S \subseteq T = \cup_{[v] \in X} [v]$.

$\frac{T}{S} = \{[v] = S + v \mid v \in T\}$.

$\forall [u] \in \frac{T}{S}, u \in T = \cup_{[v] \in X} [v] \implies [u] \in X \implies \frac{T}{S} \subseteq X$.

$$\forall [u] \in X, u \in T = \cap_{[v] \in X} [v] \implies [u] \in \frac{T}{S} \implies X \subseteq \frac{T}{S}.$$

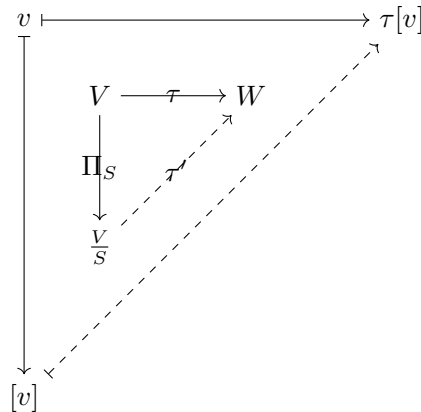
$$\text{故 } \frac{T}{S} = X.$$

综上, 得证.

□

3.2 第一同构定理

定理 3.3 第一同态基本定理(课本定理3.4): S 是 V 的子空间, $\tau \in \mathcal{L}(V, W)$,



若 $S \subseteq \ker \tau$, 即 $\ker \Pi_S \subseteq \ker \tau$, 则 $\exists! \tau' : \frac{V}{S} \rightarrow W$, s.t. $\tau = \tau' \circ \Pi_S$, 即 $\forall v \in V, \tau(v) = \tau'([v])$, 此时上图可交换, $\ker \tau' = \frac{\ker \tau}{S}$, $\text{Im } \tau' = \text{Im } \tau$.

^a该定理回答了 τ' 的存在性 (即 τ' 在什么条件下存在) 的问题. 之所以称“基本”, 是因为若将该定理中的向量空间换成其他代数结构, 定理仍然成立.

证: τ' 的唯一性要求, 若 $[u] = [v]$, 则 $\tau'([u]) = \tau'([v])$,

即若 $u \sim v$, 则 $\tau(u) = \tau(v)$,

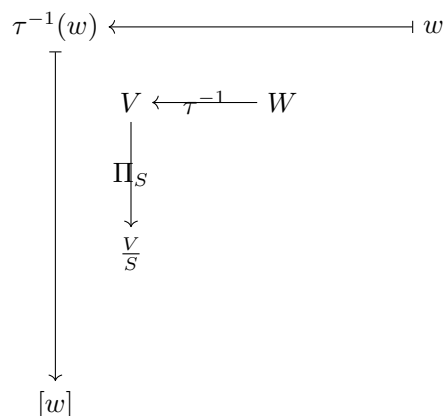
即若 $u - v \in S$, 则 $\tau(u - v) = 0$,

即 $S \subseteq \ker \tau$.

此时, $\ker \tau' = \{[v] \in \frac{V}{S} \mid \tau'([v]) = 0\} = \{[v] \in \frac{V}{S} \mid \tau(v) = 0\} = \{[v] \in \frac{V}{S} \mid v \in \ker \tau\} = \frac{\ker \tau}{S}$,

$\text{Im } \tau' = \{\tau'([v]) \mid [v] \in \frac{V}{S}\} = \{\tau'([v]) \mid v \in V\} = \{\tau(v) \mid v \in V\} = \text{Im } \tau$ ($\because \Pi_S$ 满射, $\therefore \forall [v] \in \frac{V}{S}, \exists v \in V$). □

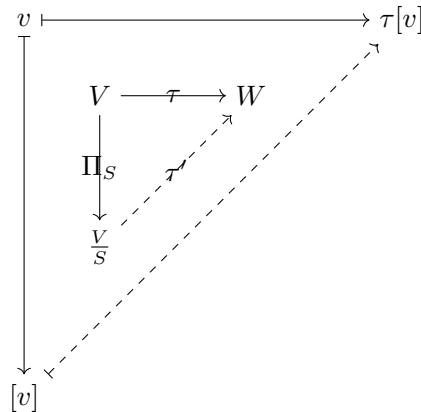
那么, 若 τ 双射, 即 $\exists \tau^{-1} \in \mathcal{L}(W, V)$, 且 $\ker \tau = S$, 如何?



此时, $\ker \tau' = \frac{\ker \tau}{S} = \{[v] \mid v \in \ker \tau\} = \{[v] \mid v \in S\} = \{[0]\} \implies \tau'$ 单射.

由上面关于第一同态基本定理的延伸讨论我们得到:

定理 3.4 第一同构定理(课本定理3.5): 若 $\ker \tau = S$, 则 τ' 单射, $\frac{V}{\ker \tau} = \frac{V}{S} \approx \text{Im } \tau$.



证: $V = \ker \tau \oplus (\ker \tau)^c$, 其中 $(\ker \tau)^c \approx \text{Im } \tau \implies \frac{V}{\ker \tau} \approx (\ker \tau)^c \approx \text{Im } \tau$. □

更一般地, 若 $V = S \oplus T$, 则 $\frac{V}{S} \approx T, \frac{V}{T} \approx S$.

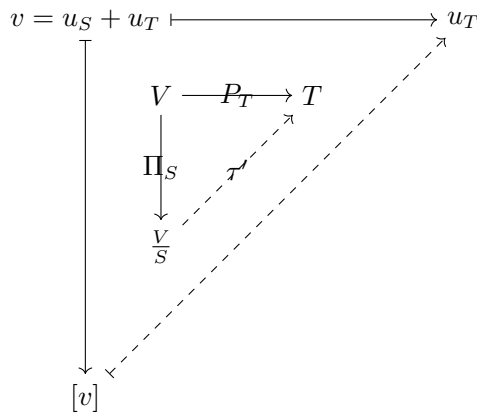
证: $\forall v \in V, v = u_S + u_T$, 其中 $u_S \in S, u_T \in T$.

令投影映射 $P_T: V \rightarrow T, v = u_S + u_T \mapsto u_T$.

$\ker P_T = \{v \in V \mid P_T(v) = 0\} = S = [0] = \ker \Pi_S$.

由第一同构定理 (定理 3.4), $\exists! \tau'$ 单射, s.t. $P_T = \tau' \circ \Pi_S$.

又 $\because \text{Im } P_T = T$, 即 P_T 满射, $\therefore \tau'$ 满射 $\implies \tau'$ 同构 $\implies \frac{V}{S} \approx T$.



同理可证 $\frac{V}{T} \approx S$. □

3.3 线性泛函

定义 3.2 对偶(空间)和线性泛函: $V^* = \mathcal{L}(V, F)$ 为 F 上的向量空间, 称 V^* 为 V 的对偶(空间).
若 $f \in V^*$, 则称 f 为线性泛函.

- (1) $\ker V^*$ 为 F 上的向量空间.
- (2) $\because \dim F = 1, \text{Im } f \subseteq F, \therefore \dim \text{Im } f \leq 1, \dim \ker f \geq \dim V - 1$.
- (3) \because 必有零映射 $0 \in V^*, 0: V \rightarrow F, v \mapsto 0, \therefore V^*$ 非空.

(4) 若 $\dim \operatorname{Im} f = 0$, 则 $\operatorname{Im} f = \{0\}$, f 为零映射.

(5) 若 $\dim \operatorname{Im} f = 1$, 则 $\operatorname{Im} f = \langle r \rangle$, 其中 $0 \neq r \in F \implies \operatorname{Im} f = F$.

由反证法易证, 若 $v \in f^{-1}(r) = \{v \in V \mid f(v) = r\}$, 其中 $r \neq 0$, 则 $v \neq 0$, 且必有 $f(\langle v \rangle^c) = \{0\}$.

证明 (5) 的末句:

证: 假设 $\exists u \in \langle v \rangle^c$, s.t. $f(u) \neq 0$.

$$f\left(\frac{ru}{f(u)}\right) = r \implies \frac{ru}{f(u)} \in f^{-1}(r).$$

又 $\because u \in \langle v \rangle^c$, $\therefore \dim f^{-1}(r) \geq 2$, 这与 $f^{-1}(r) \subseteq (\ker f)^c$, $\dim(\ker f)^c = \dim \operatorname{Im} f \leq 1$ 矛盾,

故假设错误, $\forall u \in \langle v \rangle^c$, $f(u) = 0 \implies f(\langle v \rangle^c) = \{0\}$. □

定理 3.5 (课本定理3.11): (1) $\forall 0 \neq v \in V$, $\exists 0 \neq f \in V^*$, s.t. $f(v) \neq 0$.

(2) $v = 0 \iff \forall f \in V^*, f(v) = 0$.

(3) $f \in V^*$, 若 $f(x) \neq 0$, 则 $V = \ker f \oplus \langle x \rangle$, 即 $\operatorname{Im} f \approx \langle x \rangle$.

(4) $0 \neq f, g \in V^*, \ker f = \ker g \iff \exists 0 \neq \lambda \in F$, s.t. $f = \lambda g$.

证: (1) $v \neq 0$, 则 $V = \langle v \rangle \oplus \langle v \rangle^c$, 其中 $\langle v \rangle = \{rv \mid r \in F\}$.

令 $f: V \rightarrow F$, $rv + w \mapsto r$, 其中 $rv \in \langle v \rangle$, $w \in \langle v \rangle^c$, 故 $f(v) = 1$, $f \in V^*$.

下证 f 为线性变换: $\forall u_1, u_2 \in V$, $u_1 = r_1v + w_1$, $u_2 = r_2v + w_2$, 其中 $w_1, w_2 \in \langle v \rangle^c$,

$$f(ru_1 + tu_2) = f(r(r_1v + w_1) + t(r_2v + w_2)) = f((rr_1v + rw_1) + (tr_2v + tw_2)) = f((rr_1 + tr_2)v + (rw_1 + tw_2)) = rr_1 + tr_2 = rf(r_1v + w_1) + tf(r_2v + w_2) = rf(u_1) + tf(u_2).$$

故得证.

注意此处 f 的构造并非唯一: 构造 $f: V \rightarrow F$, $rv + u \mapsto rt$, 其中 $u \in \langle v \rangle^c$, 同理可得证.

(2) “ \implies ”: 若 $v = 0$, 则 $\forall u \in V$, $f(v) + f(u) = f(v + u) = f(u) \implies f(v) = 0$.

“ \impliedby ”: 假设 $v \neq 0$, 则由 (1), $\exists f \in V^*$, s.t. $f(v) \neq 0$, 矛盾, 故假设错误, $v = 0$.

(3) $f(x) \neq 0 \implies \operatorname{Im} f \neq \{0\} \implies \dim \operatorname{Im} f \neq 0 \implies \dim(\ker f)^c = \dim \operatorname{Im} f = 1$

$\implies \exists v \in V$, s.t. $\ker f^c = \langle v \rangle \implies V = \ker f \oplus \ker f^c = \langle v \rangle^c \oplus \langle v \rangle$ 且 $\operatorname{Im} f \approx \ker f^c = \langle v \rangle$. $\because f(x) \neq 0$, $\therefore x = rv + w$, 其中 $rv \in \langle v \rangle$, $w \in \langle v \rangle^c \implies \langle x \rangle \approx \langle v \rangle \implies V = \ker f \oplus \langle x \rangle$ 且 $\operatorname{Im} f \approx \langle x \rangle$.

(4) “ \implies ”: 令 $K = \ker f = \ker g$.

$\forall x \notin K$, 由 (3) 有, $V = K \oplus \langle x \rangle$.

取 $\lambda = \frac{f(x)}{g(x)}$, $\forall v \in V$, $x = rx + w$, 其中 $rx \in \langle x \rangle$, $w \in K$

$$\implies f(v) = f(rx + w) = rf(x) = r \frac{f(x)}{g(x)} g(x) = r \lambda g(x) = \lambda g(rx) = \lambda g(rx + w) = \lambda g(v) \implies f = \lambda g.$$

“ \impliedby ”: 若 $\exists 0 \neq \lambda \in F$, s.t. $f = \lambda g$, 则显然 $\ker f = \ker g$. □

3.4 对偶基

定义 3.3 对偶基: $\mathcal{B} = \{b_1, \dots, b_n\}$ 为 V 的基, 则 $\forall i, \exists b_i^* \in V^*$, s.t. $b_i^*(b_i) = 1$, $b_i^*(b_j) = 0 \forall i \neq j$, 即 $b_i^*(b_j) = \delta_{ij}$,

从而可构造出 $\mathcal{B}^* = \{b_1^*, \dots, b_n^*\} \subseteq V^*$, 称为 \mathcal{B} 的对偶基.

定理 3.6 (课本定理3.12): (1) $\mathcal{B}^* = \{b_1^*, \dots, b_n^*\}$ 线性无关.

(2) $\dim V < \infty$, 则 \mathcal{B}^* 是 V^* 的基.

证: (1) $\sum_{i=1}^m r_i b_i^* = 0 \implies \forall v \in V, \sum_{i=1}^m r_i b_i^*(v) = (\sum_{i=1}^m r_i b_i^*)(v) = 0(v) = 0$.

取 $v = b_j$, 则 $\sum_{i=1}^m r_i b_i^*(b_j) = \sum_{i=1}^m r_i \delta_{ij} = r_j = 0$.

对各个 b_j 如法炮制, 从而可得 $r_j = 0 \forall i$, 故得证.

(2) $\forall f \in V^*, \forall v \in V, \because \mathcal{B}$ 是 V 的基, $\therefore v = \sum_{i=1}^n r_i b_i$

$\implies b_j^*(v) = b_j^*(\sum_{i=1}^n r_i b_i) = \sum_{i=1}^n r_i b_j^*(b_i) = \sum_{i=1}^n r_i \delta_{ij} = r_j$

回代得 $v = \sum_{i=1}^n b_i^*(v) b_i$

$\implies f(v) = f(\sum_{i=1}^n b_i^*(v) b_i) = \sum_{i=1}^n b_i^*(v) f(b_i) = \sum_{i=1}^n f(b_i) b_i^*(v) = (\sum_{i=1}^n f(b_i) b_i^*)(v)$, 此处 $b_i^*(v), f(b_i) \in F$,

因此可交换位置, 我们可视 $\{b_i^*(v)\}$ 为基, $f(b_i)$ 为 $f(v)$ 在这组基上的展开系数

$\implies f = \sum_{i=1}^n f(b_i) b_i^*$, 即 f 可展开为 $\{\mathcal{B}^*\}$ 的线性表示, 结合 (1) 得证. □

仿照上面的方法, $\forall v \in V$, 我们都可构造 $v^* \in V^*$, s.t. $v^*(v) = 1, \forall u_2 \in \langle v \rangle^c, v^*(u_2) = 0$, 从而有映射 $V \rightarrow V^*, v \mapsto v^*, 0 \mapsto 0$ (零映射).

V^* 本身也是向量空间.

定义 3.4 二重对偶(空间): $V^{**} = \mathcal{L}(V^*, F)$ 称为二重对偶(空间), 其中的元素为 $v^{**} : V^* \rightarrow F, f \mapsto v^{**}(f) = f(v)$.

$V \rightarrow V^* \rightarrow V^{**}, v \mapsto v^* \mapsto v^{**}, b_i \mapsto b_i^* \mapsto b_i^{**}$, 满足 $b_i^*(b_j) = \delta_{ij}, b_i^{**}(b_j^*) = b_j^*(b_i)$, 两个映射复合得 $\tau : V \rightarrow V^{**}, v \mapsto v^{**}$.

(1) τ 是映射.

(2) τ 是线性变换.

(3) $\ker \tau = \{v \in V \mid \tau(v) = 0\} = \{0\} \iff \tau$ 单射.

证: (1) 若 $u = v \in V$, 则 $\forall f \in V^*, u^{**}(f) = f(u) = f(v) = v^{**}(f)$, 即得证.

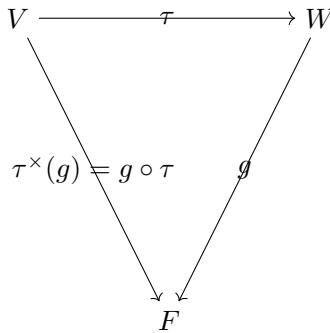
(2) $\forall f \in V^*, (\tau(ru + tv))(f) = (ru + tv)^{**}(f) = f(ru + tv) = rf(u) + tf(v) = ru^{**}(f) + tv^{**}(f) = r\tau(u)(f) + t\tau(v)(f) = (r\tau(u) + t\tau(v))(f) \implies \tau(ru + tv) = r\tau(u) + t\tau(v)$, 结合 (1) 得证.

(3) $\tau(v) = 0 \implies \forall f \in V^*, v^{**}(f) = 0 \implies f(v) = 0 \implies$ (定理 3.5 (1)) $v = 0$, 即得证. □

引理 3.1 (课本引理3.13): 若 $\dim V < \infty$, 则 $\dim V^* = \dim V^{**}$, V^{**} 与 V 同构, 一个线性空间的二重对偶就回到自身, 故实际上套娃式的 V^{****} 是没有意义的, 此处我们就写成 $V^{**} = V$.

3.5 伴随算子

定义 3.5 伴随算子: 由线性变换 $\tau: V \rightarrow W$ 可引出伴随算子 $\tau^\times: W^* \rightarrow V^*$, $g \mapsto \tau^\times(g) = g \circ \tau$.



(1) τ^\times 是映射.

(2) τ^\times 是线性变换.

证: (1) 若 $f = g \in W^*$, 则 $\tau^\times(f) = f \circ \tau = g \circ \tau = \tau^\times(g)$, 故得证.

(2) $\tau^\times(rg_1 + tg_2) = (rg_1 + tg_2) \circ \tau = rg_1 \circ \tau + tg_2 \circ \tau = r\tau^\times(g_1) + t\tau^\times(g_2)$, 结合 (1) 得证.

□

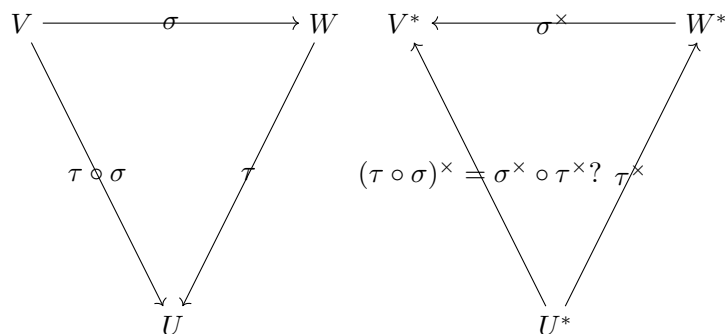
定理 3.7 (课本定理3.18): (1) $\forall \tau, \sigma \in \mathcal{L}(V, W), \forall a, b \in F, (a\tau + b\sigma)^\times = a\tau^\times + b\sigma^\times$.

(2) $\sigma \in \mathcal{L}(V, W), \tau \in \mathcal{L}(W, U)$, 则 $(\tau \circ \sigma)^\times = \sigma^\times \circ \tau^\times$.

(3) $\tau \in \mathcal{L}(V)$ 可逆 $\implies (\tau^{-1})^\times = (\tau^\times)^{-1}$.

证: (1) $\forall f \in W^*, (a\tau + b\sigma)^\times(f) = f \circ (a\tau + b\sigma) = af \circ \tau + bf \circ \sigma = a\tau^\times(f) + b\sigma^\times(f) = (a\tau^\times + b\sigma^\times)(f)$, 即得证.

(2) $\forall f \in U^*, (\tau \circ \sigma)^\times(f) = f \circ (\tau \circ \sigma) = (f \circ \tau) \circ \sigma = \sigma^\times(f \circ \tau) = \sigma^\times(\tau^\times(f)) = (\sigma^\times \circ \tau^\times)(f)$, 即得证.



(3) $1^\times = (\tau \circ \tau^{-1})^\times = (\tau^{-1})^\times \circ \tau^\times \implies (\tau^{-1})^\times = (\tau^\times)^{-1}$.

□

定理 3.8 (课本定理3.18): $\dim V < \infty, \dim W < \infty, \tau \in \mathcal{L}(V, W), \tau^\times \in \mathcal{L}(W^*, V^*), \tau^{\times \times} \in \mathcal{L}(V^{**}, W^{**}) = \mathcal{L}(V, W)$, 则 $\tau^{\times \times} = \tau$.

定理 3.9 (课本定理3.22): $\tau \in \mathcal{L}(V, W)$, 其中 $\dim V < \infty, \dim W < \infty$, \mathcal{B} 和 \mathcal{C} 分别是 V 和 W 的定序基, \mathcal{B}^* 和 \mathcal{C}^* 分别是 \mathcal{B} 和 \mathcal{C} 的对偶基, 则 $[\tau^\times]_{\mathcal{C}^* \mathcal{B}^*} = ([\tau]_{\mathcal{B} \mathcal{C}})^T$.

证: 设 $\dim V = n, \dim W = m$, V 的定序基 $\mathcal{B} = \{b_1, \dots, b_n\}$, W 的定序基 $\mathcal{C} = \{c_1, \dots, c_m\}$, $\tau \in \mathcal{L}(V, W)$ 的矩阵表示为 $[\tau]_{\mathcal{B} \mathcal{C}} = [\alpha_{ij}]_{m \times n}$, $\tau^\times \in \mathcal{L}(W^*, V^*)$ 的矩阵表示为 $[\tau^\times]_{\mathcal{C}^* \mathcal{B}^*} = [\beta_{ij}]_{n \times m}$.

$$[\tau]_{\mathcal{B} \mathcal{C}} = \begin{pmatrix} [\tau(b_1)]_{\mathcal{C}} & \cdots & [\tau(b_n)]_{\mathcal{C}} \end{pmatrix}, \text{ 其中 } [\tau(b_i)]_{\mathcal{C}} = \begin{pmatrix} \alpha_{1i} \\ \vdots \\ \alpha_{mi} \end{pmatrix}, \text{ 即 } \tau(b_i) = \sum_{k=1}^m \alpha_{ki} c_k.$$

$$[\tau^\times]_{\mathcal{C}^* \mathcal{B}^*} = \begin{pmatrix} [\tau^\times(c_1^*)]_{\mathcal{B}^*} & \cdots & [\tau^\times(c_m^*)]_{\mathcal{B}^*} \end{pmatrix}, \text{ 其中 } [\tau^\times(c_i^*)]_{\mathcal{B}^*} = \begin{pmatrix} \beta_{1i} \\ \vdots \\ \beta_{ni} \end{pmatrix}, \text{ 即 } \tau^\times(c_i^*) = \sum_{l=1}^n \beta_{li} b_l^*.$$

又由 τ^\times 的定义, $\tau^\times(c_i^*) = c_i^* \circ \tau$, 故将该复合函数作用于 b_j 上有 $c_i^*(\tau(b_j)) = (c_i^* \circ \tau)(b_j) = (\tau^\times(c_i^*))(b_j) = (\sum_{l=1}^n \beta_{li} b_l^*)(b_j) = \sum_{l=1}^n \beta_{li} b_l^*(b_j) = \sum_{l=1}^n \beta_{li} \delta_{lj} = \beta_{ji} \implies \beta_{ji} = c_i^*(\tau(b_j))$,

代入上面的 $\tau(b_j)$ 的展开式得 $\beta_{ji} = c_i^*(\sum_{k=1}^m \alpha_{kj} c_k) = \sum_{k=1}^m \alpha_{kj} c_i^*(c_k) = \sum_{k=1}^m \alpha_{kj} \delta_{ik} = \alpha_{ij}$, 故得证. \square

Chapter 4

模 I: 基本性质

4.1 模

定义 4.1 模: R 为有单位元交换环, $(M, +)$ 为交换群, 数乘: $R \times M \rightarrow M, (r, m) \mapsto rm$, 若满足

- (1) $(r + t)m = rm + tm$,
- (2) $(rt)m = r(tm)$,
- (3) $r(m_1 + m_2) = rm_1 + rm_2$,
- (4) $1m = m$,

则称 M 为 R 上的模, 记作 $R - \text{mod} \equiv \{R \text{ 上的模}\}$.

\therefore 域是一种特殊的环, \therefore 向量空间是一种特殊的模.

$$0m = 0.$$

证: $0m + 0m = (0 + 0)m = 0m \implies 0m = 0$. □

$$r0 = 0.$$

证: $r0 + r0 = r(0 + 0) = r0 \implies r0 = 0$. □

$$(-r)m = r(-m) = -(rm).$$

证: $(-r)m + rm = (-r + r)m = 0m = 0 \implies (-r)m = -rm$.

$$r(-m) + rm = r(m + (-m)) = r0 = 0 \implies r(-m) = -rm. \quad \square$$

$\forall r \in R$, 可构造映射 $\bar{r}: M \rightarrow M, m \mapsto rm$.

\bar{r} 为 M 上的群同态, 又称**自同态**, 记作 $\bar{r} \in \text{End}(M) \equiv \{M \text{ 上的自同态}\}$.

$\text{End}(M)$ 关于同态的加法、复合成环, 其单位元为 M 上的恒等映射, 记作 1_M , 故还可构造映射 $\phi: R \rightarrow \text{End}(M), r \mapsto \bar{r}$.

证: $\bar{r}(m + n) = r(m + n) = rm + rn = \bar{r}(m) + \bar{r}(n)$, 即映射 \bar{r} 下保持运算结构, 故得证. □

例 4.1: 在交换群 $(G, +)$ 上定义数乘 $\alpha: \mathbb{Z} \times G \rightarrow G, (n, a) \mapsto na$, 其中 $1a = a, 2a = a + a, \dots, na = \overbrace{a + \dots + a}^{n \text{ 个 } a \text{ 相加}}$,

$-a = -1a, -2a = (-a) + (-a), -na = \overbrace{(-a) + \dots + (-a)}^{n \text{ 个 } (-a) \text{ 相加}}$. na 的定义依赖于 G 中的运算, 而运算的本质是卡氏积至原集合的映射, 有唯一的结果, 故该数乘为映射. 此时交换群及其数乘满足

$$(1) (n+m)a = \overbrace{a+\cdots+a}^{(n+m) \text{ 个 } a \text{ 相加}} = \overbrace{a+\cdots+a}^{n \text{ 个 } a \text{ 相加}} + \overbrace{a+\cdots+a}^{m \text{ 个 } a \text{ 相加}} = na + ma,$$

$$(2) (nm)a = \overbrace{a+\cdots+a}^{nm \text{ 个 } a \text{ 相加}} = \overbrace{a+\cdots+a}^{m \text{ 个 } a \text{ 相加}} + \cdots + \overbrace{a+\cdots+a}^{m \text{ 个 } a \text{ 相加}} = \overbrace{ma+\cdots+ma}^{n \text{ 个 } ma \text{ 相加}} = n(ma),$$

$$(3) n(a+b) = \overbrace{(a+b)+\cdots+(a+b)}^{n \text{ 个 } (a+b) \text{ 相加}} = \overbrace{a+\cdots+a}^{n \text{ 个 } a \text{ 相加}} + \overbrace{b+\cdots+b}^{n \text{ 个 } b \text{ 相加}} = na + nb,$$

$$(4) \text{ 由定义显然有 } 1a = a,$$

故 \forall 交换群 $(G, +)$, $G \in \mathbb{Z} - \text{mod}$

例 4.2: $R \in R - \text{mod}$, 其中的数乘即 R 中的乘法.

例 4.3: $\mathbb{Z}_p = \frac{\mathbb{Z}}{p} = \{[0], \cdots, [p-1]\}$, $(\mathbb{Z}_p, +)$ 是交换群, 故 $\mathbb{Z}_p \in \mathbb{Z} - \text{mod}$.

$$\mathbb{Z}_6 = \{[0], [1], [2], [3], [4], [5]\}, n[k] = \overbrace{[k]+\cdots+[k]}^{n \text{ 个 } [k] \text{ 相加}} = [nk].$$

注意到 $[2] \neq [0]$, $3 \neq 0$, 但 $3[2] = [6] = [0]$, 即非零元素的卡氏积在数乘映射下得到零元素, 这意味着非零的单个元素不再线性无关.

实际上, \mathbb{Z}_p 中无线性无关元素.

例 4.4: $R^n = \{(r_1, \cdots, r_n) \mid r_i \in R\} \in R - \text{mod}$, 其中 $(r_1, \cdots, r_n) + (l_1, \cdots, l_n) = (r_1 + l_1, \cdots, r_n + l_n)$, $r(r_1, \cdots, r_n) = (rr_1, \cdots, rr_n)$.

4.2 子模

定义 4.2 子模: $\emptyset \neq S \subseteq M$, 若在 M 的运算下, S 是 R 上的模, 则称 S 为 M 的子模.

定理 4.1 子模的判定方法(课本定理4.1): $\emptyset \neq S \subseteq M$ 是 M 的子模 $\iff \forall u, v \in S, \forall r, t \in R, ru + tv \in S$ (即线性运算封闭).

定理 4.2 (课本定理4.2): $S, T \subseteq M$ 是 M 的子模, 则 $S \cap T$ 为 M 的子模, $S + T \equiv \{u + v \mid u \in S, v \in T\}$ 为 M 的子模.

定理 4.3: $R \in R - \text{mod}$, R 的子模即 R 上的理想.

证: 设 S 为 R 的子模, 则

$$(1) \emptyset \neq S \subseteq R,$$

$$(2) \forall u, v \in S, \forall r, t \in R, ru + tv \in S.$$

特别地, 令 $r = 1, t = -1$, 得 $u - v \in S$, 令 $t = 0$, 得 $ru \in S$,

故 S 为 R 的理想.

4.3 生成模

定义 4.3 生成子模和生成集: $\emptyset \neq S \subseteq M \in R - \text{mod}$, S 的生成子模为 $\langle\langle S \rangle\rangle \equiv$ 包含 S 的最小子模 \equiv 包含 S 的所有子模的交 $= \{\sum_{i=1}^n r_i u_i \mid r_i \in R, u_i \in S, n \in \mathbb{Z}^+\}$, 其中称 S 为生成集.

$\therefore M = \langle\langle M \rangle\rangle$, $\therefore \forall M \in R - \text{mod}$, 都有生成集.

定义 4.4 有限生成模: 由有限个元素生成的模.

定义 4.5 循环模: 由一个元素生成的模.

例 4.5: $\therefore R = \langle\langle 1 \rangle\rangle = \{r1 \mid r \in R\}$, $\therefore R \in R - \text{mod}$ 是一个循环模. □

有限生成模的子模未必是有限生成的, 即有限生成的性质未必会由模遗传至其子模.

例 4.6: 多项式环 $R = F[x_1, \dots, x_n, \dots] \equiv \left\{ \sum_{k_1=0}^{N_1} \dots \sum_{k_n=0}^{N_n} a_{i_1, \dots, i_n} x_{i_1}^{k_1} \dots x_{i_n}^{k_n} \mid a_{i_1 \dots i_n} \in F, N_i \in \mathbb{Z}^+ \right\}$, $R \in R - \text{mod}$ 且 $R = \langle\langle 1 \rangle\rangle$.

令子模 S 为 R 的常数项为零的多项式构成的子集, 则 S 为 R 的子模且 $S = \langle\langle x_1, x_2, \dots \rangle\rangle$, 即 S 并非有限生成的. □

定义 4.6 线性无关: $\emptyset \neq S \subseteq M$, 若 $\sum_{i=1}^n r_i u_i = 0$ 其中 $u_i \in S, r_i \in R \forall i \implies r_1 = \dots = r_n = 0$, 则称 S 线性无关.

在模中, 线性无关元素未必存在, 如例 4.3 中 \mathbb{Z}_p 无线性无关元素.

在向量空间中, 我们有: u, v 线性相关 $\iff \exists$ 不全为零的 $r, t \in R$, s.t. $ru + tv = 0$, 不妨设 $r \neq 0$, 则 $ru = -tv \implies u = -\frac{t}{r}v$.

在模中, 上述说法未必成立: u, v 线性相关 $\iff \exists$ 不全为零的 r, t , s.t. $ru + tv = 0$, (不妨设 $r \neq 0$.) 则 $ru = -tv$, 但由于未必能找到 r 的逆元, 所以未必有 $u = -\frac{t}{r}v$. 故在模中, 线性相关元素未必能相互表示, 即一个线性相关元素未必能由与其线性相关的元素线性表示.

4.4 自由模

定义 4.7 自由模: $M \in R - \text{mod}$, $M = \langle\langle \mathcal{B} \rangle\rangle$ 且 \mathcal{B} 线性无关, 则称 M 为自由模, \mathcal{B} 为 M 的基.

定理 4.4 (课本定理4.3): $\emptyset \neq \mathcal{B} \subseteq M$ 是 M 的基, 则 $\forall v \in M, v$ 可由 \mathcal{B} 中的元素唯一地线性表示.

定理 4.5 (课本定理4.4): \mathcal{B} 是 M 的基 $\iff \mathcal{B}$ 为 M 的极小生成集且为 M 的极大线性无关集.

例 4.7: $\mathbb{Z}_6 = \{[0], [1], [2], [3], [4], [5]\}$.

$\therefore 0[1] = [0], 1[1] = [1], 2[1] = [2], 3[1] = [3], 4[1] = [4], 5[1] = [5], \therefore \mathbb{Z}_6 = \langle\langle [1] \rangle\rangle$.

$0[5] = [0], 1[5] = [5], 2[5] = [10] = [4], 3[5] = [15] = [3], 4[5] = [20] = [2], 5[5] = [25] = [1], \therefore \mathbb{Z}_6 = \langle\langle [6] \rangle\rangle$.

故 \mathbb{Z}_6 的表示不唯一. □

$M \in R - \text{mod}$, 但 M 的子模未必自由.

例 4.8: $R = \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} = \{(n, m) \mid n, m \in \mathbb{Z}\}$, 其中 $(n, m)(k, l) = (nk, ml)$, $(n, m) + (k, l) = (n + k, m + l)$ 仅为交换环 (而非域), $R \in R - \text{mod}$, $R = \langle\langle(1, 1)\rangle\rangle = \{r(1, 1) \mid r \in R = \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}\}$, $\therefore R$ 自由.

但子模 $S = \mathbb{Z} \times \{0\} = \{(n, 0) \mid n \in \mathbb{Z}\}$, $\therefore \forall n \neq 0, (n, 0)(0, 1) = (0, 0)$, \therefore 无线性无关元, 从而非自由. \square

4.5 模同态

定义 4.8 模同态: $M, N \in R - \text{mod}$, 映射 $\tau : M \rightarrow N$, 若 $\forall u, v \in M, \forall r, t \in R, \tau(ru + tv) = r\tau(u) + t\tau(v)$, 则 τ 为 M 到 N 的模同态, 记作 $\tau \in \text{hom}(M, N) = \{M \text{ 到 } N \text{ 的模同态}\}$.

取 $r = t = 1$, 则 $\forall u, v \in M, \tau(u + v) = \tau(u) + \tau(v)$, 故 τ 为群同态.

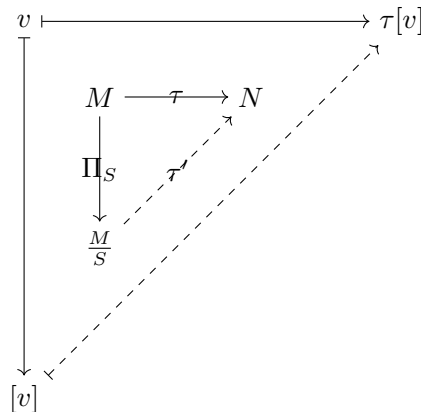
定理 4.6 (课本定理4.6): (1) $\ker \tau \equiv \{v \in M \mid \tau(v) = 0\}$ 是 M 的子模. τ 单射 $\iff \ker \tau = \{0\}$.

(2) $\text{Im } \tau \equiv \{\tau(v) \mid v \in M\}$ 是 N 的子模. τ 满射 $\iff \text{Im } \tau = N$.

4.6 商环

定义 4.9 商模: S 是 M 的子模, 商模 $\frac{M}{S} \equiv \{[v] \mid v \in M\}$.

\therefore 结果与代表元选取无关, $\therefore [u] + [v] = [u + v], r[u] = [ru]$ 是合法运算.



$\Pi_S : M \rightarrow \frac{M}{S}, v \mapsto [v]$, 且满足

(1) Π_S 满射.

(2) $\ker \Pi_S = S$.

4.7 同构定理

定理 4.7 第一同态基本定理: 若 $S \subseteq \ker \tau$, 则 $\exists! \tau' : \frac{M}{S} \rightarrow N$, s.t. $\tau = \tau' \circ \Pi_S$, 即 $\tau(v) = \tau'([v])$, 且 $\ker \tau' = \frac{\ker \tau}{S}$, $\text{Im } \tau' = \text{Im } \tau$.

定理 4.8 第一同构基本定理: 若 $S = \ker \tau$, 则 $\ker \tau' = \frac{\ker \tau}{S} = \{[0]\}$, 即 τ' 单射.

$$\frac{M}{\ker \tau} = \frac{M}{S} \approx \operatorname{Im} \tau.$$

Chapter 5

模 II: 自由与诺特模

定义 5.1 诺特(Noetherian) 模: $M \in R - \text{mod}$, S_1, \dots, S_n, \dots 是 M 的子模且 $S_1 \subseteq \dots \subseteq S_n \subseteq \dots$, 若 $\exists K \in \mathbb{Z}^+$, s.t. $S_K = S_{K+1} = \dots$, 则称 M 满足升链条件 (A.C.C.), 称满足 ACC 的模为诺特模.

定理 5.1 (课本定理5.7): (1) $M \in R - \text{mod}$ 为诺特模 $\iff M$ 的子模是有限生成的.

(2) R 是诺特环 $\iff R$ 的理想都是有限生成的.

证: (1) “ \implies ”: 设 S 是 M 的子模.

若 $S = \{0\}$, 则 $S = \langle \langle 0 \rangle \rangle$ 显然有限生成,

若 $S \neq \{0\}$, 则 $\exists 0 \neq v_1 \in S$, 令 $S_1 = \langle \langle v_1 \rangle \rangle \subseteq S$,

若 $S_1 = S$, 则 S 有限生成,

若 $S_1 \neq S$, 则 $\exists v_2 \in S - S_1$, 令 $S_2 = \langle \langle v_1, v_2 \rangle \rangle \subseteq S$, 则 $S_1 \subseteq S_2 \subseteq S$,

若 $S_2 = S$, 则 S 有限生成,

若 $S_2 \neq S$, 则 $\exists 0 \neq v_3 \in S - S_2$, 令 $S_3 = \langle \langle v_1, v_2, v_3 \rangle \rangle \subseteq S$, 则 $S_1 \subseteq S_2 \subseteq S_3 \subseteq S$,

若 $S_3 = S$, 则 S 有限生成,

若 $S_3 \neq S$, 则 $\exists 0 \neq v_4 \in S - S_3$, 令 $S_4 = \langle \langle v_1, v_2, v_3, v_4 \rangle \rangle \subseteq S$, 则 $S_1 \subseteq S_2 \subseteq S_3 \subseteq S_4 \subseteq S$,

\dots , 以此类推, 得 $S_1 \subseteq S_2 \subseteq \dots \subseteq S_n \subseteq \dots$.

$\therefore S$ 满足 ACC, $\therefore \exists K \in \mathbb{Z}^+$, s.t. $S_K = S_{K+1} = \dots = S = \langle \langle v_1, \dots, v_n \rangle \rangle$, 故 S 有限生成.

“ \impliedby ”: 取 M 的任一子模升链 $S_1 \subseteq \dots \subseteq S_n \subseteq \dots$, 则 $S = \cup_{i \in J} S_i$ 是 M 的子模.

$\therefore M$ 的子模是有限生成的, $\therefore S$ 必然是有限生成, 故设 $S = \langle \langle v_1, \dots, v_m \rangle \rangle$.

$\forall k = 1, \dots, m, v_k \in S = \cup_{i \in J} S_i \implies \exists i_k \in J$, s.t. $v_k \in S_{i_k}$.

令 $K = \max\{i_1, \dots, i_m\}$, 则由升链的性质, $v_1, \dots, v_m \in S_K$

$\implies S_K = S$, 故升链必终止于 S_K .

综上, 得证. □

例 5.1: $\therefore \mathbb{Z}$ 的任意理想均由单个元素生成, 具体地说, I 是 \mathbb{Z} 的理想, 则 $I = \langle n \rangle$, 其中 n 为 I 中的最小整数, $\therefore \mathbb{Z}$ 是诺特环. □

例 5.2: $F[x] = \{\sum_{i=0}^n a_i x^i \mid a_i \in F, n \in \mathbb{Z}\}$, I 是 $F[x]$ 的理想, 则 $I = \langle f(x) \rangle$, 其中 $\deg f(x)$ 是 I 中最小的¹, 故

¹ 多项式间的除法: 若 $\deg g(x) \geq \deg f(x)$, 则 $\exists q(x), r(x) \in F[x]$, s.t. $g(x) = q(x)f(x) + r(x)$ 且 $(r(x) = 0 \text{ 或 } 0 < \deg r(x) < \deg f(x))$

$(F[x], +, \cdot)$ 是诺特环. □

定义 5.2 主理想: 由一个元素生成的诺特环.

定理 5.2 (课本定理5.8): R 为有单位元的交换环, 则 R 是诺特环 $\iff R$ 上的有限生成模都是诺特模.

上述定理意味着有限生成的性质对诺特环是遗传的.

证: “ \Leftarrow ”: $R \in R\text{-mod}$ 且 $R = \langle\langle 1 \rangle\rangle$, 故 R 为诺特环.

“ \Rightarrow ”: 取 R 上的有限生成模 $M = \langle\langle v_1, \dots, v_n \rangle\rangle \in R\text{-mod}$, $M = \{\sum_{i=1}^n r_i v_i \mid r_i \in R\}$.

映射 $\tau: R^n \rightarrow M$, $(r_1, \dots, r_n) \mapsto \sum_{i=1}^n r_i u_i$ 满足

$$(1) \because \tau(r(r_1, \dots, r_n) + t(l_1, \dots, l_n)) = \tau(rr_1 + tl_1, \dots, rr_n + tl_n) = \sum_{i=1}^n (rr_i + tl_i)u_i = r \sum_{i=1}^n r_i u_i + t \sum_{i=1}^n l_i u_i = r\tau(r_1, \dots, r_n) + t\tau(l_1, \dots, l_n), \therefore \tau \text{ 是 } R^n \text{ 到 } M \text{ 上的模同态},$$

$$(2) \because \forall v \in M, \exists (r_1, \dots, r_n), \text{ s.t. } v = \sum_{i=1}^n r_i u_i = \tau(r_1, \dots, r_n), \therefore \tau \text{ 满射},$$

故 τ 满同态.

设 S 是 M 的任一子模, 则 $\tau^{-1}(S)$ 是 R^n 的子模, 且 $\because \tau$ 满同态, $\therefore \tau(\tau^{-1}(S)) = S$.

【思路】 根据定理 5.2, 要证 M 诺特, 即证 M 的子模 S 有限生成, 于是先证 R^n 的子模有限生成, 从而 R^n 诺特, 进而利用引理 5.1 得 S 有限生成.

数学归纳法: 当 $n = 1$ 时, R 诺特 $\implies R^n$ 诺特.

假设当 $n = k$ 时, R^k 诺特, 则当 $n = k + 1$ 时, 要证 R^{k+1} 诺特, 即证 R^{k+1} 的子模有限生成.

取 I 为 R^{n+1} 子模, 取 $I_1 = \{(0, \dots, 0, a_{k+1}) \mid \exists a_1, \dots, a_k \in R, \text{ s.t. } (a_1, \dots, a_k, a_{k+1}) \in I\}$, $I_2 = \{(a_1, \dots, a_k, 0) \mid \exists a_{k+1} \in R, \text{ s.t. } (a_1, \dots, a_k, a_{k+1}) \in I\}$.

$\forall (0, \dots, 0, a_{k+1}), (0, \dots, 0, b_{k+1}) \in I_1, \exists a_1, \dots, a_k, b_1, \dots, b_k \in R, \text{ s.t. } (a_1, \dots, a_k, a_{k+1}), (b_1, \dots, b_k, b_{k+1}) \in I$.

又 $\because I$ 是子模, $\therefore \forall r, t \in R, r(a_1, \dots, a_k, a_{k+1}) + t(b_1, \dots, b_k, b_{k+1}) = (ra_1 + tb_1, \dots, ra_k + tb_k) \in I \implies r(0, \dots, 0, a_{k+1}) + t(0, \dots, 0, b_{k+1}) = (0, \dots, 0, ra_{k+1} + tb_{k+1}) \in I_1$, 故 I_1 为 R^{k+1} 的子模.

$\forall (a_1, \dots, a_k, 0), (b_1, \dots, b_k, 0) \in I_2, \exists a_{k+1}, b_{k+1}, \text{ s.t. } (a_1, \dots, a_k, a_{k+1}), (b_1, \dots, b_k, b_{k+1}) \in I$.

又 $\because I$ 是子模, $\therefore \forall r, t \in R, r(a_1, \dots, a_k, a_{k+1}) + t(b_1, \dots, b_k, b_{k+1}) = (ra_1 + tb_1, \dots, ra_k + tb_k) \in I \implies r(a_1, \dots, a_k, 0) + t(b_1, \dots, b_k, 0) = (ra_1 + tb_1, \dots, ra_k + tb_k, 0) \in I_2$, 故 I_2 为 R^{k+1} 的子模.

令 $J_1 = \{a_{k+1} \mid (0, \dots, 0, a_{k+1}) \in I_1\}$, $J_2 = \{(a_1, \dots, a_k) \mid (a_1, \dots, a_k) \in I_2\}$, 易证 J_1 是 R 的子模, J_2 是 R^k 的子模.

$\because R, R^k$ 诺特, $\therefore J_1, J_2$ 有限生成, 设 $J_1 = \langle\langle g_1, \dots, g_m \rangle\rangle$, $J_2 = \langle\langle f_1, \dots, f_n \rangle\rangle$, 其中 $g_i \in R, f_i \in R^k$.

于是 $\forall i = 1, \dots, m, (0, \dots, 0, g_i) \in I_1$, 由 I_1 的定义, $\exists g_{i_1}, \dots, g_{i_k} \in R, \text{ s.t. } \bar{g}_i \equiv (g_{i_1}, \dots, g_{i_k}, g_i) \in I$.

同理可记 $\bar{f}_i = (f_i, 0)$.

$\forall r = (r_1, \dots, r_k, r_{k+1}) \in I$, 有 $(0, \dots, 0, r_{k+1}) \in I_1$, 即 $r_{k+1} \in J_1 = \langle\langle g_1, \dots, g_m \rangle\rangle$.

于是 $r_{k+1} = \sum_{i=1}^m \alpha_i g_i, (h, 0) \equiv r - \sum_{i=1}^m \alpha_i \bar{g}_i = (r_1, \dots, r_k, 0) \in I_2 \implies h \in J_2$.

设 $h = \sum_{i=1}^n \beta_i f_i$, 则 $r = \sum_{i=1}^m \alpha_i \bar{g}_i + \sum_{i=1}^n \beta_i \bar{f}_i$, 故 I 由 $\bar{g}_1, \dots, \bar{g}_m, \bar{f}_1, \dots, \bar{f}_n$ 生成 $\implies R^{k+1}$ 诺特 $\implies R^n$ 诺特 $\forall n \implies S = \tau(\tau^{-1}(S))$ 有限生成. □

引理 5.1: $\tau: M \rightarrow N$ 满同态, 则 M 有限生成 $\implies N$ 有限生成, 即有限生成模的满同态像有限生成.

证: $\because M$ 有限生成, \therefore 设 $M = \langle \langle v_1, \dots, v_n \rangle \rangle = \{ \sum_{i=1}^n r_i v_i \mid r_i \in R \}$.

$\because \tau$ 满同态, $\therefore N = \text{Im } \tau = \{ \tau(u) \mid u \in M \} = \{ \tau(u) \mid u = \sum_{i=1}^n r_i v_i, r_i \in R \} = \{ \tau(\sum_{i=1}^n r_i v_i) \mid r_i \in R \} = \{ \sum_{i=1}^n r_i \tau(v_i) \mid r_i \in R \} = \langle \langle \tau(v_1), \dots, \tau(v_n) \rangle \rangle$, 故 N 有限生成. \square

定理 5.3 Hilbert 基底定理(课本定理5.9): R 是诺特环 $\implies R[x] \equiv \{ \sum_{i=0}^n a_i x^i \mid a_i \in R, n \in \mathbb{Z}^+ \}$ 诺特, 其中 $\sum_{i=0}^n a_i x^i + \sum_{j=0}^m b_j x^j = \sum_{k=0}^{\max\{n,m\}} (a_k + b_k) x^k$, $(\sum_{i=0}^n a_i x^i) \left(\sum_{j=0}^m b_j x^j \right) = \sum_{k=0}^{nm} \left(\sum_{i+j=k} a_i b_j \right) x^k$.

证: 设 I 是 $R[x]$ 的理想, 则 $I_k = \{ r_k \in R \mid \exists a_0 + a_1 x + \dots + a_{k-1} x^{k-1} + r_k x^k \in I \}$ 是 R 的理想.

又 $\because \forall f(x) \in I, xf(x) \in I, \therefore I_0 \subseteq I_1 \subseteq \dots \subseteq I_K \subseteq \dots$.

又 $\because R$ 诺特, $\therefore \exists K \in \mathbb{Z}^+$, s.t. $I_K = I_{K+1} = \dots$, 且 R 的理想均有限生成.

设 $I_0 = \langle r_{01}, r_{02}, \dots, r_{0t_0} \rangle, I_1 = \langle r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1t_1} \rangle, \dots, I_K = \langle r_{K1}, r_{K2}, \dots, r_{Kt_K} \rangle$.

$g_{01} = r_{01} \in I, g_{02} = r_{02} \in I, \dots, g_{0t_0} = r_{0t_0} \in I,$

$g_{11} = r_{11}x + O(1) \in I, g_{12} = r_{12}x + O(1) \in I, \dots, g_{1t_1} = r_{1t_1}x + O(1) \in I,$

$\dots,$

$g_{K1} = r_{K1}x^K + O(x^{K-1}) \in I, g_{K2} = r_{K2}x^K + O(x^{K-1}) \in I, \dots, g_{Kt_K} = r_{Kt_K}x^K + O(x^{K-1}) \in I,$

则 I 由 $\{ g_{ij} \mid i = 1, \dots, K; j = 1, \dots, t_i \}$ 生成.

$\forall f(x) \in I$, 设 $f(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i$.

取 $a_n \in I_n$, 若 $n > K$, 则 $I_n = I_K = \langle r_{K1}, \dots, r_{Kt_K} \rangle$, 从而 $a_n = \sum_{i=1}^{t_K} \alpha_i r_{Ki}$,

$\implies f(x) = a_n x^n + O(x^{n-1}) = \sum_{i=1}^{t_K} \alpha_i r_{Ki} x^n + O(x^{n-K}) = x^{n-K} \left(\sum_{i=1}^{t_K} \alpha_i g_{Ki} \right) + O(x^{n-K}),$

$\implies f(x) - x^{n-K} \left(\sum_{i=1}^{t_K} \alpha_i g_{Ki} \right) = \beta_{n-1} x^{n-1} + O(x^{n-2}),$

重复以上操作有限次直至多项式的最高次数 $n < K$, 此时, $f(x)$ 可完全由 g_{ij} 表示 $\implies I$ 有限生成, 故由定理 5.1 得, $R[x]$ 诺特. \square

例 5.3: $\mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ 诺特 $\implies \mathbb{Z}[x], \mathbb{Q}[x], \mathbb{R}[x], \mathbb{C}[x]$ 诺特.

$\mathbb{R}[z] = \{ \sum_{i=0}^n a_i x^i \mid a_i \in \mathbb{R}, n \in \mathbb{Z}^+ \}$.

方程组 $\begin{cases} f_1(x) = a_{1n}x^n + a_{1,n-1}x^{n-1} + \dots + a_{11}x + a_{10} = 0, \\ \dots \\ f_m(x) = a_{mn}x^n + a_{m,n-1}x^{n-1} + \dots + a_{m1}x + a_{m0} = 0, \end{cases}$ 的解为 \mathbb{R} 的子集合,

令 $h(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i f_i(x)$, 若 $f_i(x) = 0 \forall i$, 则 $h(x) = 0$.

方程组与解集合之间存在的一一对应的关系, 正如 $\mathbb{R}[x]$ 与 \mathbb{R} 之间的对应关系. \square

Chapter 6

主理想整环上的模

定义 6.1 主理想整环(PID): 每个理想均由一个元素生成的整环.

例 6.1: $\mathbb{Z}, \mathbb{C}[x]$ 为 PID. □

PID 必诺特.

\mathbb{R} 为整环, $a, b, r, s \in R$,

(1)

定义 6.2 整除: 若 $\exists x \in R$, s.t. $s = xr$, 则称 r 整除 s , 记作 $r \mid s$.

(2)

定义 6.3 单位: R 中的可逆元.

例 6.2: \mathbb{Z} 中, 1 和 -1 为单位.

若 F 为域, 则 $F^* \equiv F - \{0\}$ 中的元素均为单位. □

(3)

定义 6.4 素元: $0 \neq q \in R$, 若 $p \mid ab \implies p \mid a$ 或 $p \mid b$, 则称 p 为素元.

(4)

定义 6.5 不可约元: $0 \neq r \in R$, 若 $r = ab \implies a$ 或 b 为单位, 则称 r 为不可约元.

(5)

定义 6.6 互素: a 与 b 无非单位公因子, 则称 a 与 b 互素.

注意:

- 单位必素, 必不可约.

证: 设 $0 \neq r \in R$ 为单位, 则必 $\exists a$ 的逆 a^{-1} .

若 $r \mid ab$, 则 $\therefore (ar^{-1})r = a, (br^{-1})r = b, \therefore r$ 为素元.

若 $r = ab$, 则 $\therefore (r^{-1}a)b = r^{-1}(ab) = r^{-1}r = 1$, 即 b 可逆, 逆元为 $r^{-1}a$, $\therefore r$ 为不可约元. \square

- 整环中, 素元不可约, 反之未必.

证: 设 $p \neq 0$ 为素元且 $p = ab$.

显然 $p \mid ab$, 又 $\therefore p$ 为素元, $\therefore p \mid a$ 或 $p \mid b$.

无妨 $p \mid a$, 则 $\exists x \in R$, s.t. $a = px$

$\implies p = ab = pxb \implies p(1 - xb) = 0$.

$\therefore p \neq 0$ 且 R 为整环 (即 R 无零因子), $\therefore 1 - xb = 0 \implies xb = 1 \implies b$ 为单位, 故 p 为不可约元. \square

例 6.3: (不可约元非素的例子) $R = \{a + b\sqrt{-5} \mid a, b \in \mathbb{Z}\}$ 为整环.

$9 = 3^2 = (2 + \sqrt{-5})(2 - \sqrt{-5})$, 其中 3 不可约 (证略), $3 \mid (2 + \sqrt{-5})(2 - \sqrt{-5})$, 但 $3 \nmid (2 + \sqrt{-5}), 3 \nmid (2 - \sqrt{-5}) \implies 3$ 非素. \square

- 非整环中, 素元未必不可约.

例 6.4: $(\mathbb{Z}_6, +, \cdot)$ 非整环, $[2]$ 为素元, 但 $[2] = [2][4]$, $[2]$ 和 $[4]$ 均非单位 $\implies [2]$ 可约. \square

定理 6.1 (课本定理0.29): R 为 PID, $a, b \in R$, 则 a 与 b 互素 $\iff \exists r, t \in R$, s.t. $ra + tb = 1$.

证: “ \implies ”: 令 R 的理想 $I = \langle a, b \rangle$.

$\therefore R$ 是主理想, $\therefore I$ 可由一个元素生成, 设 $I = \langle c \rangle$, 其中 $c \in R$.

又 $\therefore a \in I, b \in I, \therefore c \mid a, c \mid b \implies c$ 为 a 和 b 的公因子,

$\therefore a, b$ 互素, $\therefore c$ 为单位, 即 $\exists c^{-1} \in R$, s.t. $1 = c^{-1}c \in I$.

$\therefore 1 \in I, \therefore 1 = ra + tb$.

“ \Leftarrow ”: 取 c 为 a 和 b 的公因子, $a = cx, b = cy$.

$\therefore 1 = ra + tb = rcx + tcy = c(rx + ty), \therefore c \mid 1 \implies c$ 可逆, 即 c 为单位. \square

有算法可以在给定 a, b 下找到 s, t , 此处不赘述.

定理 6.2 (课本定理0.29): R 是 PID, $\forall 0 \neq r \in R, r = up_1 \cdots p_n$ 且该分解式唯一, 其中 u 为单位, p_i 是 R 中的不可约元, $n \in \mathbb{Z}^+$.

证: $\forall 0 \neq r \in R$, 首先分解出 r 中的可逆因子, $r = ur'$, 其中 u 为单位, $r' = u^{-1}r$ 非单元.

若 r' 不可约, 则得证;

若 r' 可约, 则 $r' = r_1 r_2$, 其中 r_1, r_2 均非单位.

若 r_1, r_2 均不可约, 则得证;

否则无妨 r_2 可约, 则 $r_2 = r_3 r_4$.

重复如上分解操作, 可得 $r' = r_1 r_2 = r_1 (r_3 r_4) = (r_1 r_3)(r_5 r_6) = (r_1 r_3 r_5)(r_7 r_8) = \cdots$,

同时得到升链 $\langle r' \rangle \subseteq \langle r_2 \rangle \subseteq \langle r_4 \rangle \subseteq \cdots$.

又 $\therefore R$ 为 PID, $\therefore R$ 诺特 \implies 上述升链有限长, 即上述分解式中不可约元个数有限, 故最终得 $r = u^{-1}p_1 \cdots p_n$.

下证上述分解唯一: 假设 r' 有两个不可约元分解式 $r' = p_1 \cdots p_n$ 和 $r' = q_1 \cdots q_m$.

首先消去相同的不可约元, 留下 $p_i \neq q_j \forall i, j$, 等式两边不可能均为非单位的不同不可约元的乘积, 故必消得 $1 = 1$. \square

定义 6.7 挠元(Torsion): $M \in R - \text{mod}$, $v \in M$, 若 $\exists 0 \neq r \in R$, s.t. $rv = 0$, 则称 v 为 M 的挠元.

定义 6.8 挠模: 所有元素均为挠元的模.

定义 6.9 无挠: 若一模无非零挠元, 则称该模无挠.

与线性无关类似, 若 $0 \neq v \in M$, $r \in R$, $rv = 0$, 且 M 无挠, 则 $r = 0$.

定义 6.10 挠子模: $M_{\text{tor}} = \{v \in M \mid v \text{ 为挠元}\}.$

$\because 0$ 为 M 的挠元, $0 \in M_{\text{tor}}$, $\therefore M_{\text{tor}} \neq \emptyset$.

若 R 交换, 则 M_{tor} 为 M 的子模.

证: $\forall u, v \in M_{\text{tor}}$, $\exists 0 \neq r_1, r_2 \in R$, s.t. $r_1 u = 0$, $r_2 v = 0$.

$\forall s, t \in R$, $(r_1 r_2)(su + tv) = r_2 s(r_1 u) + r_1 t(r_2 v) = r_2 s \cdot 0 + r_1 t \cdot 0 = 0 + 0 = 0$ 且 $r_1 r_2 \neq 0 \implies (su + tv) \in M_{\text{tor}}$, 故得证. \square

$\frac{M}{M_{\text{tor}}}$ 无挠.

证: 假设 $[0] \neq [v] \in \frac{M}{M_{\text{tor}}}$ 为挠元, 则 $\exists 0 \neq r \in R$, $r[v] = [rv] = [0] = M_{\text{tor}} \implies rv \in M_{\text{tor}} \implies v \in M_{\text{tor}} \implies [v] = M_{\text{tor}} = [0]$, 与假设矛盾, 故假设错误, 得证. \square

定义 6.11 零化子: $v \in M \in R - \text{mod}$, v 的零化子 $\text{ann}(v) \equiv \{r \in R \mid rv = 0\} \subseteq R$.

N 是 M 的子模, 则 $\text{ann}(N) = \{r \in R \mid rN \equiv \{rv \mid v \in N\} = \{0\}\} \subseteq R$.

$\text{ann}(v)$ 是 R 的理想.

证: $\forall s, t \in \text{ann}(v)$, $sv = tv = 0 \implies sv - tv = (s - t)v = 0 \implies s - t \in \text{ann}(v)$.

$\forall r \in R$, $(rs)v = r(sv) = r \cdot 0 = 0 \implies rs \in \text{ann}(v)$.

综上, 得证. \square

同理, $\text{ann}(N)$ 也是 R 的理想

定义 6.12 阶: 若 R 为 PID, 则 $\text{ann}(v), \text{ann}(N)$ 均为主理想, 其生成元分别称为 v 和 N 的阶.

定理 6.3 (课本定理6.5): R 为 PID, $M \in R - \text{mod}$ 自由, 则 M 的子模均自由.

证: (不严谨的证明, 仅针对 M 有限生成 (的特殊情况) 且自由.

设 $M = \langle \langle v_1, \dots, v_n \rangle \rangle = \{\sum_{i=1}^n r_i v_i \mid r_i \in R\}$, 其中 $\{v_1, \dots, v_n\}$ 线性无关.

$\forall v \in M$, $v = \sum_{i=1}^n r_i v_i$ 展开唯一, 定序后, $M \longleftrightarrow R^n$, $v \longleftrightarrow \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}$ 模同构.

设 S 是 R^n 的子模, 取 R 的理想 $I_k = \{r_k \in R \mid \exists a_1, \dots, a_{k-1} \in R, \text{ s.t. } (a_1, \dots, a_{k-1}, r_k, 0, \dots, 0) \in S\}$.

$\because R$ 为 PID, $\therefore I_k$ 由一个元素生成, 设 $I_k = \langle r_k \rangle$, 其中 $r_k \neq 0, k = 1, \dots, n$.

取 $u_k = (a_1^k, \dots, a_{k-1}^k, r_k, 0, \dots, 0) \in S, S = \langle u_1, \dots, u_n \rangle$ (下证) 且显然 $\{u_1, \dots, u_n\}$ 线性无关.

取 $(b_1, \dots, b_n) \in S$, 若 $b_n \neq 0$, 则 $b_n \in I_n = \langle r_n \rangle \implies \exists x_n \in R, \text{ s.t. } b_n = x_n r_n \implies (b_1, \dots, b_n) - x_n b_n = (\dots, 0)$, 重复如上操作, 最终可将 (b_1, \dots, b_n) 用 $\{u_1, \dots, u_n\}$ 表示.

故得证. \square

定理 6.4 (课本定理6.6): R 为 PID, $M \in R - \text{mod}$ 有限生成, 则 M 自由 $\iff M$ 无挠.

证: “ \implies ”: 设 $M = \langle \langle v_1, \dots, v_n \rangle \rangle$ 且 $\{v_1, \dots, v_n\}$ 线性无关.

$\forall v \in V, v = \sum_{i=1}^n r_i v_i$.

若 $rv = 0$, 则 $r(\sum_{i=1}^n r_i v_i) = \sum_{i=1}^n (rr_i) v_i = 0$.

$\because \{v_1, \dots, v_n\}$ 线性无关, $\therefore rr_1 = \dots = rr_n = 0$.

$\because R$ 为整环 (无零因子), \therefore 若 $r \neq 0$, 则 $r_1 = \dots = r_n = 0 \implies v = 0$, 故 M 无挠.

“ \impliedby ”: 设 $M = \langle \langle u_1, \dots, u_m \rangle \rangle$.

不妨设 u_1, \dots, u_k 是其中最大的线性无关组, 即 $\forall i = k+1, \dots, m, \{u_1, \dots, u_k, u_i\}$ 线性相关

$\implies \exists$ 不全为零的 $a_{i1}, \dots, a_{ik}, a_i, \text{ s.t. } a_{i1}u_1 + \dots + a_{ik}u_k + a_i u_i = 0$.

显然 $a_i \neq 0$ (否则 $a_{i1}u_1 + \dots + a_{ik}u_k = 0 \implies a_{i1} = \dots = a_{ik} = 0$, 矛盾) $\implies a_i u_i = -(a_{i1}u_1 + \dots + a_{ik}u_k)$.

令 $a = a_{k+1} \dots a_m$.

$\because R$ 为整环 (无零因子), $\therefore a \neq 0$,

$aM = \langle \langle au_1, \dots, au_k, au_{k+1}, \dots, au_m \rangle \rangle \subseteq \langle \langle u_1, \dots, u_k \rangle \rangle$,

$\because \{u_1, \dots, u_k\}$ 线性无关, $\therefore \langle \langle u_1, \dots, u_k \rangle \rangle$ 是自由模.

$\because R$ 为 PID, 自由具有遗传性, $\therefore aM$ 自由.

构造映射 $\tau: M \rightarrow aM, v \mapsto av$.

(1) τ 线性.

(2) $\because M$ 无挠且 $a \neq 0, \therefore \ker \tau = \{v \in M \mid av = 0\} = \{0\}$, 即 τ 单射.

(3) τ 满射.

故 τ 同构 $\implies M$ 也自由.

综上, 得证. \square

$\because M$ 自由, $\therefore M = \langle \langle v_1, \dots, v_n \rangle \rangle$ 且 $\{v_1, \dots, v_n\}$ 线性无关 $\implies \langle \langle v_i \rangle \rangle \cap \langle \langle v_j \rangle \rangle = \{0\} \forall i \neq j$

$\implies M = \langle \langle v_1 \rangle \rangle \oplus \dots \oplus \langle \langle v_n \rangle \rangle$.

定理 6.5 (课本定理6.8): R 是 PID, $M \in R - \text{mod}$ 有限生成, 则 $M = M_{\text{free}} \oplus M_{\text{tor}}$, 其中 $M_{\text{free}} \approx \frac{M}{M_{\text{tor}}}$.

证: M_{tor} 为挠子模且 $\frac{M}{M_{\text{tor}}}$ 无挠.

$\because \Pi: M \rightarrow \frac{M}{M_{\text{tor}}}, u \mapsto [u]$ 满同态且 M 有限生成, 由引理 6.1 得 $\frac{M}{M_{\text{tor}}}$ 有限生成.

又 $\because \frac{M}{M_{\text{tor}}}$ 无挠, $\therefore \frac{M}{M_{\text{tor}}}$ 自由.

取 $\frac{M}{M_{\text{tor}}} = \langle \langle [u_1], \dots, [u_t] \rangle \rangle$, 其中 $\{[u_1], \dots, [u_t]\}$ 线性无关. 下证 $\{u_1, \dots, u_t\}$ 线性无关:

证: 若 $\sum_{i=1}^t r_i u_i = 0$, 则 $\Pi\left(\sum_{i=1}^t r_i u_i\right) = \sum_{i=1}^t r_i \Pi(u_i) = \sum_{i=1}^t r_i [u_i] = [0]$.

又 $\because \{[u_1], \dots, [u_t]\}$ 线性无关, $\therefore r_1 = \dots = r_t = 0 \implies \{u_1, \dots, u_t\}$ 线性无关. \square

故 $\langle\langle u_1, \dots, u_t \rangle\rangle$ 为自由模, 记作 M_{free} .

确定了 M_{free} 和 M_{tor} 后, 下面来证 $M = M_{\text{free}} \oplus M_{\text{tor}}$:

$$\forall v \in M, \Pi(v) = [v] \in \frac{M}{M_{\text{tor}}} = \langle\langle [u_1], \dots, [u_t] \rangle\rangle \implies \Pi(v) = [v] = \sum_{i=1}^t l_i [u_i].$$

$$\text{令 } u = \sum_{i=1}^t l_i u_i \in M_{\text{free}}, \text{ 则 } \Pi(u) = \Pi\left(\sum_{i=1}^t l_i u_i\right) = \sum_{i=1}^t l_i \Pi(u_i) = \sum_{i=1}^t l_i [u_i] = \Pi(v).$$

$$\Pi(v - u) = \Pi(v) - \Pi(u) = [0] \implies v - u \in \ker \Pi = M_{\text{tor}}.$$

于是 $v = u + (v - u)$, 其中 $u \in M_{\text{free}}, v - u \in M_{\text{tor}} \implies M = M_{\text{free}} + M_{\text{tor}}$.

取 $w \in M_{\text{free}} \cap M_{\text{tor}}$, 则 $w \in M_{\text{free}} \iff w = \sum_{i=1}^t \alpha_i u_i$,

且 $w \in M_{\text{tor}} \iff \Pi(w) = 0$

$$\implies 0 = \Pi(w) = \Pi\left(\sum_{i=1}^t \alpha_i u_i\right) = \sum_{i=1}^t \alpha_i \Pi(u_i) \implies \alpha_1 = \dots = \alpha_t = 0 \implies w = 0 \implies M_{\text{free}} \cap M_{\text{tor}} = \{0\}.$$

综上, 得证. □

引理 6.1: $\tau: M \rightarrow N$ 满同态, 若 M 有限生成, 则 N 有限生成.

证: $\because \tau: M \rightarrow N$ 满同态, $\therefore \forall w \in N, \exists u \in M, \text{ s.t. } w = \tau(u)$,

又 $\because M$ 有限生成, 设 $M = \langle\langle v_1, \dots, v_k \rangle\rangle$, $\therefore u = \sum_{i=1}^k r_i u_i \implies \tau(u) = \tau\left(\sum_{i=1}^k r_i u_i\right) = \sum_{i=1}^k r_i \tau(u_i)$,

故 $N = \langle\langle \tau(u_1), \dots, \tau(u_k) \rangle\rangle$, 即 N 有限生成. □

至此, $M_{\text{free}} = \langle\langle u_1, \dots, u_t \rangle\rangle = \langle\langle u_1 \rangle\rangle \oplus \dots \oplus \langle\langle u_t \rangle\rangle$ 已拆解到位. 那么能否以及如何继续拆解 M_{tor} 呢?

定理 6.6 (课本定理6.10): R 为 PID, $M \in R - \text{mod}$ 为挠模且 $\text{ann}(M) = \langle\langle \mu \rangle\rangle$, 其中 $\mu = up_1^{e_1} \dots p_m^{e_m}$, u 为单位, p_i 均不可约且互不相等, $e_i \in \mathbb{Z}^+$,

则 $M = M_{p_1} \oplus \dots \oplus M_{p_m}$, 其中 $M_{p_i} = \{v \in M \mid p_i^{e_i} v = 0\}$ 是阶为 $p_i^{e_i}$ (即 $\text{ann}(M_{p_i}) = \langle p_i^{e_i} \rangle$) 的准素子模.

证: 不失一般性, 设 $\mu = pq$, 其中 p 与 q 互素, 要证 $M = M_p \oplus M_q$, 其中 $M_p = \{v \mid pv = 0\}$, $M_q = \{v \mid qv = 0\}$.

$\because p$ 与 q 互素, $\therefore \exists r, t \in R, \text{ s.t. } rp + tq = 1$.

$$\forall v \in M, v = 1v = (rp + tq)v = (rp)v + (tq)v,$$

$$q(rp)v = (qrp)v = (rpq)v = r(pq)v = r\mu v.$$

$$\text{又 } \because \langle\langle \mu \rangle\rangle \text{ 为零化子, } \therefore q(rpv) = r\mu v = 0 \implies rpv \in M_q,$$

同理, $tqv \in M_p$, 故 $M = M_p + M_q$.

若 $v \in M_p \cap M_q$, 则 $v \in M_p \iff pv = 0$,

且 $v \in M_q \iff qv = 0$

$$\implies v = 1v = (rp + tq)v = rpv + tqv = r0 + t0 = 0 + 0 = 0 \implies M_p = M_q = \{0\}.$$

$\because M_p = \{v \mid pv = 0\}$, $\therefore \text{ann}(M_p) = \langle p \rangle$, 易推广得 $M_{p_i} = \langle p_i^{e_i} \rangle$.

综上, 得证. □

然后准素子模能否及如何进一步分解呢?

定理 6.7 (课本定理6.11): R 为 PID, $M \in R - \text{mod}$ 有限生成且为挠模, $\text{ann}(M) = \langle p^e \rangle$, 其中 p 不可约, $e \in \mathbb{Z}^+$,

则 $M = \langle\langle v_1 \rangle\rangle \oplus \dots \oplus \langle\langle v_n \rangle\rangle$, 其中 $\text{ann}(v_i) = \langle p^{e_i} \rangle$, 且 $e = e_1 \geq \dots \geq e_n$.

证: (存在性证明) 不失一般性, 只需证 M 由两个元素生成时, 定理成立, 即可由数学归纳法推广到一般情况.

设 $M = \langle\langle u_1, u_2 \rangle\rangle$ 且 $u_1, u_2 \neq 0$, $\text{ann}(M) = \{r \in R \mid rM = \{0\}\} = \langle p^e \rangle$.

$$\because u_1 \in M, \therefore p^e u_1 = 0 \implies p^e \in \text{ann}(u_1),$$

同理, $p^e \in \text{ann}(u_2)$.

若 $\text{ann}(u_1) = \langle b_1 \rangle$, 则 $\because p$ 不可约, $\therefore b_1 \mid p^e \implies b_1 = p^{l_1}, l_1 \leq e$,

同理, 若 $\text{ann}(u_2) = \langle b_2 \rangle$, 则 $b_2 = p^{l_2}, l_2 \leq e$.

假设 $l_1 < e, l_2 < e$, 令 $l = \max\{l_1, l_2\}$, 则 $p^e \nmid p^l$ 且 $p^l \in \text{ann}(M)$, 与 $\text{ann}(M) = \langle p^e \rangle$ 矛盾, 故假设错误, l_1, l_2 中至少有一个 $= e$.

不妨设 $l_1 = e$ 即 $\text{ann}(u_1) = \langle p^e \rangle$.

$M = \langle \langle u_1, u_2 \rangle \rangle \implies M = \langle \langle u_1 \rangle \rangle + \langle \langle u_2 \rangle \rangle$,

若 $\langle \langle u_1 \rangle \rangle \cap \langle \langle u_2 \rangle \rangle = \{0\}$, 则 $M = \langle \langle u_1 \rangle \rangle \oplus \langle \langle u_2 \rangle \rangle$, 得证.

若 $\langle \langle u_1 \rangle \rangle \cap \langle \langle u_2 \rangle \rangle \neq \{0\}$, 则 $\exists 0 \neq r \in R$, s.t. $ru_2 \in \langle \langle u_1 \rangle \rangle$.

取 R 的理想 $J = \{r \in R \mid ru_2 \in \langle \langle u_1 \rangle \rangle\}$.

$\because R$ 为 PID, $\therefore J$ 由一个元素生成, 设 $J = \langle \langle t \rangle \rangle$.

$\because p^e u_2 = 0, \therefore p^e \in J \implies t \mid p^e$.

又 $\because p$ 不可约, $\therefore t = p^{e_2}$, 其中 $e_2 \leq e$.

又 $\because J = \{r \in R \mid ru_2 \in \langle \langle u_1 \rangle \rangle\} = \langle \langle t \rangle \rangle, \therefore p^{e_2} u_2 \in \langle \langle u_1 \rangle \rangle$, 即 $\exists \alpha \in R$, s.t. $p^{e_2} u_2 - \alpha u_1 = 0$

$\implies p^{e-e_2}(p^{e_2} u_2 - \alpha u_1) = 0 \implies p^e u_2 - p^{e-e_2} \alpha u_1 = 0$.

又 $\because p^e u_2 = 0, \therefore p^{e-e_2} \alpha u_1 = 0 \implies p^{e-e_2} \alpha \in \text{ann}(u_1)$.

又 $\because \text{ann}(u_1) = \langle p^e \rangle, \therefore p^e \mid p^{e-e_2} \alpha \implies p^{e_2} \mid \alpha \implies \exists \beta \in R$, s.t. $\alpha = \beta p^{e_2}$,

回代到 $p^{e_2} u_2 - \alpha u_1 = 0$ 得 $p^{e_2} u_2 - p^{e_2} \beta u_1 = 0 \implies p^{e_2}(u_2 - \beta u_1) = 0$.

令 $w = u_2 - \beta u_1$, 则 $M = \langle \langle u_1, w \rangle \rangle$, 且 $\langle \langle u_1 \rangle \rangle \cap \langle \langle w \rangle \rangle = \{0\}$ (下证),

证: 设 $v \in \langle \langle u_1 \rangle \rangle \cap \langle \langle w \rangle \rangle$, 则 $v \in \langle \langle u_1 \rangle \rangle$,

且 $v \in \langle \langle w \rangle \rangle \implies \exists r \in R, v = rw$

$\implies v = rw = ru_2 - r\beta u_1 \in \langle \langle u_1 \rangle \rangle$.

$\because r\beta u_1 \in \langle \langle u_1 \rangle \rangle, \therefore ru_2 \in \langle \langle u_1 \rangle \rangle \implies r \in J \implies \exists r_1$, s.t. $r = tr_1 = p^{e_2} r_1$,

回代得 $v = rw = p^{e_2} r_1 u_2 - p^{e_2} r_1 \beta u_1 = r_1 p^{e_2} u_2 - r_1 (\beta p^{e_2}) u_1 = r_1 (p^{e_2} u_2 - \alpha u_1) = r_1 \cdot 0 = 0 \implies \langle \langle u_1 \rangle \rangle \cap \langle \langle w \rangle \rangle = \{0\}$. □

故 $M = \langle \langle u_1 \rangle \rangle \oplus \langle \langle w \rangle \rangle$, 其中 u_1 的阶为 p^{e_1} , w 的阶为 p^{e_2} , $e_2 \leq e_1 = e$. □

总结定理 6.5, 6.6 和 6.7, 可得:

定理 6.8 (课本定理6.12): R 为 PID, $M \in R - \text{mod}$ 有限生成,

则 $M = M_{\text{free}} \oplus M_{\text{tor}}$, 其中 $M_{\text{free}} \approx \frac{M}{M_{\text{tor}}}$.

若 $\text{ann}(M_{\text{tor}}) = \langle \mu \rangle$, 其中 $\mu = up_1^{e_1} \cdots p_n^{e_n}$, u 为单位, p_i 不可约且互不相等, $e_i \in \mathbb{Z}^+$,

则 $M_{\text{tor}} = M_{p_1} \oplus \cdots \oplus M_{p_n}$, 其中 $M_{p_i} = \{v \in M_{\text{tor}} \mid p_i(v) = 0\}$ 即 $\text{ann}(M_{p_i}) = \langle p_i^{e_i} \rangle$,

$M_{p_i} = \langle \langle v_{i1} \rangle \rangle \oplus \cdots \oplus \langle \langle v_{it_i} \rangle \rangle$, 其中 $\text{ann}(v_{ij}) = \langle p_i^{e_{ij}} \rangle$, $e_i = e_{i1} \geq \cdots \geq e_{it_i}$.

$$\text{故 } M = \overbrace{\left(\bigoplus_{i=1}^m \langle \langle u_i \rangle \rangle \right)}^{M_{\text{free}}} \oplus \overbrace{\left[\bigoplus_{i=1}^n \left(\bigoplus_{j=1}^{t_i} \langle \langle v_{ij} \rangle \rangle \right) \right]}^{M_{\text{tor}}}.$$

由定理 6.7, $M_{\text{tor}} = \bigoplus_{ij} \langle v_{ij} \rangle$, 其中 $\text{ann}(v_{ij}) = \langle p_i^{e_{ij}} \rangle$, $e_{i1} \geq \cdots \geq e_{it_i}$. 这里,

$$\begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1t_1} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2t_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nt_n} \end{pmatrix}$$

生成了 M_{tor} , 其阶为

定义 6.13 初等因子: M 的初等因子:

$$\begin{pmatrix} p_1^{e_{11}} & p_1^{e_{12}} & \cdots & p_1^{e_{1t_1}} \\ p_2^{e_{21}} & p_2^{e_{22}} & \cdots & p_2^{e_{2t_2}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_n^{e_{n1}} & p_n^{e_{n2}} & \cdots & p_n^{e_{nt_n}} \end{pmatrix}.$$

此外, 还定义了

定义 6.14 不变因子: M 的不变因子:

$$\begin{aligned} q_1 &= \prod_i p_i^{e_{1i}}, \\ q_2 &= \prod_i p_i^{e_{2i}}, \\ &\vdots, \\ q_t &= \prod_i p_i^{e_{ti}}. \end{aligned}$$

Chapter 7

线性算子的结构

先来回顾一下线性算子: V 为域 F 上的向量空间, $\dim V = n$, $\mathcal{L}(V) = M_{n \times n}(F)$, $\dim \mathcal{L}(V) = n^2$.
取 $\forall \tau, \sigma \in \mathcal{L}(V)$, 有

$$(1) (\tau + \sigma)(v) = \tau(v) + \sigma(v),$$

$$(2) (\tau \circ \sigma)(v) = \tau(\sigma(v)),$$

$$(3) (r\tau)(v) = r \cdot \tau(v),$$

其中 $\mathcal{L}(V)$ 关于 (1) 中的加法和 (2) 中的复合成环, 关于 (1) 中的加法和 (3) 中的点乘成向量空间, 故 \mathcal{L} 为代数.
设 $\mathcal{B} = \{b_1, \dots, b_n\}$, $\mathcal{B}' = \{b'_1, \dots, b'_n\}$ 分别是 V 的两组定序基,

$$\begin{array}{ccc} F^n & \xrightarrow{\tau'_A} & F^n \\ \uparrow \phi'_B & & \uparrow \phi'_B \\ V & \xrightarrow{\tau} & V \\ \downarrow \phi_B & & \downarrow \phi_B \\ F^n & \xrightarrow{\tau_A} & F^n \end{array}$$

定理 7.1 (课本定理7.1): 线性算子 τ 在定序基 \mathcal{B} 下的表示为 $[\tau]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} [\tau(b_1)]_{\mathcal{B}} & \cdots & [\tau(b_n)]_{\mathcal{B}} \end{pmatrix}$.
当 τ 作用于 $v \in V$, 可表为矩阵与向量相乘, $[\tau(v)]_{\mathcal{B}} = [\tau]_{\mathcal{B}}[v]_{\mathcal{B}}$.

定理 7.2 (课本定理7.2): τ 在两组定序基 \mathcal{B} 和 \mathcal{B}' 下的表示之间的关系是 $[\tau]_{\mathcal{B}'} = M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}[\tau]_{\mathcal{B}}M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}^{-1}$, 其中 $M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'} = \begin{pmatrix} [b_1]_{\mathcal{B}'} & \cdots & [b_n]_{\mathcal{B}'} \end{pmatrix}$.

定义 7.1 相似: 类似上面的 $[\tau]_{\mathcal{B}}$ 和 $[\tau]_{\mathcal{B}'}$, 若两个矩阵 A, B 满足 $B = PAP^{-1}$, 则称 A 与 B 相似, 由两两相似的矩阵组成的集合称为相似类.

7. 线性算子的结构

取线性算子 $1, \tau, \tau^2, \dots, \tau^{n^2} \in \mathcal{L}(V)$.

\therefore 这些线性算子的数量 $n^2 + 1 > \dim \mathcal{L}(V) = n^2$, \therefore 这些线性算子线性相关,

即 \exists 不全为 0 的 $r_0, \dots, r_{n^2} \in F$, s.t. $r_0 + r_1\tau + \dots + r_{n^2}\tau^{n^2} = 0$

$\implies \forall v \in V, \left(\sum_{i=0}^{n^2} r_i \tau^i\right)(v) = 0 \implies \sum_{i=0}^{n^2} r_i \tau^i(v) = 0$.

令 $f(x) = \sum_{i=0}^{n^2} r_i x^i \in \mathcal{L}(V)$, 则 $f(\tau)(v) = 0$.

定理 7.3 (课本定理7.5): V 为域 F 上的向量空间, 则 V 为 $F[x]$ 上的模.

证: $\forall g(x) \in F[x]$, $g(x)$ 可表为 $g(x) = \sum_i a_i x^i$, 其中 $a_i \in F$, 则 $g(\tau) = \sum_i a_i \tau^i \in \mathcal{L}(V)$.

$\forall h(x) \in F[x]$, $h(x)$ 可表为 $h(x) = \sum_j b_j x^j$, 其中 $b_j \in F$, 则 $h(\tau) = \sum_j b_j \tau^j \in \mathcal{L}(V)$.

对给定的 τ , 有类似数乘的运算 $F[x] \times V \rightarrow V$, $(g(x), v) = g(x) \cdot v \mapsto g(\tau)(v)$, 满足

- (1) $[g(x)+h(x)]v = \left(\sum_i a_i x^i + \sum_j b_j x^j\right)v = \left(\sum_i a_i \tau^i + \sum_j b_j \tau^j\right)(v) = \left(\sum_i a_i \tau^i\right)(v) + \left(\sum_j b_j \tau^j\right)(v) = \left(\sum_i a_i x^i\right)v + \left(\sum_j b_j x^j\right)v = g(x)v + h(x)v$,
- (2) $[g(x)h(x)]v = \left[\sum_i a_i x^i \sum_j b_j x^j\right]v = \left[\sum_i a_i \tau^i \circ \sum_j b_j \tau^j\right](v) = \left(\sum_i a_i \tau^i\right)\left(\left(\sum_j b_j \tau^j\right)(v)\right) = \left(\sum_i a_i x^i\right)\left(\left(\sum_j b_j x^j\right)v\right) = g(x)[h(x)v]$,
- (3) $g(x)(u+v) = \left(\sum_i a_i x^i\right)(u+v) = \left(\sum_i a_i \tau^i\right)(u+v) = \left(\sum_i a_i \tau^i\right)(u) + \left(\sum_i a_i \tau^i\right)(v) = \left(\sum_i a_i x^i\right)u + \left(\sum_i a_i x^i\right)v = g(x)u + g(x)v$,
- (4) $1v = 1(v) = v$,

故 V 为 $F[x]$ 上的模. □

$F[x]$ 为 PID, $V \in F[x] - \text{mod}$.

$\therefore \dim V = n$, $\therefore V$ 有限生成.

$\therefore f(x)v = f(\tau)(v) = 0$, $\therefore V$ 为挠模.

利用定理 6.7, 可将 V 分解为 $V = V_{p_1} \oplus \dots \oplus V_{p_m} = \bigoplus_{i=1}^m \bigoplus_{j=1}^{t_i} \langle \langle v_{ij} \rangle \rangle$, 其中 $\text{ann}(v_{ij}) = \langle p_i^{e_{ij}}(x) \rangle$.

上面说明了分解 V 的可行性和 V 分解出的大致结构, 现在的问题是: 具体如何分解? 我们只需找到 V 的阶 μ , s.t. $\text{ann}(V) = \langle \mu \rangle$, $\mu = up_1^{e_1} \dots p_m^{e_m}$, 即可得到挠子模 V_{p_i} , s.t. $\text{ann}(V_{p_i}) = \langle p_i^{e_1} \rangle$ 及循环子模 $\langle \langle v_{ij} \rangle \rangle$, s.t. $\text{ann}(v_{ij}) = \langle p_i^{e_{ij}} \rangle$, $e_i \geq e_{i1} \geq \dots \geq e_{it_i}$.

定义 7.2 极小多项式: $\text{ann}(V) = \{g(x) \in F[x] \mid g(\tau)(V) = \{0\}\} = \langle m_\tau(x) \rangle$, 其中 $m_\tau(x)$ 称 τ 在 V 上的极小多项式, 首系数 = 1.

极小多项式就是 V 的阶, 对其进行分解: $m_\tau(x) = up_1^{e_1}(x) \dots p_n^{e_n}(x)$, 其中 u 为单位, $p_i(x) \in F[x]$ 不可约且互不相等, $e_i \in \mathbb{Z}^+$

$\implies V = V_{p_1} \oplus \dots \oplus V_{p_m}$, 其中 $\text{ann}(V_{p_i}) = \langle p_i^{e_1}(x) \rangle$,

$V_{p_i} = \langle \langle v_{i1} \rangle \rangle \oplus \dots \oplus \langle \langle v_{it_i} \rangle \rangle$, 其中 $\text{ann}(v_{ij}) = \langle p_i^{e_{ij}}(x) \rangle$, $e_i \geq e_{i1} \geq \dots \geq e_{it_i}$,

从而实现分解 $V = \bigoplus_{i=1}^m \bigoplus_{j=1}^{t_i} \langle \langle v_{ij} \rangle \rangle$.

接下来我们利用上述对 V 的分解找一组合适的定序基, 以简化 V 上的线性算子 τ 的表示.

定义 7.3 不变子空间: 子空间 $S \subseteq V$, $\tau \in \mathcal{L}(V)$, 若 $\tau(S) \subseteq S$, 则称 S 为 V 的 τ 不变子空间.

定理 7.4 (课本定理7.5): 子模 $S \subseteq V \iff S$ 是 V 的不变子空间.

证: “ \implies ”: $\forall v \in S \subseteq V, \forall h(x) \in F[x], h(x) = \sum_i a_i x^i, h(x)v = h(\tau)(v) = \sum_i a_i \tau^i(v) \in S$.

特别地, 取 $h(x) = x \in F[x]$, 则 $xv = \tau(v) \in S \implies \tau(S) \subseteq S$, 即 S 为 V 的不变子空间.

“ \impliedby ”: $\because S$ 是 V 的不变子空间, $\therefore \forall v \in S, \tau(v) \in S \implies \forall i = 0, \dots, \dim V, \tau^i(v) \in S$
 $\implies g(x)v + h(x)v = g(\tau)(v) + h(\tau)(v) = (\sum_i a_i \tau^i)(v) + (\sum_j b_j \tau^j)(v) = \sum_i (a_i + b_i) \tau^i(v) \in S$, 故 S 为 V 的子模. \square

$\because \langle v_{ij} \rangle$ 为 V 的 $F[x]$ 子模, $\therefore \langle v_{ij} \rangle$ 为不变子空间, 即 $\tau(\langle v_{ij} \rangle) \subseteq \langle v_{ij} \rangle$, 故之前分解操作实际上是将 V 分解成了一系列由单个向量生成的不变子空间.

让我们用简单的例子来展示一下, 若以不变子空间的基为整个向量空间的基 (的一部分), 线性算子的表示会如何.

例 7.1: 若 $\langle b_1 \rangle$ 是 τ 不变的, 则 $[\tau(b_1)]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} * \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, [\tau]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} [\tau(b_1)]_{\mathcal{B}} & \cdots & [\tau(b_n)]_{\mathcal{B}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} * & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & & \\ 0 & & & \end{pmatrix}.$ ¹

若 $\langle b_1, b_2 \rangle$ 是 τ 不变的, 即 $\tau(b_1) \in \langle b_1, b_2 \rangle, \tau(b_2) \in \langle b_1, b_2 \rangle$, 则 $\begin{pmatrix} [\tau(b_1)]_{\mathcal{B}} & [\tau(b_2)]_{\mathcal{B}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} * & * \\ * & * \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, [\tau]_{\mathcal{B}} =$

$$\begin{pmatrix} * & * & 0 & \cdots & 0 \\ * & * & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & & & \\ \vdots & \vdots & & & \\ 0 & 0 & & & \end{pmatrix}.$$

若 $\langle v_1, \dots, v_k \rangle$ 是 τ 不变的, 则 $[\tau]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} *_{k \times k} & 0 \\ 0 & \tau' \end{pmatrix}.$ \square

在之前我们已将 V 分解成了多个不变子空间, 故若用各 $\langle v_{ij} \rangle$ 的基组成 V 的基, 则可以将 τ 表示为一个仅在对角线上有非零矩阵块而其余部分均为零的矩阵. 但我们仍未满足: 对于给定的不变子空间 $\langle v_{ij} \rangle$, 能否适当地选取该不变子空间中的基, 从而简化该不变子空间对应的非零矩阵块?

取 $\langle v \rangle$ 的极小多项式为 $p(x)$, 即 $\text{ann}(v) = \langle p(x) \rangle$, 设 $p(x) = x^m + r_{m-1}x^{m-1} + \cdots + r_1x + r_0, r_i \in F$,
 则 $p(x)v = p(\tau)(v) = (\tau^m + r_{m-1}\tau^{m-1} + \cdots + r_1\tau + r_0)(v) = \tau^m(v) + r_{m-1}\tau^{m-1}(v) + \cdots + r_1\tau(v) + r_0v = 0$,

即 $\tau^m(v)$ 可由 $\{v, \tau(v), \dots, \tau^{m-1}(v)\}$ 线性表示: $\tau^m(v) = -[r_{m-1}\tau^{m-1}(v) + \cdots + r_1\tau(v) + r_0v]$

$\implies \tau^{m+1}(v) = \tau(\tau^m(v)) = \tau(-[r_{m-1}\tau^{m-1}(v) + \cdots + r_1\tau(v) + r_0v])$

$= -[r_{m-1}\tau^m(v) + r_{m-2}\tau^{m-1}(v) + \cdots + r_1\tau^2(v) + r_0\tau(v)]$

$= -\{r_{m-1}[-(r_{m-1}\tau^{m-1}(v) + \cdots + r_1\tau^2(v) + r_0\tau(v))] + r_{m-2}\tau^{m-1}(v) + \cdots + r_1\tau^2(v) + r_0\tau(v)\}.$

易证, 任意高阶的 τ 作用于 v 均可由 $\{v, \tau(v), \dots, \tau^{m-1}(v)\}$ 线性表示, $\forall f(x) \in F[x]$ 作用于 v 均可由 $\{v, \tau(v), \dots, \tau^{m-1}(v)\}$ 线性表示.

由此, 我们引出:

¹ 此处 * 代表非零矩阵元.

定理 7.5: $\langle\langle v \rangle\rangle$ 为循环子模, 则 $\{v, \tau(v), \dots, \tau^{m-1}(v)\}$ 是 $\langle\langle v \rangle\rangle$ 的基.

证: 先证 $\{v, \tau(v), \dots, \tau^{m-1}(v)\}$ 线性无关: 设 $l_0 v + l_1 \tau(v) + \dots + l_{m-1} \tau^{m-1}(v) = 0$,

令 $h(x) = l_0 + l_1 x + \dots + l_{m-1} x^{m-1}$, 则 $h(x)v = 0 \implies h(x) \in \text{ann}(v) = \langle p(x) \rangle \implies p(x) \mid h(x)$

然而 $\because \deg p(x) = m \geq \deg h(x) = m-1$, \therefore 只能有 $l_0 = l_1 = \dots = l_{m-1} = 0$, 故 $\{v, \tau(v), \dots, \tau^{m-1}(v)\}$ 线性无关.

再证 $\{v, \tau(v), \dots, \tau^{m-1}(v)\}$ 生成 $\langle\langle v \rangle\rangle$: $\langle\langle v \rangle\rangle = \{h(x)v \mid h(x) \in F[x]\} = \{h(\tau)(v) \mid h(x) \in F[x]\}$.

$\forall h(x)v \in \langle\langle v \rangle\rangle$, 若 $\deg h(x) \leq m-1$, 则 $h(x)v$ 显然可由 $\{v, \tau(v), \dots, \tau^{m-1}(v)\}$ 表示,

若 $\deg h(x) > m-1$, 则 $h(x) = q(x)p(x) + r(x)$, 其中 $q(x)$ 为商多项式, 余多项式 $r(x) = 0$ 或 $\deg r(x) < \deg p(x) = m-1$

$\implies h(x)v = (q(\tau)p(\tau) + r(\tau))(v) = q(\tau)p(\tau)(v) + r(\tau)(v)$, 其中 $\because p(x) \in \text{ann}(v)$, $\therefore p(\tau)v = 0 \implies h(x)v = r(\tau)v$ 可由 $\{v, \tau(v), \dots, \tau^{m-1}(v)\}$ 表示.

综上, 得证. □

定义 7.4 循环不变子空间: S 是向量空间 V 的 τ 不变子空间, 若 S 有一组基 $\mathcal{B} = \{v, \tau(v), \dots, \tau^{m-1}(v)\}$, 其中 $v \in V$, $m \geq 1$, 则称 S 是 V 的循环不变子空间.

$\langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$ 就是循环不变子空间. 那么, 以 $\mathcal{B}_{ij} = \{v_{ij}, \tau(v_{ij}), \dots, \tau^{m-1}(v_{ij})\}$ 为基, 线性算子 τ 在该循环不变子空间中的表示 (即 τ 的表示中该循环不变子空间对应的非零矩阵块) 如何?

定义 7.5 伴阵: 在定序基 $\mathcal{B} = \{v, \tau(v), \dots, \tau^{m-1}(v)\}$ 下, 线性算子 τ 可表为 $[\tau]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} [\tau(b_1)]_{\mathcal{B}} & \dots & [\tau(b_m)]_{\mathcal{B}} \end{pmatrix}$,

其中 $[\tau(b_1)]_{\mathcal{B}} = [\tau(v)]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$, $[\tau(b_2)]_{\mathcal{B}} = [\tau(\tau(v))]_{\mathcal{B}} = [\tau^2(v)]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$, \dots , $[\tau(b_m)]_{\mathcal{B}} = [\tau^m(v)]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$

$\begin{pmatrix} -r_0 \\ -r_1 \\ \vdots \\ -r_{m-1} \end{pmatrix}$,

从而 $[\tau]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & -r_0 \\ 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & -r_1 \\ 0 & 1 & \dots & \dots & 0 & -r_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & -r_{m-2} \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1 & -r_{m-1} \end{pmatrix} \equiv C[p(x)]$, 称为多项式 $p(x) = x^m + r_{m-1}x^{m-1} + \dots + r_1x + r_0$ 的

伴阵.

设 $d_{ij} = \deg p_i^{e_{ij}}(x)$, 则 $\mathcal{B}_{ij} = \{v_{ij}, \tau(v_{ij}), \dots, \tau^{d_{ij}-1}(v_{ij})\}$ 为 $\langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$ 的基,

以 \mathcal{B}_{ij} 为基, τ 在循环不变子空间 $\langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$ 中的表示就是 $p_i^{e_{ij}}(x)$ 的伴阵: $[\tau]_{\mathcal{B}_{ij}} = C[p_i^{e_{ij}}(x)] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & -l_1^{(ij)} \\ 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & -l_2^{(ij)} \\ 0 & 1 & \cdots & \cdots & 0 & -l_3^{(ij)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & -l_{d_{ij}-2}^{(ij)} \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & 1 & -l_{d_{ij}-1}^{(ij)} \end{pmatrix}.$

上面我们简化了 τ 在循环不变子空间 $\langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$ 中的表示. 又 $\because V = \bigoplus_{ij} \langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$, $\therefore \mathcal{B} = \cup_{ij} \mathcal{B}_{ij}$ 为 V 的基. 利用 \mathcal{B} 我们可简化 τ 在整个向量空间 V 中的表示:

定理 7.6 (课本定理7.10): $\dim V < \infty$, $\tau \in \mathcal{L}(V)$, V 的极小多项式为 $m_\tau(x) = p_1^{e_1}(x) \cdots p_n^{e_n}(x)$, 其中 $p_i(x)$ 不可约且互不相等,

$\implies V = V_{p_1} \oplus \cdots \oplus V_{p_m}$, 其中 $\text{ann}(V_{p_i}) = \langle p_i^{e_i}(x) \rangle$,

$V_{p_i} = \langle\langle v_{i1} \rangle\rangle \oplus \cdots \oplus \langle\langle v_{it_i} \rangle\rangle$, 其中 $\text{ann}(v_{ij}) = \langle p_i^{e_{ij}}(x) \rangle$, $e_i \geq e_{i1} \geq \cdots \geq e_{it_i}$,

以 $\cup_{ij} \{v_{ij}, \tau(v_{ij}), \cdots, \tau^{d_{ij}-1}(v_{ij})\}$ 为基, 其中 $d_{ij} = \dim \langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$, τ 的表示可简化为

$$[\tau]_{\mathcal{B}} = \bigoplus_{ij} C[p_i^{e_{ij}}(x)] = \begin{pmatrix} C[p_1^{e_{11}}(x)] & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & C[p_1^{e_{1t_1}}(x)] & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & C[p_m^{e_{m1}}(x)] \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & C[p_m^{e_{mt_m}}(x)] \end{pmatrix},$$

此即 τ 的有理标准型.

$$n = \dim V = \sum_{ij} d_{ij} = \sum_{ij} \deg p_i^{e_{ij}}(x) = \deg \left[\prod_{ij} p_i^{e_{ij}}(x) \right].$$

Chapter 8

特征值和特征向量

在上一章中, 我们介绍了多项式对应的伴阵, 那么, 如何由伴阵恢复多项式呢?

假设多项式 $p(x) = x^2 + ax + b$, 则其伴阵为 $C[p(x)] = \begin{pmatrix} 0 & -b \\ 1 & -a \end{pmatrix}$,

$$\det(xI - C[p(x)]) = \begin{vmatrix} x & b \\ -1 & x+a \end{vmatrix} = x^2 + ax + b \text{ 即恢复多项式.}$$

同理, 对循环不变子空间 $\langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$, 设其极小多项式为 $p_i^{e_{ij}}(x)$, 伴阵为 $C[p_i^{e_{ij}}(x)]$, 有 $\det(xI - C[p_i^{e_{ij}}(x)]) = p_i^{e_{ij}}(x)$, 由定理 7.6, 线性算子 τ 的表示即为这些伴阵的直和, 故有

定义 8.1 特征多项式: $\det(xI - [\tau]_{\mathcal{B}}) = \prod_{ij} p_i^{e_{ij}}(x) \equiv C_{\tau}(x)$, 称为 τ 的特征多项式.

定理 8.1 (课本第3 版引理7.17, 定理7.18): 特征多项式在相似操作下不变, 或线性算子的特征多项式唯一, 与线性算子的表示无关.

证: 设线性算子 τ 在定序基 \mathcal{B} 和 \mathcal{B}' 下的表示分别为 $[\tau]_{\mathcal{B}}$ 和 $[\tau]_{\mathcal{B}'}$,

$$\begin{aligned} \text{则 } C_{[\tau]_{\mathcal{B}'}}(x) &= \det(xI - [\tau]_{\mathcal{B}'}) = \det(xI - M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}[\tau]_{\mathcal{B}}M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}^{-1}) = \det(M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(xI - [\tau]_{\mathcal{B}})M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}^{-1}) = \det(M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}^{-1}M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(xI - [\tau]_{\mathcal{B}})) \\ &= \det(xI - [\tau]_{\mathcal{B}}) = C_{[\tau]_{\mathcal{B}}}(x). \end{aligned} \quad \square$$

$\because C_{\tau}(x) = \prod_{ij} p_i^{e_{ij}} = \prod_i p_i^{\sum_{j=1}^{t_i} e_{ij}}$, $m_{\tau}(x) = up_1^{e_1} \cdots p_m^{e_m}$, 且 $e_i = e_{i1} \geq \cdots \geq e_{it_i}$ (不可约因子相同, 但幂次不等), $\therefore \deg C_{\tau}(x) = \sum_{ij} \deg p_i^{e_{ij}}(x) = \sum_{ij} d_{ij} = n \geq \deg m_{\tau}(x) \implies m_{\tau}(x) \mid C_{\tau}(x)$.

在 $F[x]$ 中, 任一一次多项式 $x - r$ 都是不可约的.

在 $\mathbb{R}[x]$ 中, 有实根 \iff 可约.

\because 实系数多项式的复根的共轭亦为该多项式的根, \therefore 实系数多项式的复根总是成对出现¹, 故 $\mathbb{R}[x]$ 中的不可约多项式阶数 ≤ 2 .

证: 当多项式阶数 > 2 , 若阶数为奇数, 则多项式的根两两配对后必留下一个根, 该根必不为复数而为实数 \implies 可约; 若阶数为偶数, 以 4 阶为例, 假设多项式不可约, 设复根分别为 $z_1, \bar{z}_1, z_2, \bar{z}_2$, 则多项式可写为 $(x - z_1)(x - \bar{z}_1)(x - z_2)(x - \bar{z}_2) = (x - (z_1 + \bar{z}_1)x + z_1\bar{z}_1)(x - (z_2 + \bar{z}_2)x + z_2\bar{z}_2)$.

¹

证: $0 \neq f(x) \in \mathbb{R}[x]$, 若 $z \in \mathbb{C}$, s.t. $f(z) = 0$, 即 $z^n + a_{n-1}z^{n-1} + \cdots + a_1z + a_0 = 0$
 $\implies \overline{f(z)} = \bar{z}^n + a_{n-1}\bar{z}^{n-1} + \cdots + a_1\bar{z} + a_0 = f(\bar{z}) = 0$, 故得证. \square

8. 特征值和特征向量

$(z_1 + \bar{z}_1), z_1 \bar{z}_1, (z_2 + \bar{z}_2), z_2 \bar{z}_2 \in \mathbb{R}, \therefore (x - (z_1 + \bar{z}_1)x + z_1 \bar{z}_1), (x - (z_2 + \bar{z}_2)x + z_2 \bar{z}_2) \in \mathbb{R}[x] \implies$ 多项式可约, 故假设错误, 阶数 > 2 的偶数阶实系数多项式必可约. \square

例 8.1: $x^2 + 1 = (x + i)(x - i)$ 无实根不可约. \square

$\mathbb{Q}[x]$ 中的不可约多项式可以是任意次.

可用 **Eisenstein 方法** 判别 $\mathbb{Q}[x]$ 中的多项式的可约性: $\forall f(x) = a_0 + a_1x + \cdots + a_nx^n$, 其中 $a_i \in \mathbb{Z}$, 若 \exists 素数 p , s.t. $p \nmid a_n, p \mid a_i, i=0, \dots, i=n-1, p^2 \nmid a_0$, 则 $f(x)$ 在 $\mathbb{Q}[x]$ 中不可约.

定义 8.2 特征值和特征向量: $\tau \in \mathcal{L}(V), \lambda \in F$, 若 $\exists 0 \neq v \in V$, s.t. $\tau(v) = \lambda v$, 则称 λ 为 τ 的特征值, v 为 τ 的特征向量.

定义 8.3: $\mathcal{E}_\lambda \equiv \{\text{特征值 } \lambda \text{ 对应的特征向量}\} = \{v \in V \mid \tau(v) = \lambda v\}$.

\mathcal{E}_λ 是 V 的子空间.

证: $\forall u, v \in \mathcal{E}_\lambda, \forall r, t \in F, \tau(ru + tv) = r\tau(u) + t\tau(v) = r(\lambda v) + t(\lambda v) = \lambda(ru) + \lambda(tv) = \lambda(ru + tv) \implies ru + tv \in \mathcal{E}_\lambda$, 故得证. \square

定义 8.4 特征谱: $\text{spec}(\tau) \equiv \{\tau \text{ 的特征值}\}$.

$$(1) \tau(v) = \lambda v \iff \tau(v) - \lambda v = 0$$

$$\iff (\tau - \lambda)(v) = 0$$

$$\iff v \in \ker(\tau - \lambda)$$

$$(\because v \neq 0)$$

$$\iff \ker(\tau - \lambda) \neq \emptyset$$

$$\iff (\tau - \lambda) \text{ 非单}$$

$$\iff (\tau - \lambda) \text{ 是退化的.}$$

(也有教材将 $\tau - \lambda$ 退化作为特征值的定义.)

$$(2) v \neq 0 \text{ 是 } \lambda \text{ 对应的特征向量, } \tau(v) = \lambda v \iff (\tau - \lambda)(v) = 0.$$

若 $f(x) = x - \lambda$, 则 $f(\tau)(v) = 0$, 即 $f(x)$ 零化 $v \implies f(x) \in \text{ann}(v)$.

又 $\because x - \lambda$ 不可约, $\therefore \text{ann}(v) = \langle x - \lambda \rangle$.

$\because \text{ann}(V) = \langle m_\tau(x) \rangle, \therefore \forall u \in V, m_\tau(x)u = 0 \implies m_\tau(x)v = 0 \implies m_\tau(x) \in \text{ann}(v) = \langle x - \lambda \rangle \implies (x - \lambda) \mid m_\tau(x)$.

设 $m_\tau(x) = (x - \lambda)q(x)$, 其中 $q(x) \in F[x]$, 故特征值为极小多项式的根.

定理 8.2 (课本定理8.3): (1) $\text{spec}(\tau)$ 是 $m_\tau(x)$ 或 $C_\tau(x)$ 的根的集合.

(2) 矩阵的特征值在相似操作下不变, 即相似矩阵具有相同的特征值.

(3) \mathcal{E}_λ 是 $(\lambda I - A)x = 0$ 的解空间.

定理 8.3 (课本定理8.4): $\tau \in \mathcal{L}(V)$, $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ 是 τ 的特征值且互不相等, 则

- (1) 取 $0 \neq v_i \in \mathcal{E}_{\lambda_i}$, 则 $\{v_1, \dots, v_k\}$ 线性无关;
- (2) 若 $i \neq j$, $\mathcal{E}_{\lambda_i} \cap \mathcal{E}_{\lambda_j} = \{0\}$.

证: (1) 若 $\sum_{i=1}^k r_i v_i = 0$, 则 $0 = \tau(0) = \tau\left(\sum_{i=1}^k r_i v_i\right) = \sum_{i=1}^k r_i \tau(v_i) = \sum_{i=1}^k r_i \lambda_i v_i$, 即 $r_1 \lambda_1 v_1 + \dots + r_k \lambda_k v_k = 0$, 又有 $\lambda_k \left(\sum_{i=1}^k r_i v_i\right) = 0$, 即 $r_1 \lambda_k v_1 + r_2 \lambda_k v_2 + \dots + r_k \lambda_k v_k = 0$. 以上两式相减消去 v_k 项得, $r(\lambda_1 - \lambda_k)v_1 + r_2(\lambda_2 - \lambda_k)v_2 + \dots + r_{k-1}(\lambda_{k-1} - \lambda_k)v_{k-1} = 0$. 将 τ 作用于上式得, $\tau[r(\lambda_1 - \lambda_k)v_1 + r_2(\lambda_2 - \lambda_k)v_2 + \dots + r_{k-1}(\lambda_{k-1} - \lambda_k)v_{k-1}] = r_1(\lambda_1 - \lambda_k)\lambda_1 v_1 + r_2(\lambda_2 - \lambda_k)\lambda_2 v_2 + \dots + r_{k-1}(\lambda_{k-1} - \lambda_k)\lambda_{k-1} v_{k-1} = \tau(0) = 0$. 消去 v_{k-1} 项得, $\lambda_{k-1}[r(\lambda_1 - \lambda_k)v_1 + r_2(\lambda_2 - \lambda_k)v_2 + \dots + r_{k-1}(\lambda_{k-1} - \lambda_k)v_{k-1}] - \tau[r(\lambda_1 - \lambda_k)v_1 + r_2(\lambda_2 - \lambda_k)v_2 + \dots + r_{k-1}(\lambda_{k-1} - \lambda_k)v_{k-1}] = r_1(\lambda_k - \lambda_1)(\lambda_{k-1} - \lambda_1)v_1 + r_2(\lambda_k - \lambda_2)(\lambda_{k-1} - \lambda_2)v_2 + \dots + r_{k-1}(\lambda_k - \lambda_{k-2})(\lambda_{k-1} - \lambda_{k-2})v_{k-2} = 0$. 重复以上操作 $k-1$ 次得, $r_1(\lambda_2 - \lambda_1) \dots (\lambda_k - \lambda_1)v_1 = 0$. $\because \lambda_1, \dots, \lambda_k$ 互不相等且 $v_1 \neq 0$, $\therefore r_1 = 0$. 同理可得 $r_1 = \dots = r_k = 0$, 故 $\{v_1, \dots, v_k\}$ 线性无关.

- (2) 取 $u \in \mathcal{E}_{\lambda_i} \cap \mathcal{E}_{\lambda_j} \implies u \in \mathcal{E}_{\lambda_i} \implies \tau(u) = \lambda_i u$,
且 $u \in \mathcal{E}_{\lambda_j} \implies \tau(u) = \lambda_j u$.
以上两式相减得, $0 = \tau(u) - \tau(u) = \lambda_i u - \lambda_j u = (\lambda_i - \lambda_j)u$.
又 $\because \lambda_i \neq \lambda_j$, $\therefore u = 0 \implies \mathcal{E}_{\lambda_i} \cap \mathcal{E}_{\lambda_j} = \{0\}$.

□

若 $\tau \in \mathcal{L}(V)$, $p(x) \in F[x]$, 则 $p(\tau) \in \mathcal{L}(V)$, 那么 $p(\tau)$ 与 τ 的特征值有何关系?

定理 8.4 特征谱映射定理(课本第3版定理8.3): F 为代数闭域^a, $p(x) \in F[x]$, 则 $\text{spec}(p(\tau)) = p(\text{spec}(\tau)) \equiv \{p(\lambda) \mid \lambda \in \text{spec}(\tau)\}$.

^a即 $F[x]$ 中不可约多项式阶数 = 1.

证: 先证 $p(\text{spec}(\tau)) \subseteq \text{spec}(p(\tau))$: $\forall v \in \text{spec}(\tau)$, $\tau(v) = \lambda v \implies \tau^k(v) = \lambda^k v$.
设 $p(x) = x^d + a_{d-1}x^{d-1} + \dots + a_1x + a_0$, 则 $p(\tau) = \tau^d + a_{d-1}\tau^{d-1} + \dots + a_1\tau + a_0$.
 $p(\tau)(v) = \tau^d(v) + a_{d-1}\tau^{d-1}(v) + \dots + a_1\tau(v) + a_0 = \lambda^d v + a_{d-1}\lambda^{d-1}v + \dots + a_1\lambda v + a_0 = (\lambda^d + a_{d-1}\lambda^{d-1} + \dots + a_1\lambda + a_0)v = p(\lambda)v$
 $\implies p(\lambda)$ 是 $p(\tau)$ 的特征值, 即 $p(\lambda) \in \text{spec}(p(\tau))$, 故 $p(\text{spec}(\tau)) \subseteq \text{spec}(p(\tau))$.
再证 $\text{spec}(p(\tau)) \subseteq p(\text{spec}(\tau))$: $\forall \lambda \in \text{spec}(p(\tau))$, $0 \neq v \in \mathcal{E}_\lambda$, 即 $p(\tau)(v) = \lambda v \implies (p(\tau) - \lambda)(v) = 0$.
令 $f(x) = p(x) - \lambda$, 则 $f(\tau)(v) = 0$.
 $\because \lambda \in F$, $\therefore f(x) \in F[x]$.
 $\because F[x]$ 是代数封闭的, $\therefore f(x)$ 可写为 $f(x) = (x - r_1) \dots (x - r_m)$, 其中 $r_i \in F$, 或有重复
 $\implies (\tau - r_1) \dots (\tau - r_m)(v) = 0$, 其中 $r_i \in \text{spec}(\tau)$,
其中必 $\exists r_i$, s.t. $(\tau - r_i) \dots (\tau - r_m)(v) = 0 \implies p(r_i) - \lambda = 0 \implies p(r_i) = \lambda$
 $\implies \lambda \in p(\text{spec}(\tau))$, 故 $\text{spec}(p(\tau)) \subseteq p(\text{spec}(\tau))$.
综上, 得证.

□

定义 8.5 约当标准型: F 为代数闭域, V 为 F 上的向量空间, $\dim V < \infty$, $\tau \in \mathcal{L}(V)$, 则 V 的最小多项式 $m_\tau(x) = (x - \lambda_1)^{e_1} \cdots (x - \lambda_m)^{e_m}$,

此时 $V = \bigoplus_{i=1}^m V_i$, 其中 $\text{ann}(V_i) = \langle (x - \lambda_i)^{e_i} \rangle$,

$V_i = \bigoplus_{j=1}^{t_i} \langle v_{ij} \rangle$, 其中 $\text{ann}(v_{ij}) = \langle (x - \lambda_i)^{e_{ij}} \rangle$, $e_i = e_{i1} \geq \cdots \geq e_{it_i}$, $\dim \langle v_{ij} \rangle = \deg(x - \lambda_i)^{e_{ij}} = e_{ij}$,

则定序基 $\mathcal{B}'_{ij} = \{v_{ij}, (\tau - \lambda_i)(v_{ij}), \cdots, (\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij})\}$ 为 $\langle v_{ij} \rangle$ 下, 线性算子 τ 在 $\langle v_{ij} \rangle$ 中可表为 $[\tau]_{\mathcal{B}'_{ij}} = \begin{pmatrix} [\tau(b_1)]_{\mathcal{B}'_{ij}} & \cdots & [\tau(b_m)]_{\mathcal{B}'_{ij}} \end{pmatrix}$,

其中 $[\tau(b_1)]_{\mathcal{B}'_{ij}} = [\tau(v_{ij})]_{\mathcal{B}'_{ij}} = [(\tau - \lambda_i + \lambda_i)(v_{ij})]_{\mathcal{B}'_{ij}} = [(\tau - \lambda_i)(v_{ij}) + \lambda_i(v_{ij})]_{\mathcal{B}'_{ij}} = \begin{pmatrix} \lambda_i \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$, $[\tau(b_2)]_{\mathcal{B}'_{ij}} =$

$[\tau(\tau - \lambda_i(v_{ij}))]_{\mathcal{B}'_{ij}} = [(\tau - \lambda_i + \lambda_i)((\tau - \lambda_i)(v_{ij}))]_{\mathcal{B}'_{ij}} = [(\tau - \lambda_i)^2(v_{ij}) + \lambda_i(\tau - \lambda_i)(v_{ij})]_{\mathcal{B}'_{ij}} = \begin{pmatrix} 0 \\ \lambda_i \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \cdots,$

$[\tau((\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij}))]_{\mathcal{B}'_{ij}} = [(\tau - \lambda_i + \lambda_i)((\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij}))]_{\mathcal{B}'_{ij}} = [(\tau - \lambda_i)^{e_{ij}}(v_{ij}) + \lambda_i(\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij})]_{\mathcal{B}'_{ij}} =$

$[\lambda_i(\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij})]_{\mathcal{B}'_{ij}} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \lambda_i \end{pmatrix}$,

从而 $[\tau]_{\mathcal{B}'_{ij}} = \begin{pmatrix} \lambda_i & 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & \lambda_i & \cdots & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & \lambda_i & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & 1 & \lambda_i \end{pmatrix} \equiv g(\lambda_i, e_{ij})$, 称为约当块,

定序基 $\mathcal{B} = \cup_{ij} \mathcal{B}'_{ij}$ 下, 线性算子 τ 可表为

$$[\tau]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} g(\lambda_1, e_{11}) & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & g(\lambda_1, e_{1t_1}) & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & g(\lambda_m, e_{m1}) & \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & g(\lambda_m, e_{mt_m}) \end{pmatrix},$$

称为约当标准型.

a

${}^a\mathcal{B}_{ij} = \{v_{ij}, \tau(v_{ij}), \dots, \tau^{e_{ij}-1}(v_{ij})\}$ 亦为 $\langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$ 的一组基, $[\tau]_{\mathcal{B}=\cup_{ij}\mathcal{B}_{ij}}$ 为有理标准型.

$\mathcal{B}'_{ij} = \{v_{ij}, (\tau - \lambda_i)(v_{ij}), \dots, (\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij})\}$ 为 $\langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$ 的一组基.

证: 先证 \mathcal{B}'_{ij} 线性无关: 设 $l_0 v + l_1(\tau - \lambda_i)(v) + \dots + l_{m-1}(\tau - \lambda_i)^{m-1}(v) = 0$.

令 $h(x) = l_0 + l_1 x + \dots + l_{m-1} x^{m-1}$, 则 $h(x)v = 0 \implies h(x) \in \text{ann}(v_{ij}) = \langle(x - \lambda_i)^{e_{ij}} \rangle \implies (x - \lambda_i)^{e_{ij}} \mid h(x)$.

然而 $\because \deg(x - \lambda_i)^{e_{ij}} = e_{ij} \geq \deg h(x) = e_{ij} - 1$, $\therefore l_0 = l_1 = \dots = l_{e_{ij}-1} = 0$, 故 \mathcal{B}'_{ij} 线性无关.

再证 \mathcal{B}'_{ij} 生成 $\langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$: $\langle\langle v_{ij} \rangle\rangle = \{h(x)v \mid h(x) \in F[x]\} = \{h(\tau)(v) \mid h(x) \in F[x]\}$.

$\forall h(\tau)(v) \in \langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$, 若 $\deg h(x) \leq e_{ij} - 1$, 则 $h(\tau)v = (l_0 + l_1 \tau + \dots + l_{e_{ij}-1} \tau^{e_{ij}-1})(v) = (l_0 + l_1((\tau - \lambda_i) + \lambda_i) + \dots + l_{e_{ij}-1}((\tau - \lambda_i) + \lambda_i)^{e_{ij}-1})(v)$, 可由 \mathcal{B}'_{ij} 表示,

若 $\deg h(x) > e_{ij} - 1$, $h(x) = h((x - \lambda_i) + \lambda_i) = h'(x - \lambda_i) = q(x - \lambda_i)(x - \lambda_i)^{e_{ij}-1} + r(x - \lambda_i)$, 其中 $q(x - \lambda_i)$ 为商多项式, 余多项式 $r(x - \lambda_i) = 0$ 或 $\deg r(x) < \deg(x - \lambda_i)^{e_{ij}-1} = e_{ij} - 1$

$\implies h(\tau)(v_{ij}) = h'(\tau - \lambda_i)(v_{ij}) = (q(\tau - \lambda_i)(\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1} + r(\tau - \lambda_i))(v_{ij}) = q(\tau - \lambda_i)(\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij}) + r(\tau - \lambda_i)(v_{ij})$, 其中 $\because (x - \lambda_i)^{e_{ij}-1} \in \text{ann}(v_{ij})$, $\therefore (\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij}) = 0 \implies h(\tau)v_{ij} = r(\tau)(v_{ij})$, 可由 \mathcal{B}'_{ij} 表示.

综上, 得证. □

有理标准型的存在无需附加条件, 而约当标准型的存在是需要附加条件的: 仅当极小多项式能分解成一次多项式的乘积, 即 $m_\tau(x) = (x - \lambda_1)^{e_1} \dots (x - \lambda_m)^{e_m}$ 时, 约当标准型才存在.

上面我们看到, $\tau((\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij})) = \lambda(\tau - \lambda_i)^{e_{ij}}(v_{ij})$, 即 $(\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij}) \in \mathcal{E}_{\lambda_i}$, 那么, 是否还有其他向量 $\in \mathcal{E}_{\lambda_i}$?

$\{(\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij}) \mid j = 1, \dots, t_i\} \subseteq \mathcal{E}_{\lambda_i}$, $\because V_{p_i} = \bigoplus_{j=1}^{t_i} \langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$, $\therefore \{(\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij}) \mid j = 1, \dots, t_i\}$ 线性无关.

定义 8.6 代数重数: 在 $\mathcal{C}_\tau(x)$ 中 λ_i 作为根的重数, 即 $\dim V_{p_i} = \sum_{j=1}^{t_i} e_{ij}$.

定义 8.7 几何重数: $\dim \mathcal{E}_{\lambda_i} = t_i$.

定理 8.5 (课本定理8.5): 几何重数 $\dim V_{p_i} = \sum_{j=1}^{t_i} e_{ij} \geq$ 代数重数 $\dim \mathcal{E}_{\lambda_i} = t_i$

证: $e_i \geq e_{i1} \geq \dots \geq e_{it_i} \geq 0$, 故得证. □

几何重数 = 代数重数的特殊情况下, $[\tau]$ 的约当标准型何如?

若几何重数 = 代数重数, 即 $\dim V_{p_i} = \dim \mathcal{E}_{\lambda_i}$, 则 $e_{ij} = 1 \forall j \implies m_\tau(\lambda) = (x - \lambda_1) \dots (x - \lambda_m)$.

此时 $[\tau]_{\mathcal{B}'_{ij}} = \begin{pmatrix} \lambda_i \end{pmatrix}$, $[\tau]_{\mathcal{B}'} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_m)$.

定理 8.6 (课本定理8.10, 8.11, 8.18): 下列叙述等价:

τ 可对角化, 即 \exists 一组基 \mathcal{B} , s.t. $[\tau]_{\mathcal{B}}$ 为对角阵.

(2) 几何重数 = 代数重数.

(3) $m_\tau(x) = (x - \lambda_1) \dots (x - \lambda_m)$, λ_i 互不相等.

(4) $V_{p_i} = \mathcal{E}_{\lambda_i}$, $V = \mathcal{E}_{\lambda_1} \oplus \dots \oplus \mathcal{E}_{\lambda_m}$.

(5) 特征向量构成 V 的基.

(6) $\tau = \lambda_1 \rho_1 + \cdots + \lambda_k \rho_k$, 其中 $\rho_1 + \cdots + \rho_k = 1$ 为单位分解, $\text{spec}(\tau) = \{\lambda_1, \cdots, \lambda_k\}$, $\text{Im } \rho_i = \mathcal{E}_{\lambda_i}$,
 $\ker \rho_i = \bigoplus_{j \neq i} \mathcal{E}_{\lambda_j}$.

8.1 投影算子

定义 8.8 投影(算子): 向量空间 $V = S \oplus T$, 映射 $\rho_{ST} : V \rightarrow V$, $u_S + u_T \mapsto u_S$, 其中 $u_S \in S$, $u_T \in T$, 则 ρ_{ST} 称为在 S 上沿 T 的投影(算子).

$$\ker \rho_{ST} = T, \text{Im } \rho_{ST} = S, V = \ker \rho_{ST} \oplus \text{Im } \rho_{ST}.$$

定理 8.7 (课本第3 版定理2.21): (1) $V = S \oplus T$, 则 $\rho_{ST} + \rho_{TS} = 1_V$ (V 上的恒等变换) 且 $\rho_{ST} \circ \rho_{TS} = \rho_{TS} \circ \rho_{ST} = 0_V$ (V 上的零变换).

(2) $\sigma \in \mathcal{L}(V)$, 若 $V = \ker \sigma \oplus \text{Im } \sigma$ 且 $\sigma|_{\text{Im } \sigma} = 1|_{\text{Im } \sigma}$, 其中 $|_{\text{Im } \sigma}$ 代表算子定义域为 $\text{Im } \sigma$, 则 σ 是在 $\text{Im } \sigma$ 上沿 $\ker \sigma$ 的投影.

证: (1) $\forall v \in V, \because V = S \oplus T, \therefore v = v_S + v_T$, 其中 $v_S \in S, v_T \in T$

$$\Rightarrow (\rho_{ST} + \rho_{TS})(v) = (\rho_{ST} + \rho_{TS})(v_S + v_T) = \rho_{ST}(v_S) + \rho_{ST}(v_T) + \rho_{TS}(v_S) + \rho_{TS}(v_T) = v_S + 0 + 0 + v_T = v \Rightarrow \rho_{ST} + \rho_{TS} = 1;$$

$$\Rightarrow \rho_{ST} \circ \rho_{TS}(v) = \rho_{ST}(\rho_{TS}(v_S + v_T)) = \rho_{ST}(\rho_{TS}(v_S) + \rho_{TS}(v_T)) = \rho_{ST}(0 + v_T) = 0 \Rightarrow \rho_{ST} \circ \rho_{TS} = 0.$$

同理, $\rho_{TS} \circ \rho_{ST} = 0$.

(2) $\forall v \in V, \because V = \ker \sigma \oplus \text{Im } \sigma, \therefore v = v_{\ker} + v_{\text{Im}}$, 其中 $v_{\ker} \in \ker \sigma, v_{\text{Im}} \in \text{Im } \sigma$

$$\Rightarrow \sigma(v) = \sigma(v_{\ker} + v_{\text{Im}}) = \sigma(v_{\ker}) + \sigma(v_{\text{Im}}) = \sigma(v_{\ker}) + 1(v_{\text{Im}}) = 0 + v_{\text{Im}} = v_{\text{Im}}, \text{ 故 } \sigma \text{ 为 } \text{Im } \sigma \text{ 上沿 } \ker \sigma \text{ 的投影.}$$

□

定理 8.8 (课本定理第3 版2.22): $\rho \in \mathcal{L}(V)$ 为投影 $\iff \rho^2 = \rho$.

证: “ \implies ”: $\forall v \in V, v = u_S + u_T$, 其中 $u_S \in S, u_T \in T$.

$$\rho(v) = u_S, \rho(\rho(v)) = \rho(u_S) = u_S \implies \rho^2 = \rho.$$

“ \impliedby ”: 首先将 V 分解成 $V = \ker \rho \oplus \text{Im } \rho$:

$$\text{一方面, } \forall v \in \ker \rho \cap \text{Im } \rho \implies v \in \ker \rho \iff \rho(v) = 0,$$

$$\text{且 } v \in \text{Im } \rho \iff \exists u \in V, \text{ s.t. } v = \rho(u)$$

$$\iff 0 = \rho(v) = \rho(\rho(u)) = \rho^2(u) = \rho(u) = v \implies \ker \rho \cap \text{Im } \rho = \{0\}.$$

另一方面, $\forall v \in V, \rho(v) \in \text{Im } \rho$.

$$\because \rho(v - \rho(v)) = \rho(v) - \rho(\rho(v)) = \rho(v) - \rho^2(v) = 0, \therefore v = (v - \rho(v)) + \rho(v), \text{ 其中 } v - \rho(v) \in \ker \rho, \rho(v) \in \text{Im } \rho \implies V = \ker \rho + \text{Im } \rho.$$

故 $V = \ker \rho \oplus \text{Im } \rho$.

又 $\because \forall \rho(u) \in \text{Im } \rho, \rho(\rho(u)) = \rho^2(u) = \rho(u) \implies \rho|_{\text{Im } \rho} = 1|_{\text{Im } \rho}, \therefore$ 由定理 8.7, ρ 为在 $\text{Im } \rho$ 上沿 $\ker \rho$ 的投影.

综上, 得证.

□

定义 8.9 正交: $\rho, \sigma \in \mathcal{L}(V)$ 为投影, 若 $\rho \circ \sigma = \sigma \circ \rho = 0$, 则称 ρ 与 σ 正交, 记作 $\rho \perp \sigma$.

$$\rho \perp \sigma \iff \forall v \in V, \rho \circ \sigma(v) = \rho(\sigma(v)) = 0 \text{ 且 } \sigma \circ \rho(v) = \sigma(\rho(v)) = 0 \iff \text{Im } \sigma \subseteq \ker \rho \text{ 且 } \text{Im } \rho \subseteq \ker \sigma.$$

定义 8.10 单位分解: $\rho_1 + \cdots + \rho_k = 1$, 其中 ρ_i 为投影且互相 \perp , 则称该式为单位分解.

定理 8.9 (课本第3版定理2.25): (1) $\rho_1 + \cdots + \rho_k = 1$ 为单位分解, 则 $\text{Im } \rho_1 \oplus \cdots \oplus \text{Im } \rho_k = V$.

(2) 若 $V = S_1 \oplus \cdots \oplus S_k$, 令 ρ_i 是在 S_i 上沿 $\sum_{j \neq i} S_j$ 的投影, 则 $\rho_1 + \cdots + \rho_k = 1$ 为单位分解.

证: (1) 先证 V 由 $\{\text{Im } \rho_1, \cdots, \text{Im } \rho_k\}$ 生成: $\forall v \in V, v = 1(v) = (\rho_1 + \cdots + \rho_k)(v) = \rho_1(v) + \cdots + \rho_k(v)$, 其中 $\rho_i(v) \in \text{Im } \rho_i$.

再证 $\text{Im } \rho_i \cap (\cup_{j \neq i} \text{Im } \rho_j) = \{0\}$: $\forall v \in \text{Im } \rho_i \cap (\cup_{j \neq i} \text{Im } \rho_j) \iff v \in \text{Im } \rho_i \iff \rho_i(v) = v$,

且 $\exists j \neq i$, s.t. $v \in \text{Im } \rho_j \iff \exists u \in V$, s.t. $\rho_j(u) = v$

$\implies v = \rho_i(v) = \rho_i(\rho_j(u)) = \rho_i \circ \rho_j(u) = 0 \implies \text{Im } \rho_i \cap (\sum_{j \neq i} \text{Im } \rho_j) = \{0\}$.

综上, 得证.

(2) $\forall v \in V, \because V = S_1 \oplus \cdots \oplus S_k, \therefore v = v_1 + \cdots + v_k$, 其中 $v_i = \rho_i(v) \in S_i$

$\implies v = \rho_1(v) + \cdots + \rho_k(v) = (\rho_1 + \cdots + \rho_k)(v) \implies \rho_1 + \cdots + \rho_k = 1$.

$\forall v \in V, \rho_j(v) \in \text{Im } \rho_j = S_j \subseteq \sum_{j \neq i} S_i \implies \rho_i \circ \rho_j(v) = \rho_i(\rho_j(v)) = 0$, 其中 $i \neq j \implies \rho_i \circ \rho_j = 0$.

同理, $\rho_j \circ \rho_i = 0$, 故 ρ_i 与 ρ_j 正交, 故 $\rho_1 + \cdots + \rho_k = 1$ 为单位分解.

□

若 $V = \mathcal{E}_{\lambda_1} \oplus \cdots \oplus \mathcal{E}_{\lambda_k}$, 令 ρ_i 为在 \mathcal{E}_{λ_i} 上沿 $\sum_{j \neq i} \mathcal{E}_{\lambda_j}$ 的投影, 则 $\rho_1 + \cdots + \rho_k = 1$ 是单位分解,
 $\rho_i|_{\mathcal{E}_{\lambda_i}} = 1|_{\mathcal{E}_{\lambda_i}} \implies \forall v \in \mathcal{E}_{\lambda_i}, \tau(v) = \lambda_i v = \lambda \rho_i(v)$, 即在 \mathcal{E}_{λ_i} 上, $\tau|_{\mathcal{E}_{\lambda_i}} = \lambda \rho_i$, 从而引出定理 8.6 (6).

Chapter 9

实数和复数内积空间

定义 9.1 内积和内积空间: $F = \mathbb{R}$ (或 \mathbb{C}), 映射 $\langle, \rangle : V \times V \rightarrow F, (u, v) \mapsto \langle u, v \rangle$ 满足

(1) 正定性: $\langle u, u \rangle \geq 0$, 且 $\langle u, u \rangle = 0 \iff u = 0$,

(2) 对称 (或共轭对称): 对 $F = \mathbb{R}$, $\langle u, v \rangle = \langle v, u \rangle$; 对 $F = \mathbb{C}$, $\langle u, v \rangle = \overline{\langle v, u \rangle}$,

(3) 关于第一坐标线性, 关于第二坐标线性 (或共轭线性): 对 $F = \mathbb{R}$, $\langle ru_1 + tu_2, v \rangle = r\langle u_1, v \rangle + t\langle u_2, v \rangle$,
 $\langle u, rv_1 + tv_2 \rangle = r\langle u, v_1 \rangle + t\langle u, v_2 \rangle$; 对 $F = \mathbb{C}$, $\langle ru_1 + tu_2, v \rangle = r\langle u_1, v \rangle + t\langle u_2, v \rangle$, $\langle u, rv_1 + tv_2 \rangle = \bar{r}\langle u, v_1 \rangle + \bar{t}\langle u, v_2 \rangle$,

则称 \langle, \rangle 是 V 上的内积, 称 V 为内积向量空间.

对给定的向量空间, 内积不唯一.

例 9.1: 在 \mathbb{R}^n 上, $x = (x_1, \dots, x_n)$, $y = (y_1, \dots, y_n)$,

内积又称点积, $\langle x, y \rangle = x \cdots y = \sum_{i=1}^n x_i y_i$. □

例 9.2: 在 \mathbb{C}^n 上, $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$, $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)$,

$\langle \alpha, \beta \rangle = \sum_{i=1}^n \alpha_i \bar{\beta}_i$. □

引理 9.1 (课本引理9.1): V 为内积向量空间, $u, v \in V, \forall x \in V, \langle u, x \rangle = \langle v, x \rangle \iff u = v$.

证: “ \implies ”: $\langle u, x \rangle = \langle v, x \rangle \iff \langle u, x \rangle - \langle v, x \rangle = 0 \iff \langle u - v, x \rangle = 0$.

不妨取 $x = u - v$, 则 $\langle u - v, u - v \rangle = 0 \iff u - v = 0 \iff u = v$.

“ \impliedby ”: 显然.

综上, 得证. □

定理 9.1 (课本第3版定理9.2): V 为内积向量空间, $\tau \in \mathcal{L}(V)$, 则

(1) $\forall v, w \in V, \langle \tau(v), w \rangle = 0 \implies \tau = 0$.

(2) 对 $F = \mathbb{C}, \forall v \in V, \langle \tau(v), v \rangle = 0 \implies \tau = 0$.

证: (1) 不妨取 $w = \tau(v)$, 则 $\langle \tau(v), w \rangle = \langle \tau(v), \tau(v) \rangle = 0 \implies \forall v, \tau(v) = 0$, 故 $\tau = 0$.

(2) $\forall v, w \in V, v + w \in V, v + iw \in V.$

$$\langle \tau(v + w), v + w \rangle = 0 = \langle \tau(v), v \rangle + \langle \tau(w), w \rangle, \langle \tau(v + iw), v + iw \rangle = \langle \tau(v), v \rangle + \langle \tau(iw), iw \rangle$$

$$\implies \langle \tau(v), w \rangle + \langle \tau(w), v \rangle = 0, -i\langle \tau(v), w \rangle + i\langle \tau(w), v \rangle = 0$$

$$\implies \langle \tau(v), w \rangle = 0.$$

利用 (1) 中的结论, $\tau(v) = 0.$

□

内积向量空间的子空间和商空间与普通的向量空间同.

S 是内积向量空间 V 的子空间, 则对应的商空间 $\frac{V}{S}$ 为 F 上的向量空间.

但在何种条件下, $\frac{V}{S}$ 是 F 上的内积向量空间 (内积定义同 V 上的内积定义)?

9.1 范数和距离

定义 9.2 (内积诱导出的)范数和赋范向量空间: u 的 (由内积诱导出的) 范数 $\|u\| \equiv \sqrt{\langle u, u \rangle}$, 此时称 V 为赋范向量空间.

定义 9.3 单位向量: 若 $\|u\| = 1$, 则称 u 为单位向量.

例 9.3: 在 \mathbb{R}^n 上, $x = (x_1, \dots, x_n)$ $\|x\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}.$

□

定理 9.2 范数的性质(课本定理9.2): (1) $\|v\| \geq 0$, 且 $\|v\| = 0 \iff v = 0.$

$$(2) \forall r \in F, \|rv\| = |r| \cdot \|v\|.$$

$$(3) \text{Cauchy-Schwarz 不等式: } |\langle u, v \rangle| \leq \|u\| \cdot \|v\|, \text{ 且 } |\langle u, v \rangle| = \|u\| \cdot \|v\| \iff u \text{ 与 } v \text{ 线性相关.}$$

$$(4) \text{三角不等式: } \|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|.$$

$$(5) \forall x \in V, \|u - v\| \leq \|u - x\| + \|v - x\|.$$

$$(6) |||u| - |v|| \leq \|u - v\|.$$

$$(7) \text{平行四边形法则: } \|u + v\|^2 + \|u - v\|^2 = 2(\|u\|^2 + \|v\|^2).$$

证: (7) $\|u + v\|^2 = \langle u + v, u + v \rangle = \langle u, u \rangle + \langle u, v \rangle + \langle v, u \rangle + \langle v, v \rangle, \|u - v\|^2 = \langle u - v, u - v \rangle = \langle u, u \rangle - \langle u, v \rangle - \langle v, u \rangle + \langle v, v \rangle.$

$$\text{以上两式相加得, } \|u + v\|^2 + \|u - v\|^2 = 2\langle u, u \rangle + 2\langle v, v \rangle = 2\|u\|^2 + 2\|v\|^2.$$

□

定义 9.4 范数和赋范向量空间: 映射 $\|\cdot\| : V \rightarrow F, v \mapsto \|v\|$, 若满足

$$\|v\| \geq 0, \text{ 且 } \|v\| = 0 \iff v = 0,$$

$$(2) \|rv\| = |r| \|v\|,$$

$$(3) \|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|,$$

则称 $\|\cdot\|$ 为 V 上的一个范数, 称 V 为赋范向量空间.

给定向量空间, 范数不唯一, 其中内积诱导的范数是一类特殊的范数, 故内积向量空间必为赋范向量空间. 内积诱导的范数可反向构建内积, 但利用一般的范数未必能构建内积 (因为或无法满足内积的线性性质).

定理 9.3 极化恒等式(课本定理9.3): 对内积诱导出的范数,

$$\text{对 } F = \mathbb{R}, \langle u, v \rangle = \frac{1}{4}(\|u+v\|^2 - \|u-v\|^2).$$

$$(2) \text{ 对 } F = \mathbb{C}, \langle u, v \rangle = \frac{1}{4}(\|u+v\|^2 - \|u-v\|^2) + \frac{i}{4}(\|u+iv\|^2 - \|u-iv\|^2).$$

定义 9.5 度量/距离: $d(u, v) \equiv \|u - v\|$, 此时称 V 为度量向量空间.

定理 9.4 度量的性质(课本定理9.4): (1) $d(u, v) \geq 0$, 且 $d(u, v) = 0 \iff u = v$.

$$(2) \text{ 对称性: } d(u, v) = d(v, u).$$

$$(3) \text{ 三角不等式: } d(u, v) \leq d(u, x) + d(x, v).$$

内积向量空间必为赋范向量空间, 赋范向量空间必为度量向量空间.

9.2 等距算子

定义 9.6 等距: V, W 是 F 上的内积向量空间, $\tau \in \mathcal{L}(V, W)$, 若 τ 保持内积不变, 即 $\langle \tau(u), \tau(v) \rangle = \langle u, v \rangle$, 则称 τ 等距.

定义 9.7 等距同构: 若 τ 等距且双射, 则称 τ 等距同构.

定理 9.5 (课本定理9.5): τ 等距 $\iff \|\tau(u)\| = \|u\|$.

证: “ \implies ”: 由定义即得.

“ \impliedby ”: 由极化恒等式 $\langle u, v \rangle = \frac{1}{4}(\|u+v\|^2 + \|u-v\|^2)$, 有 $\langle \tau(u), \tau(v) \rangle = \frac{1}{4}(\|\tau(u) + \tau(v)\|^2 + \|\tau(u) - \tau(v)\|^2) = \frac{1}{4}(\|\tau(u+v)\|^2 + \|\tau(u-v)\|^2) = \frac{1}{4}(\|u+v\|^2 + \|u-v\|^2) = \langle u, v \rangle$, 即 τ 等距.

综上, 得证. □

若 τ 等距, 则 $\tau(u) = 0 \iff u = 0$, 此时 $\ker \tau = \{0\}$, τ 单射.

9.3 正交性

定义 9.8 正交: (1) V 为内积向量空间, $u, v \in V$, 若 $\langle u, v \rangle = 0$, 则称 u 与 v 正交, 记作 $u \perp v$.

(2) X, Y 为 V 的子集, 若 $\forall x \in X, \forall y \in Y$, 有 $x \perp y$, 则称 X 与 Y 正交, 记作 $X \perp Y$.

(3) X 的正交补 $X^\perp = \{v \in X \mid v \perp X\}$.

$$\langle 0, v \rangle = \langle 0 + 0, v \rangle = \langle 0, v \rangle + \langle 0, v \rangle \implies \langle 0, v \rangle = 0.$$

$\therefore 0 \in X^\perp, \therefore X^\perp$ 必非空.

定理 9.6 (课本定理9.7): (1) X^\perp 为 V 的子空间.

(2) 子空间 $S \subseteq V, S \cap S^\perp = \{0\}$.

证: (1) $\forall u, v \in X^\perp, \forall x \in X, \langle u, x \rangle = 0, \langle v, x \rangle = 0$
 $\implies \langle ru + tv, x \rangle = r\langle u, x \rangle + t\langle v, x \rangle = r0 + t0 = 0$
 $\implies ru + tv \in X^\perp$, 故 X^\perp 是 V 的子空间.

(2) 设 $x \in S \cap S^\perp$, 则 $x \in S$ 且 $x \in S^\perp \iff x \perp S \implies x \perp x$
 $\implies \langle x, x \rangle = 0 \implies x = 0$, 故得证. □

定义 9.9 正交直和: $V = S \oplus T$ 且 $S \perp T$, 则称 V 为 S 与 T 的正交直和, 记作 $V = S \odot T$.

S 为 V 的子空间, S^c 为 S 的补空间, 则 $V = S \oplus S^c$.

给定子空间, 其补空间不唯一, 但正交补空间唯一.

例 9.4: 在 \mathbb{R}^2 上, 子空间 S 为过原点的一条直线, 任一过原点而不与 S 平行的直线均为 S 的补空间, 而仅过原点且与 S 正交的直线为 S 的正交补空间. □

定理 9.7 (课本第3版定理9.8): $V = S \odot T \iff V = S \oplus T$ 且 $T = S^\perp$.

给定子空间, 其正交补空间一定存在? 关于正交补空间的存在性问题, 我们稍后讨论.

给定 $S \subseteq V$ 和 S^\perp , 是否必有 $V = S \odot S^\perp$?

定义 9.10 正交(归一)集: $\mathcal{O} = \{u_1, \dots, u_k \mid k \in K\}$, 若 \mathcal{O} 中向量两两正交, 则称 \mathcal{O} 为正交集, 特别地, 若 $\langle u_i, u_j \rangle = \delta_{ij}$, 则称 \mathcal{O} 为正交归一集.

不含零的正交集均可归一化为正交归一集.

定理 9.8 (课本定理9.8): 不含零的正交集线性无关.

证: 设 $\{u_i \mid i \in K\}$ 是正交集且 $u_i \neq 0 \forall i \in K$.

设 $\sum_{i=1}^m r_i u_i = 0$.

$$\forall k \in K, 0 = \langle 0, u_k \rangle = \langle \sum_{i=1}^m r_i u_i, u_k \rangle = \sum_{i=1}^m r_i \langle u_i, u_k \rangle = r_k \langle u_k, u_k \rangle.$$

又 $\because u_k \neq 0, \therefore \langle u_k, u_k \rangle \neq 0 \implies r_k = 0$, 故得证. □

线性无关集未必正交, 但可通过 Gram-Schmidt 正交化过程将线性无关集正交化.

定理 9.9 Gram-Schmidt 正交化过程(课本定理9.10): $\mathcal{B} = \{b_1, \dots, b_n, \dots\}$ 是向量空间 V 中线性独立集且 $v_i \neq 0 \forall i$, 则可通过

$$o_1 = v_1,$$

$$\begin{aligned}
o_2 &= v_2 - \frac{\langle v_2, o_1 \rangle}{\langle o_1, o_1 \rangle} o_1, \\
o_3 &= v_3 - \frac{\langle v_3, o_2 \rangle}{\langle o_2, o_2 \rangle} o_2 - \frac{\langle v_3, o_1 \rangle}{\langle o_1, o_1 \rangle} o_1, \\
&\dots \\
o_n &= v_n - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\langle v_n, o_j \rangle}{\langle o_j, o_j \rangle} o_j, \\
&\dots,
\end{aligned}$$

再对 o_1, \dots, o_n, \dots 归一化, 得到正交归一集 $\mathcal{O} = \langle o_1, \dots, o_n, \dots \rangle$, s.t. $\langle \mathcal{B} \rangle = \langle \mathcal{O} \rangle$.

定义 9.11 Hamel 基: 极大线性无关集.

定义 9.12 Hilbert 基: 极大正交归一基.

定理 9.10 (课本第3 版定理9.13): 当 $\dim V < \infty$ 时, Hilbert 基 \implies Hamel 基.

例 9.5 Hilbert 基并非Hamel 基的例子(课本第3 版例9.5): $V = l^2$ 空间 (所有平方收敛级数列构成的空间), $M = \{e_1 = (1, 0, \dots), e_2 = (0, 1, 0, \dots), \dots\}$ 显然正交归一. 若 $v = (x_n) \in l^2$ 且 $v \perp M$, 则 $\forall i, x_i = \langle v, e_i \rangle = 0 \implies v = 0$, 故 M 为 V 的 Hilbert 基,

然而, M 张成的 l^2 的子空间中的平方收敛级数列必仅有有限个非零项 $\implies \text{span} S \neq l^2$, 故 M 非 Hamel 基. \square

定理 9.11 (课本定理9.11): \mathcal{O} 为正交归一集, $\langle \mathcal{O} \rangle = S \subseteq V$, $\forall v \in V$, 令 v 的傅里叶展开 $\hat{v} = \langle v, u_1 \rangle u_1 + \dots + \langle v, u_k \rangle u_k$, 则 $\hat{v} \in S$ 且

- (1) \hat{v} 是 S 中唯一满足 $v - \hat{v} \perp S$ 的向量.
- (2) \hat{v} 是 S 中与 v 最近的向量 (即 $\forall w \in S, d(v, \hat{v}) \leq d(v, w)$), 称 \hat{v} 为 v 在 S 中的最佳近似.
- (3) **Bessel 不等式:** $\|\hat{v}\| \leq \|v\|$.

证: (1) $\forall w \in S, w = \sum_{i=1}^k r_i u_i$.

$$\begin{aligned}
&\text{先证正交: } \langle v - \hat{v}, w \rangle = \langle v, w \rangle - \langle \hat{v}, w \rangle = \langle v, \sum_{i=1}^k r_i u_i \rangle - \langle \sum_{i=1}^k \langle v, u_i \rangle u_i, \sum_{j=1}^k r_j u_j \rangle \\
&= \sum_{i=1}^k \bar{r}_i \langle v, u_i \rangle - \sum_{i=1}^k \langle v, u_i \rangle \sum_{j=1}^k \bar{r}_j \langle u_i, u_j \rangle = \sum_{i=1}^k \bar{r}_i \langle v, u_i \rangle - \sum_{i=1}^k \langle v, u_i \rangle \sum_{j=1}^k \bar{r}_j \delta_{ij} = \sum_{i=1}^k \bar{r}_i \langle v, u_i \rangle - \sum_{i=1}^k \bar{r}_i \langle v, u_i \rangle = 0 \implies v - \hat{v} \perp S.
\end{aligned}$$

再证唯一: 若取 $u \in S$, s.t. $v - u \perp S$, 设 $u = \sum_{i=1}^k l_i u_i$.

$$\begin{aligned}
&\because v - u \perp S, \therefore \forall u_j \in S, j = 1, \dots, k, \langle v - u, u_j \rangle = 0 \implies \langle v, u_j \rangle - \langle u, u_j \rangle = 0 \implies \langle v, u_j \rangle = \langle u, u_j \rangle = l_j \implies \\
&u = \sum_{i=1}^k l_i u_i = \sum_{i=1}^k \langle v, u_i \rangle u_i = \hat{v}.
\end{aligned}$$

综上, 得证.

- (2) $\forall w \in S, d^2(v, w) = \|v - w\|^2 = \|v - \hat{v} + \hat{v} - w\|^2$.
 $\because \hat{v} \in S, w \in S, \therefore \hat{v} - w \in S$.

$$\begin{aligned} & \text{又 } \because v - \hat{v} \perp S, \therefore v - \hat{v} \perp \hat{v} - w \\ & \implies d^2(u, w) = \|v - \hat{v}\|^2 + \|\hat{v} - w\|^2. \\ & \because \|\hat{v} - w\|^2 \geq 0, \therefore d^2(u, w) \geq \|v - \hat{v}\|^2 = d^2(v, \hat{v}). \end{aligned}$$

$$(3) \|v\|^2 = \|v - \hat{v} + \hat{v}\|^2.$$

$$\because v - \hat{v} \perp S, \hat{v} \in S, \therefore v - \hat{v} \perp \hat{v}.$$

$$\text{由勾股定理, } \|v - \hat{v} + \hat{v}\|^2 = \|v - \hat{v}\|^2 + \|\hat{v}\|^2 \geq \|\hat{v}\|^2 \implies \|v\| \geq \|\hat{v}\|.$$

□

定理 9.12 投影定理(课本定理9.12): S 是 V 的有限维子空间, 则 $V = S \odot S^\perp$, 且 $\forall v \in V, v = \hat{v} + (v - \hat{v})$, 其中 $\hat{v} \in S$ 为 v 在 S 中的最佳近似, $v - \hat{v} \in S^\perp$, $\dim V = \dim S + \dim S^\perp$.

定理 9.13 (课本定理9.12): (1) S 为 V 的有限维子空间, 则 $S^{\perp\perp} = S$.

(2) 子集 $X \subseteq V$ 且 $\dim\langle X \rangle < \infty$, 则 $X^{\perp\perp} = \langle X \rangle$.

证: (1) $S^\perp = \{v \in V \mid v \perp S\}$, $S^{\perp\perp} = \{u \in V \mid u \perp S^\perp\}$, 显然, $S \subseteq S^{\perp\perp}$.

$$\forall w \in S^{\perp\perp} \subseteq V, \because S \text{ 有限维}, \therefore V = S \odot S^\perp \implies w = w_S + w_{S^\perp} \implies w_S = w - w_{S^\perp}.$$

$$0 = \langle w_{S^\perp}, w_S \rangle = \langle w_{S^\perp}, w - w_{S^\perp} \rangle = \langle w_{S^\perp}, w \rangle - \langle w_{S^\perp}, w_{S^\perp} \rangle.$$

$$\because w \in S^{\perp\perp}, \therefore \langle w_{S^\perp}, w \rangle = 0 \implies \langle w_{S^\perp}, w_{S^\perp} \rangle = 0 \implies w_{S^\perp} = 0 \implies w = w_S \in S, \text{ 故 } S^{\perp\perp} \subseteq S.$$

综上, 得证.

(2) $\because \dim\langle X \rangle < \infty, \therefore |X| < \infty$, 设 $X = \{u_1, \dots, u_k\}$.

$$\forall w_1 \in \langle X \rangle, w_1 = \sum_{i=1}^k r_i u_i.$$

$$\forall w_2 \in X^\perp, \langle w_1, w_2 \rangle = \langle \sum_{i=1}^k r_i u_i, w_2 \rangle = \sum_{i=1}^k r_i \langle u_i, w_2 \rangle = 0 \implies \langle X \rangle \subseteq X^{\perp\perp}.$$

$$\forall w \in X^{\perp\perp}, \text{ 令 } w \text{ 在 } \langle X \rangle \text{ 上的最佳近似 } \hat{w} = \sum_{i=1}^k l_i u_i \in \langle X \rangle.$$

$$\langle w - \hat{w}, w - \hat{w} \rangle = \langle w, w - \hat{w} \rangle - \langle \hat{w}, w - \hat{w} \rangle,$$

$$\text{其中 } \because w - \hat{w} \in \langle X \rangle^\perp, \hat{w} \in \langle X \rangle, \therefore \langle \hat{w}, w - \hat{w} \rangle = 0,$$

$$\because w - \hat{w} \in X^\perp, w \in X^{\perp\perp}, \therefore \langle w, w - \hat{w} \rangle = 0$$

$$\implies \langle w - \hat{w}, w - \hat{w} \rangle = 0 \implies w - \hat{w} = 0 \implies w = \hat{w} \in \langle X \rangle \implies X^{\perp\perp} \subseteq \langle X \rangle.$$

综上, 得证.

□

定理 9.14 (课本第3版定理9.17): $\mathcal{O} = \{u_1, \dots, u_k\}$ 为正交归一集, $S = \langle \mathcal{O} \rangle$, 则下列叙述等价:

(1) \mathcal{O} 为 V 的正交归一基.

(2) $\mathcal{O}^\perp = \{0\}$.

(3) $\forall v \in V, v = \hat{v} = \sum_{i=1}^k \langle v, u_i \rangle u_i$.

(4) **Bessel 不等式:** $\|v\| = \|\hat{v}\|$.

$$(5) \text{ Parseval 不等式: } \langle v, w \rangle = \sum_{i=1}^k \langle v, u_i \rangle \overline{\langle w, u_i \rangle}, \text{ 即在定序基 } \mathcal{O} \text{ 下, } V \rightarrow F^k, v \mapsto [v]_{\mathcal{O}} = \begin{pmatrix} \langle v, u_1 \rangle \\ \vdots \\ \langle v, u_k \rangle \end{pmatrix},$$

$$w \mapsto [w]_{\mathcal{O}} = \begin{pmatrix} \langle w, u_1 \rangle \\ \vdots \\ \langle w, u_k \rangle \end{pmatrix}, \langle u, w \rangle = [v]_{\mathcal{O}} \cdot [w]_{\mathcal{O}}.$$

证: “(1) \implies (2)”: $V = \langle \mathcal{O} \rangle, \forall u \in \mathcal{O}^\perp \subseteq V, u = \sum_{i=1}^k l_i u_i$.

$\because u \in \mathcal{O}^\perp, \therefore \forall i = 1, \dots, k, \langle u, u_i \rangle = 0$.

$0 = \langle u, u_j \rangle = \sum_{i=1}^k l_i \langle u_i, u_j \rangle = \sum_{i=1}^k l_i \delta_{ij} = l_j \implies u = \sum_{i=1}^k l_i u_i = 0$, 故得证. \square

9.4 Riesz 表示定理

$F = \mathbb{R}$ (或 \mathbb{C}), V 为 F 上的有限维内积向量空间, $\dim V = n$, 内积 $\langle \cdot, \cdot \rangle : V \times V \rightarrow F, (u, v) \mapsto \langle u, v \rangle$, 固定第二坐标 $v = x$, 定义线性泛函 $\langle \cdot, x \rangle \in V^* : V \rightarrow F, v \mapsto \langle v, x \rangle$.

定理 9.15 Riesz 表示定理(课本定理9.15): $\dim V = n, \forall f \in V^*, \exists! x \in V, \text{ s.t. } f(v) = \langle v, x \rangle$.

即对偶空间中的任一函数均可用与唯一向量的内积代替, 或对偶空间中的任一函数均与唯一向量对应.

证: $\because \text{Im } f \subseteq F, \therefore \dim \text{Im } f \leq \dim F = 1$.

若 $\dim \text{Im } f = 0$, 即 $\text{Im } f = \{0\}$, 则 $f = 0 \implies x = 0$;

若 $\dim \text{Im } f \neq 0$, 则 $\dim \text{Im } f = 1, \exists 0 \neq u \in V, \text{ s.t. } f(u) \neq 0$.

$\because V = \ker f \oplus \ker f^c$ 且 $\ker f^c \approx \text{Im } f, \therefore \dim \ker f^c = \dim \text{Im } f = 1 \implies \ker f^c = \langle u \rangle$.

选取适当的 u , 则可将 V 分解为 $V = \ker f \oplus \langle u \rangle = \langle u \rangle^\perp \oplus \langle u \rangle$, 其中 $\ker f = \langle u \rangle^\perp$.

$\because V = \langle u \rangle \oplus \langle u \rangle^\perp, \therefore \forall v \in V, v = ru + w$, 其中 $w \in \langle u \rangle^\perp = \ker f \implies f(v) = f(ru + w) = rf(u) + f(w) = rf(u)$.

取 $x = \frac{\overline{f(u)}}{\langle u, u \rangle} u$, 则 $\langle v, x \rangle = \langle v, \frac{\overline{f(u)}}{\langle u, u \rangle} u \rangle = \frac{f(u)}{\langle u, u \rangle} \langle v, u \rangle = \frac{f(u)}{\langle u, u \rangle} \langle ru + w, u \rangle = \frac{rf(u)}{\langle u, u \rangle} \langle u, u \rangle = rf(u) = f(v)$. \square

由对偶空间中函数与向量空间中向量的一一对应的关系, 可引出

定义 9.13 Riesz 映射: $\mathcal{R} : V^* \rightarrow V, f \mapsto x, \text{ s.t. } \forall v \in V, f(v) = \langle v, x \rangle$.

(1) \mathcal{R} 是映射.

(2) \mathcal{R} 满射.

(3) \mathcal{R} 单射.

(4) \mathcal{R} 共轭线性.

证:

(1) 由定理 9.15 即得.

(2) 显然.

(3) $\ker \mathcal{R} = \{f \in V^* \mid \mathcal{R}(f) = 0\} = \{f \in V^* \mid f(v) = \langle v, 0 \rangle = 0 \forall v\} = \{0\}$, 故得证.

(4) 令 $\mathcal{R}(f) = x_f$, $\mathcal{R}(g) = x_g$, $\mathcal{R}(rf + tg) = x_{rf+tg}$.

一方面, $(rf + tg)(v) = \langle v, x_{rf+tg} \rangle$;

另一方面, $(rf + tg)(v) = rf(v) + tg(v) = r\langle v, x_f \rangle + t\langle v, x_g \rangle = \langle v, \bar{r}x_f + \bar{t}x_g \rangle$

$\implies x_{rf+tg} = \bar{r}x_f + \bar{t}x_g$, 即 $\mathcal{R}(rf + tg) = r\mathcal{R}(f) + t\mathcal{R}(g)$. □

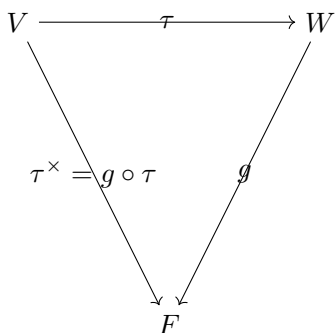
综上, \mathcal{R} 共轭同构.

Chapter 10

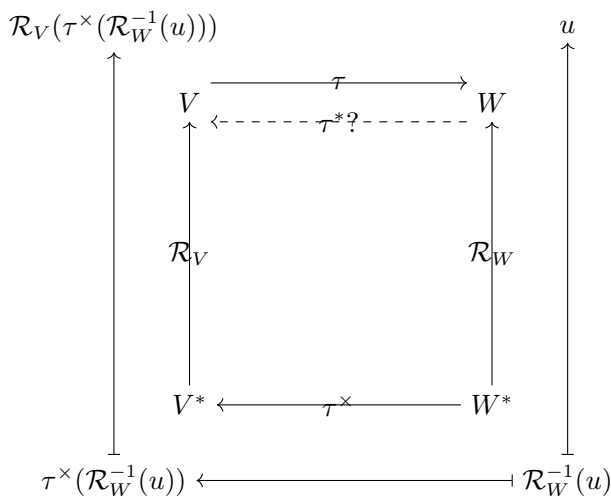
正规算子的结构理论

10.1 线性算子的伴随

先来回顾一下算子伴随: \mathcal{B} 和 \mathcal{C} 分别为线性空间 V 和 W 的定序基, V^* 和 W^* 分别为 V 和 W 的对偶空间, \mathcal{B}^* 和 \mathcal{C}^* 分别为 \mathcal{B} 和 \mathcal{C} 的对偶基, 对给定的线性变换 $\tau \in \mathcal{L}(V, W)$, 有算子伴随 $\tau^\times : W^* \rightarrow V^*$, $g \mapsto \tau^\times = g \circ \tau$, 线性变换在定序基上与其算子伴随在对偶基上的表示存在关系: $[\tau]_{\mathcal{B}\mathcal{C}} = [\tau^\times]_{\mathcal{C}^*\mathcal{B}^*}$.



下面来定义另一种伴随: 对于有限维内积向量空间 V 和 W , $\dim V = n$, $\dim W = m$, Riesz 映射 $\mathcal{R}_V : V^* \rightarrow V$, $\mathcal{R}_W : W^* \rightarrow W$, $\therefore \mathcal{R}_W$ 为共轭同构, \therefore 有其逆同构 \mathcal{R}_W^{-1} , 从而有映射 $\tau^* = \mathcal{R}_V \circ \tau^\times \circ \mathcal{R}_W$.



定理 10.1 (课本定理10.1): (1) τ^* 为线性变换, 即 $\tau^* \in \mathcal{L}(W, V)$.

(2) $\langle v, \tau^*(w) \rangle = \langle \tau(v), w \rangle$, 称 τ^* 为 τ 的伴随.

(3) $[\tau]_{\mathcal{B}\mathcal{C}} = [\tau^*]_{\mathcal{C}\mathcal{B}}^\dagger$.

证: (1) $\tau^* = \mathcal{R}_V \circ \tau^\times \circ \mathcal{R}_W^{-1} : W \rightarrow V$.

$\forall u_1, u_2 \in W, \tau^*(ru_1 + tu_2) = \mathcal{R}_V \circ \tau^\times \circ \mathcal{R}_W^{-1}(ru_1 + tu_2) = \mathcal{R}_V \circ \tau^\times(\mathcal{R}_W^{-1}(ru_1 + tu_2)) = \mathcal{R}_V \circ \tau^\times(\bar{r}\mathcal{R}_W^{-1}(u_1) + \bar{t}\mathcal{R}_W^{-1}(u_2)) = \mathcal{R}_V(\tau^\times(\bar{r}\mathcal{R}_W^{-1}(u_1) + \bar{t}\mathcal{R}_W^{-1}(u_2))) = \mathcal{R}_V(\bar{r}\tau^\times(\mathcal{R}_W^{-1}(u_1)) + \bar{t}\tau^\times(\mathcal{R}_W^{-1}(u_2))) = r\mathcal{R}_V(\tau^\times(\mathcal{R}_W^{-1}(u_1))) + t\mathcal{R}_V(\tau^\times(\mathcal{R}_W^{-1}(u_2))) = r\tau^*(u_1) + t\tau^*(u_2)$, 其中利用了引理 10.1, 得证.

(2) $\forall v \in V, \forall w \in W, \langle v, \tau^*(w) \rangle = \langle v, \mathcal{R}_V(\tau^\times \circ \mathcal{R}_W^{-1}(w)) \rangle = \tau^\times \circ \mathcal{R}_W^{-1}(w)(v) = \mathcal{R}_W^{-1}(w) \circ \tau(v) = \mathcal{R}_W^{-1}(w)(\tau(v)) = \langle \tau(v), w \rangle$.

(3) 设 V 的正交归一基 $\mathcal{B} = \{b_1, \dots, b_n\}$, W 的正交归一基 $\mathcal{C} = \{c_1, \dots, c_m\}$.

$[\tau]_{\mathcal{B}\mathcal{C}} = \begin{pmatrix} [\tau(b_1)]_{\mathcal{C}} & \cdots & [\tau(b_n)]_{\mathcal{C}} \end{pmatrix}, [\tau^*]_{\mathcal{C}\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} [\tau^*(c_1)]_{\mathcal{B}} & \cdots & [\tau^*(c_m)]_{\mathcal{B}} \end{pmatrix}$.

设 $[\tau(b_i)]_{\mathcal{C}} = \begin{pmatrix} \alpha_{1i} \\ \vdots \\ \alpha_{mi} \end{pmatrix}$, $\tau(b_i) = \sum_{k=1}^m \alpha_{ki} c_k$, $\langle \tau(b_i), c_j \rangle = \langle \sum_{k=1}^m \alpha_{ki} c_k, c_j \rangle = \sum_{k=1}^m \alpha_{ki} \langle c_k, c_j \rangle = \sum_{k=1}^m \alpha_{ki} \delta_{kj} = \alpha_{ji}$.

同理, 设 $[\tau^*(c_j)]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \beta_{1j} \\ \vdots \\ \beta_{nj} \end{pmatrix}$, $\tau^*(c_j) = \sum_{k=1}^n \beta_{kj} b_k$, $\langle \tau^*(c_j), b_i \rangle = \langle \sum_{k=1}^n \beta_{kj} b_k, b_i \rangle = \sum_{k=1}^n \beta_{kj} \langle b_k, b_i \rangle = \sum_{k=1}^n \beta_{kj} \delta_{ki} = \beta_{ij}$.

又 $\because \langle \tau(b_i), c_j \rangle = \langle b_i, \tau^*(c_j) \rangle = \overline{\langle \tau^*(c_j), b_i \rangle}$, $\therefore \alpha_{ji} = \beta_{ij} \implies [\tau]_{\mathcal{B}\mathcal{C}} = [\tau^*]_{\mathcal{C}\mathcal{B}}^\dagger$.

□

引理 10.1: Riesz 映射的逆 \mathcal{R}^{-1} 共轭线性.

证: $\forall x_1, x_2 \in V, \exists f_1 = \mathcal{R}^{-1}(x_1), f_2 = \mathcal{R}^{-1}(x_2) \in V^*$, s.t. $\forall v \in V, f_1(v) = \langle v, x_1 \rangle, f_2(v) = \langle v, x_2 \rangle$

$\implies \forall \bar{r}, \bar{t} \in F, (\bar{r}\mathcal{R}^{-1}(x_1) + \bar{t}\mathcal{R}^{-1}(x_2))(v) = (\bar{r}f_1 + \bar{t}f_2)(v) = \bar{r}f_1(v) + \bar{t}f_2(v) = \bar{r}\langle v, x_1 \rangle + \bar{t}\langle v, x_2 \rangle = \langle v, \bar{r}x_1 + \bar{t}x_2 \rangle = \langle v, r x_1 + t x_2 \rangle = \mathcal{R}^{-1}(r x_1 + t x_2)(v)$

$\implies \mathcal{R}^{-1}(r x_1 + t x_2) = \bar{r}\mathcal{R}^{-1}(x_1) + \bar{t}\mathcal{R}^{-1}(x_2)$.

□

$\because [\tau]_{\mathcal{B}\mathcal{C}} = [\tau^\times]_{\mathcal{C}^*\mathcal{B}^*}^T, [\tau]_{\mathcal{B}\mathcal{C}} = [\tau^*]_{\mathcal{C}\mathcal{B}}^\dagger, \therefore [\tau^\times]_{\mathcal{C}^*\mathcal{B}^*} = \overline{[\tau^*]_{\mathcal{C}\mathcal{B}}}$. 当然这也可用类似定理 10.1 (3) 的证明方法证明:

证: $[\tau^\times]_{\mathcal{C}^*\mathcal{B}^*} = \begin{pmatrix} [\tau^\times(c_1^*)]_{\mathcal{B}^*} & \cdots & [\tau^\times(c_n^*)]_{\mathcal{B}^*} \end{pmatrix}, [\tau^*]_{\mathcal{C}\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} [\tau^*(c_1)]_{\mathcal{B}} & \cdots & [\tau^*(c_n)]_{\mathcal{B}} \end{pmatrix}$,

设 $[\tau^\times(c_i^*)]_{\mathcal{B}^*} = \begin{pmatrix} \alpha_{1i} \\ \vdots \\ \alpha_{ni} \end{pmatrix}$, 则 $\tau^\times(c_i^*) = \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} b_k^*$.

设 $[\tau^*(c_i)]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \beta_{1i} \\ \vdots \\ \beta_{mi} \end{pmatrix}$, 则 $\tau^*(c_i) = \sum_{k=1}^m \beta_{ki} b_k$.

一方面, $\because \mathcal{R}_W^{-1}(c_i)(c_j) = \langle c_j, c_i \rangle = \delta_{ij}, \therefore \mathcal{R}_V(c_i) = c_i^*$

$\implies \langle b_j, \tau^*(c_i) \rangle = \langle b_j, \mathcal{R}_V \circ \tau^\times \circ \mathcal{R}_W^{-1}(c_i) \rangle = \langle b_j, \mathcal{R}_V(\tau^\times(\mathcal{R}_W^{-1}(c_i))) \rangle = \langle b_j, \mathcal{R}_V(\tau^\times(c_i^*)) \rangle = \tau^\times(c_i^*)(b_j) = (\sum_{k=1}^n \alpha_{ki} b_k^*)(b_j) =$

$$\sum_{k=1}^n \alpha_{ki} b_k^*(b_j) = \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \delta_{jk} = \alpha_{ji};$$

$$\text{另一方面, } \langle b_j, \tau^*(c_i) \rangle = \langle b_j, \sum_{k=1}^m \beta_{ki} b_k \rangle = \sum_{k=1}^m \overline{\beta_{ki}} \langle b_j, b_k \rangle = \sum_{k=1}^m \overline{\beta_{ki}} \delta_{jk} = \overline{\beta_{ji}}.$$

故 $\alpha_{ji} = \overline{\beta_{ji}}$, 得证. □

定理 10.2 (课本定理10.2): V, W 为有限维内积向量空间, $\forall \sigma, \tau \in \mathcal{L}(V, W), \forall r \in F$,

$$(1) (\sigma + \tau)^* = \sigma^* + \tau^*.$$

$$(2) (r\tau)^* = \bar{r}\tau^*.$$

$$(3) \tau^{**} = \tau.$$

$$(4) \text{ 若 } V = W, \text{ 则 } (\tau \circ \sigma)^* = \sigma^* \circ \tau^*.$$

$$(5) V = W, \text{ 若 } \tau \text{ 可逆, 则 } (\tau^{-1})^* = (\tau^*)^{-1}.$$

$$(6) V = W, p(x) \in \mathbb{R}[x], \text{ 则 } p(\tau)^* = p(\tau^*).$$

$$(7) S \text{ 是 } V \text{ 的子空间, } \tau \in \mathcal{L}(V), \text{ 则 } S \text{ 是 } \tau \text{ 的不变子空间} \iff S^\perp \text{ 是 } \tau^* \text{ 的不变子空间}.$$

证: (1) $\forall u \in W, \forall v \in V, \langle v, (\sigma + \tau)^*(u) \rangle = \langle (\sigma + \tau)(v), u \rangle = \langle \sigma(v) + \tau(v), u \rangle = \langle \sigma(v), u \rangle + \langle \tau(v), u \rangle = \langle v, \sigma^*(u) \rangle + \langle v, \tau^*(u) \rangle = \langle v, \sigma^*(u) + \tau^*(u) \rangle = \langle v, (\sigma^* + \tau^*)(u) \rangle \implies (\sigma + \tau)^*(u) = (\sigma^* + \tau^*)(u) \implies (\sigma + \tau)^* = \sigma^* + \tau^*.$

$$(2) \forall u \in W, \forall v \in V, \langle v, (r\tau)^*(u) \rangle = \langle r\tau(v), u \rangle = r \langle \tau(v), u \rangle = r \langle v, \tau^*(u) \rangle = \langle v, \bar{r}\tau^*(u) \rangle \implies (r\tau)^*(u) = \bar{r}\tau^*(u) \implies (r\tau)^* = \bar{r}\tau^*.$$

$$(3) \forall u \in W, \forall v \in V, \langle u, \tau^{**}(v) \rangle = \langle u, (\tau^*)^*(v) \rangle = \langle \tau^*(u), v \rangle = \overline{\langle v, \tau^*(u) \rangle} = \overline{\langle \tau(v), u \rangle} = \langle u, \tau(v) \rangle \implies \tau^{**}(v) = \tau(v) \implies \tau^{**} = \tau.$$

$$(4) \forall v \in V, \forall u \in W, \langle u, (\tau \circ \sigma)^*(v) \rangle = \langle (\tau \circ \sigma)(u), v \rangle = \langle \tau(\sigma(u)), v \rangle = \langle \sigma(u), \tau^*(v) \rangle = \langle u, \sigma^*(\tau^*(v)) \rangle = \langle u, (\sigma^* \circ \tau^*)(v) \rangle \implies (\tau \circ \sigma)^*(v) = (\sigma^* \circ \tau^*)(v) \implies (\tau \circ \sigma)^* = \sigma^* \circ \tau^*.$$

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{\sigma} & V \\ \xleftarrow{\sigma^*} & & \xleftarrow{\tau^*} V \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{\sigma \circ \tau} & V \\ \xleftarrow{(\sigma \circ \tau)^*} & & \end{array}$$

$$(5) (\tau^{-1})^* \circ \tau^* = (\tau \circ \tau^{-1})^* = 1_V^* = 1_V \implies (\tau^{-1})^* = (\tau^*)^{-1}.$$

$$(\because \langle u, v \rangle = \mathcal{R}^{-1}(v)(u) = (\mathcal{R}^{-1}(v) \circ 1_V)(u) = \langle u, \mathcal{R}_V(\mathcal{R}_V^{-1}(v) \circ 1_V) \rangle)$$

$$\begin{array}{ccc}
 & \swarrow & \\
 \mathcal{R}_V(\mathcal{R}_V^{-1}(v) \circ 1_V) = v & & v \\
 \uparrow & \xrightarrow{1_V} & \uparrow \\
 V & \xleftarrow{1_V^* = 1_V^?} & V \\
 \uparrow \mathcal{R}_V & & \uparrow \mathcal{R}_V \\
 V^* & \xleftarrow{1_V^\times} & V^* \\
 \uparrow & & \uparrow \\
 1_V^\times(\mathcal{R}_V^{-1}(v)) = \mathcal{R}_V^{-1}(v) \circ 1_V & \xleftarrow{\quad} & \mathcal{R}_V^{-1}(v)
 \end{array}$$

$$(6) (\tau \circ \tau)^* = \tau^* \circ \tau^*, (\tau^k)^* = (\tau^*)^k.$$

$$\begin{aligned}
 &\text{若 } r \in \mathbb{R}, \text{ 则 } (r\tau)^* = r\tau^*, (r\tau^k)^* = r(\tau^*)^k \\
 &\implies (p(\tau))^* = p(\tau^*).
 \end{aligned}$$

$$(7) \text{ “}\implies\text{”}: \because S \text{ 是 } \tau \text{ 的不变子空间, } \therefore \tau(S) \subseteq S.$$

$$\forall v \in S^\perp, \forall u \in S, \tau(u) \in S \implies \langle u, \tau^*(v) \rangle = \langle \tau(u), v \rangle = 0 \implies \tau^*(v) \in S^\perp \implies S^\perp \text{ 是 } \tau^* \text{ 的不变子空间.}$$

$$\text{“}\impliedby\text{”}: \because S^{\perp\perp} = S, \text{ 故同理得证.}$$

□

定理 10.3 (课本定理10.3): V, W 为有限维内积向量空间, $\tau \in \mathcal{L}(V, W)$, 则

$$(1) \ker \tau^* = (\text{Im } \tau)^\perp, \text{ 等价地, } \text{Im } \tau^* = (\ker \tau)^\perp.$$

$$(2) \ker \tau^* \tau = \ker \tau, \ker \tau \tau^* = \ker \tau^*.$$

$$(3) \text{Im } \tau^* \tau = \text{Im } \tau^*, \text{Im } \tau \tau^* = \text{Im } \tau.$$

$$(4) \rho_{ST}^* = \rho_{T^\perp S^\perp}.$$

证: (1) $\forall w \in \text{Im } \tau, \exists u \in V, \text{ s.t. } w = \tau(u).$

$$v \in \ker \tau^* \iff \tau^*(v) = 0 \iff \langle w, v \rangle = \langle \tau(u), v \rangle = \langle u, \tau^*(v) \rangle = \langle u, 0 \rangle = 0 \iff v \in (\text{Im } \tau)^\perp, \text{ 故 } \ker \tau^* = (\text{Im } \tau)^\perp.$$

$$\forall w \in \ker \tau, \iff \tau(w) = 0 \in W.$$

$$v \in \text{Im } \tau^* \iff \exists u \in W, \text{ s.t. } \tau^*(u) = v \iff \langle w, v \rangle = \langle w, \tau^*(u) \rangle = \langle \tau(w), u \rangle = \langle 0, u \rangle = 0 \iff v \in (\ker \tau)^\perp, \text{ 故 } \text{Im } \tau^* = (\ker \tau)^\perp.$$

$$(2) \forall v \in \ker \tau \tau^*, \tau^* \tau(v) = 0 \implies \langle v, \tau^* \tau(v) \rangle = 0 \iff \langle \tau(v), \tau(v) \rangle = 0 \implies \tau(v) = 0 \iff v \in \ker \tau, \text{ 故 } \ker \tau^* \tau \subseteq \ker \tau.$$

$$\forall v \in \ker \tau, \tau(v) = 0 \implies \tau^* \tau(v) = 0 \iff v \in \ker \tau^* \tau, \text{ 故 } \ker \tau \subseteq \ker \tau^* \tau.$$

$$\text{综上, } \ker \tau^* \tau = \ker \tau.$$

$$\text{同理, } \ker \tau \tau^* = \ker \tau^*.$$

(3) $\forall v \in \text{Im } \tau^* \tau, \exists u \in V, \text{ s.t. } u = \tau^* \tau(v) = \tau^*(\tau(v))$, 即 $\exists w = \tau(v) \in W, \text{ s.t. } v = \tau^*(w)$, 故 $\text{Im } \tau^* \tau \in \text{Im } \tau^*$.

$\forall v \in \text{Im } \tau^*, \exists w \in W, \text{ s.t. } v = \tau^*(w)$.

$\therefore \tau$ 为共轭同构, $\therefore \exists u \in V, \text{ s.t. } w = \tau(u) \implies v = \tau^* \tau(u)$, 故 $\text{Im } \tau^* \in \text{Im } \tau^* \tau$.

综上, $\text{Im } \tau^* \tau = \text{Im } \tau^*$.

同理, $\text{Im } \tau \tau^* = \text{Im } \tau$.

(4) $\forall u, v \in V$,

$\rho_{ST} : V \rightarrow V, u = u_S + u_T \mapsto u_S, v = v_S + v_T \mapsto v_S$, 其中 $u_S \in S, u_T \in T, v_S \in S, v_T \in T, V = S \oplus T$,

$\rho_{T^\perp S^\perp} : V \rightarrow V, u = u_{S^\perp} + u_{T^\perp} \mapsto u_{T^\perp}, v = v_{S^\perp} + v_{T^\perp} \mapsto v_{T^\perp}$, 其中 $u_{S^\perp} \in S^\perp, u_{T^\perp} \in T^\perp, v_{S^\perp} \in S^\perp, v_{T^\perp} \in T^\perp, V = S^\perp \oplus T^\perp$.

$\therefore \langle u, \rho_{ST}^*(v) \rangle = \langle \rho_{ST}(u), v \rangle = \langle u_S, v \rangle, \langle u, \rho_{T^\perp S^\perp}(v) \rangle = \langle u, v_{T^\perp} \rangle$,

$\therefore \langle u, \rho_{ST}^*(v) \rangle - \langle u, \rho_{T^\perp S^\perp}(v) \rangle = \langle u_S, v \rangle - \langle u, v_{T^\perp} \rangle = \langle u_S, v \rangle - \langle u_S, v_{T^\perp} \rangle + \langle u_S, v_{T^\perp} \rangle - \langle u, v_{T^\perp} \rangle = \langle u_S, v - v_{T^\perp} \rangle - \langle u - u_S, v_{T^\perp} \rangle = \langle u_S, v_{S^\perp} \rangle - \langle u_T, v_{T^\perp} \rangle$.

又 $\therefore v_S \in S, u_{S^\perp} \in S^\perp, v_T \in T, u_{T^\perp} \in T^\perp, \therefore \langle u_S, u_{S^\perp} \rangle = 0, \langle u_T, v_{T^\perp} \rangle = 0 \implies \langle u, \rho_{ST}^*(v) \rangle - \langle u, \rho_{T^\perp S^\perp}(v) \rangle = 0 \implies \langle u, \rho_{ST}^*(v) \rangle = \langle u, \rho_{T^\perp S^\perp}(v) \rangle \implies \rho_{ST}^*(v) = \rho_{T^\perp S^\perp}(v) \implies \rho_{ST}^* = \rho_{T^\perp S^\perp}$.

□

10.2 正交(/么正)对角化

先来回顾一下线性变换可对角化的充要条件: $\tau \in \mathcal{L}(V)$, τ 可对角化 (即 \exists 一组基 \mathcal{B} , $[\tau]_{\mathcal{B}}$ 为对角阵)

$\iff m_\tau(x) = (x - \lambda_1) \cdots (x - \lambda_k)$, 其中 λ_i 互不相同

$\iff V = \mathcal{E}_{\lambda_1} \oplus \cdots \oplus \mathcal{E}_{\lambda_k}$

$\iff \tau$ 的特征向量构成 V 的一组基

\iff 几何重数 (特征子空间的维数) = 代数重数 (特征多项式的根的重数)

$\iff \tau = \lambda_1 \rho_1 + \cdots + \lambda_k \rho_k$, 其中 λ_i 互不相同, $\rho_1 + \cdots + \rho_k = 1$ 为单位分解 (即 ρ_i 为投影, $\sum_i \rho_i = 1$ 且 $\rho_i \rho_j = \rho_j \rho_i = \delta_{ij} \rho_i$).

再来回顾一下向量正交: 向量 u 与 v 正交 $\iff \langle u, v \rangle = 0$.

非零元构成的正交集线性无关.

若 $\dim V < \infty$, 则 V 有正交归一基.

那么, τ 是否可正交对角化? 哪一类 τ 可正交对角化?

定义 10.1 正交(/么正)对角化: $\tau \in \mathcal{L}(V)$, 若 \exists 一组正交归一基 \mathcal{O} , s.t. $[\tau]_{\mathcal{O}}$ 为对角阵, 则称 τ 可正交(/么正)对角化.

定理 10.4: τ 可正交归一化 $\iff \tau$ 的特征向量构成 V 的正交基.

定义 10.2 正规算子: $\dim V < \infty, \tau \in \mathcal{L}(V)$, 若 $\tau^* \tau = \tau \tau^*$, 则称 τ 为正规算子.

定理 10.5 (课本第3 版定理10.8): 对正规算子 $\tau \in \mathcal{L}(V)$,
 τ^*, τ^{-1} (在 τ 可逆的前提下), $p(\tau)$ ($p(x) \in F[x]$) 正规.

(2) $\|\tau(v)\| = \|\tau^*(v)\|$, 从而 $\ker \tau = \ker \tau^*$.

(3) $\forall k \in \mathbb{Z}^+$, $\ker \tau^k = \ker \tau$.

(4) $m_\tau(x) = p_1(x) \cdots p_m(x)$, 其中 $p_i(x)$ 不可约且互不相同.

(5) $\tau(v) = \lambda v \implies \tau^*(v) = \bar{\lambda}v$.

(6) $\lambda_i \neq \lambda_j \implies \mathcal{E}_{\lambda_i} \perp \mathcal{E}_{\lambda_j}$.

证: (1) $(\tau^*)^* \tau^* = \tau^{**} \tau^* = \tau \tau^* = \tau^* \tau = \tau^* \tau^{**} = \tau^* (\tau^*)^* \implies \tau^*$ 正规.

$(\tau^{-1})^* \tau^{-1} = (\tau^*)^{-1} \tau^{-1} = (\tau \tau^*)^{-1} = (\tau^* \tau)^{-1} = \tau^{-1} (\tau^*)^{-1} = \tau^{-1} (\tau^{-1})^* \implies \tau^{-1}$ 正规.

$(\tau^i)^* \tau^i = (\tau^*)^i \tau^i = (\because \tau \text{ 正规, 即 } \tau \text{ 与 } \tau^* \text{ 可交换}) \tau^i (\tau^*)^i = \tau^i (\tau^i)^* \implies \tau^i$ 正规

$\implies (r\tau^i)^* (r\tau^i) = \bar{r}(\tau^i)^* r \tau^i = r \tau^i \bar{r} (\tau^i)^* = (r\tau^i) (r\tau^i)^* \implies r\tau^i$ 正规

$\implies p(\tau) p^*(\tau) = (\sum_i r_i \tau^i) (\sum_j \bar{r}_j \tau^j)^* = \sum_{ij} r_i \tau^i \bar{r}_j (\tau^j)^* = \sum_{ij} \bar{r}_j (\tau^j)^* r_i \tau^i = (\sum_j \bar{r}_j \tau^j)^* (\sum_i r_i \tau^i) = p^*(\tau) p(\tau) \implies p(\tau)$ 正规.

(2) $\|\tau(v)\|^2 = \langle \tau(v), \tau(v) \rangle = \langle v, \tau^*(\tau(v)) \rangle = \langle v, (\tau^* \circ \tau)(v) \rangle = \langle v, (\tau \circ \tau^*)(v) \rangle = \langle v, \tau(\tau^*(v)) \rangle = \langle \tau^*(v), \tau^*(v) \rangle = \|\tau^*(v)\|^2 \implies \|\tau(v)\|^2 = \|\tau^*(v)\|^2$,

故 $\ker \tau = \{v \mid \tau(v) = 0\} = \{v \mid \|\tau(v)\| = 0\} = \{v \mid \|\tau^*(v)\| = 0\} = \{v \mid \tau^*(v) = 0\} = \ker \tau^*$.

(3) $\ker \tau \subseteq \ker \tau^k$ 显然. 下面来证 $\ker \tau^k \subseteq \ker \tau$:

令 $\sigma = \tau^* \tau$, 则 $\sigma^* = (\tau^* \tau)^* = \tau^* \tau^{**} = \tau^* \tau = \sigma$.

$\forall v \in \ker \tau^k, \tau^k(v) = 0 \implies \sigma^k(v) = (\tau^* \tau)^k(v) = (\because \tau \text{ 正规, 即 } \tau \text{ 与 } \tau^* \text{ 可交换}) (\tau^*)^k \tau^k(v) = 0$,

$0 = \langle 0, \sigma^{k-2}(v) \rangle = \langle \sigma^k(v), \sigma^{k-2}(v) \rangle = \langle \sigma \circ \sigma^{k-1}(v), \sigma^{k-2}(v) \rangle = \langle \sigma^{k-1}(v), \sigma^* \circ \sigma^{k-2}(v) \rangle = (\because \sigma^* = \sigma) \langle \sigma^{k-1}(v), \sigma \circ \sigma^{k-2}(v) \rangle = \langle \sigma^{k-1}(v), \sigma^{k-1}(v) \rangle = \|\sigma^{k-1}(v)\|^2 \implies \sigma^{k-1}(v) = 0$, 以此类推得 $\sigma(v) = 0$

$\implies 0 = \langle v, 0 \rangle = \langle v, \sigma(v) \rangle = \langle v, \tau^*(\tau(v)) \rangle = \langle \tau(v), \tau(v) \rangle = \|\tau(v)\|^2 \implies \tau(v) = 0 \implies v \in \ker \tau \implies \ker \tau^k \subseteq \ker \tau$.

综上, 得证.

(4) $m_\tau(x) = up_1^{e_1}(x) \cdots p_m^{e_m}(x)$, 其中 p_i 不可约且互不相同, $e_i \in \mathbb{Z}^+$.

要证 $m_\tau(x) = p_1(x) \cdots p_m(x)$, 即证 $e_i = 1 \forall i$.

$\forall v \in V, m_\tau(\tau)(v) = p_1^{e_1}(\tau) \cdots p_m^{e_m}(\tau)(v) = p_1^{e_1}(\tau)[p_2^{e_2}(\tau) \cdots p_m^{e_m}(\tau)(v)] = 0$.

$\because \tau$ 正规, $\therefore p_1(\tau)$ 正规 $\implies \ker p_1(\tau) = \ker p_1^{e_1}(\tau)$

$\implies p_1(\tau)[p_2^{e_2}(\tau) \cdots p_m^{e_m}(\tau)(v)] = 0 \implies p_1(x)p_2^{e_2}(x) \cdots p_m^{e_m}(x) \in \langle m_\tau(x) \rangle \implies m_\tau(x) = p_1^{e_1}(x)p_2^{e_2}(x) \cdots p_m^{e_m}(x) \mid p_1^1(x)p_2^{e_2}(x) \cdots p_m^{e_m}(x) \implies e_1 = 1$.

$\because p_i(\tau)$ 正规, 即 $p_i(\tau)$ 可交换, \therefore 同理可得 $e_i = 1 \forall i$, 故得证.

(5) $\tau(v) = \lambda v \implies (\tau - \lambda)(v) = 0 \implies v \in \ker(\tau - \lambda)$,

$\because \tau$ 正规, $\therefore \tau - \lambda$ 正规 $\implies \ker(\tau - \lambda) = \ker(\tau - \lambda)^*$

$\implies v \in \ker(\tau - \lambda)^* = \ker(\tau^* - \bar{\lambda})$.

(6) $\forall 0 \neq v \in \mathcal{E}_{\lambda_i}, \forall 0 \neq u \in \mathcal{E}_{\lambda_j}$, 其中 $\lambda_i \neq \lambda_j, \lambda_i \langle v, u \rangle = \langle \lambda_i v, u \rangle = \langle \tau(v), u \rangle = \langle v, \tau^*(u) \rangle = \langle v, \bar{\lambda}_j u \rangle = \lambda_j \langle v, u \rangle \implies (\lambda_i - \lambda_j) \langle v, u \rangle = 0$.

$\because \lambda_i - \lambda_j \neq 0, \therefore \langle v, u \rangle = 0$.

□

定理 10.6 正规算子的谱的结构: 复情形(课本定理10.13): $F = \mathbb{C}$, $\dim V < \infty$, $\tau \in \mathcal{L}(V)$, 则下列叙述等价:

- (1) τ 正规.
- (2) τ 可正交对角化, $V = \mathcal{E}_{\lambda_1} \odot \cdots \odot \mathcal{E}_{\lambda_k}$.
- (3) $\tau = \lambda_1 \rho_1 + \cdots + \lambda_k \rho_k$, 其中 $\rho_1 + \cdots + \rho_k = 1$ 为单位分解, 对 $i \neq j$, $\text{Im } \rho_i \perp \text{Im } \rho_j$, $\text{Im } \rho_i \perp \ker \rho_i$.

证: “(1) \implies (2)” : $\because \tau$ 正规, $\therefore \tau$ 的极小多项式的不可约多项式的次数均为 1, 即 $m_\tau(x) = p_1(x) \cdots p_k(x) = (x - \lambda_1) \cdots (x - \lambda_k)$, 其中 $p_i(x) \in \mathbb{C}[x]$ 为不可约多项式, λ_i 互不相等

$$\implies V = \mathcal{E}_{\lambda_1} \oplus \cdots \oplus \mathcal{E}_{\lambda_k}.$$

又 \because 对 $i \neq j$, $\mathcal{E}_{\lambda_i} \perp \mathcal{E}_{\lambda_j}$, $\therefore V = \mathcal{E}_{\lambda_1} \odot \cdots \odot \mathcal{E}_{\lambda_k}$.

“(2) \implies (1)” : $\because \tau$ 可正交对角化, $\therefore \exists$ 正交归一基 \mathcal{O} , s.t. $[\tau]_{\mathcal{O}} = \text{diag}(\lambda_1, \cdots, \lambda_k)$, $[\tau^*]_{\mathcal{O}} = \text{diag}(\overline{\lambda_1}, \cdots, \overline{\lambda_k})$
 $\implies [\tau]_{\mathcal{O}}[\tau^*]_{\mathcal{O}} = \text{diag}(|\lambda_1|^2, \cdots, |\lambda_k|^2) = [\tau^*]_{\mathcal{O}}[\tau]_{\mathcal{O}} \implies [\tau^* \tau(v)]_{\mathcal{O}} = [\tau^*]_{\mathcal{O}}[\tau]_{\mathcal{O}}[v]_{\mathcal{O}} = [\tau]_{\mathcal{O}}[\tau^*]_{\mathcal{O}}[v]_{\mathcal{O}} = [\tau \tau^*(v)]_{\mathcal{O}} \implies \tau \tau^* = \tau^* \tau$.

“(3) \iff (1)” : 利用引理 10.2, $\ker \rho^* = (\text{Im } \rho)^\perp = \ker \rho$, $\text{Im } \rho^* = (\ker \rho)^\perp = \text{Im } \rho \implies \rho^* = \rho$
 $\implies \tau^* = \overline{\lambda_1} \rho_1 + \cdots + \overline{\lambda_k} \rho_k$.
 $\tau \tau^* = (\sum_i \lambda_i \rho_i) \left(\sum_j \overline{\lambda_j} \rho_j \right) = \sum_{ij} \lambda_i \overline{\lambda_j} \rho_i \rho_j = \sum_{ij} \lambda_i \overline{\lambda_j} \delta_{ij} \rho_i = \sum_i |\lambda_i|^2 \rho_i = \sum_{ij} \overline{\lambda_j} \lambda_i \rho_j \rho_i = \left(\sum_j \overline{\lambda_j} \rho_j \right) \left(\sum_i \lambda_i \rho_i \right) = \tau^* \tau \implies \tau$ 正规.

综上, 得证. □

引理 10.2: $V = S \odot T$, 正交投影 $\rho_{ST} : V \rightarrow V$, $u = u_S + u_T \rightarrow u_S$, 则 $\ker \rho \perp \text{Im } \rho$.

证: $\forall v \in \ker \rho_{ST}$, $v = v_S + v_T$ 其中 $v_S \in S$, $v_T \in T$, $\rho_{ST}(v) = v_S = 0 \implies v = v_T \in T$.

$\forall w_S \in \text{Im } \rho_{ST}$, $\exists w \in V$, s.t. $\rho_{ST}(w) = w_S \implies w = w_S + w_T$, 其中 $w_S \in S$, $w_T \in T$.

$\therefore v \in T$, $w_S \in S$, $\therefore v \perp w \implies \ker \rho \perp \text{Im } \rho$. □

由于 $\mathbb{R}[x]$ 中不可约多项式的最高次数为 2, 故实数域上的向量空间的线性算子的最小多项式的分解形式与复情形有所不同.

定理 10.7 正规算子的谱的结构: 实情形(课本定理10.14): $F = \mathbb{R}$, $\dim V < \infty$, $\tau \in \mathcal{L}(V)$ 正规 $\iff V = \mathcal{E}_{\lambda_1} \odot \cdots \odot \mathcal{E}_{\lambda_k} \odot D_1 \odot \cdots \odot D_l$, 其中 \mathcal{E}_{λ_i} 为 τ 的不变子特征空间, λ_i 为 τ 的谱, D_i 为 τ_i 的二维不可约不变子空间且 D_i 中有基 \mathcal{B}'_i , s.t. $[\tau]_{\mathcal{B}'_i} = \begin{pmatrix} s_i & t_i \\ -t_i & s_i \end{pmatrix}$,

$$[\tau]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \lambda_k & & \\ & & & \begin{pmatrix} s_1 & t_1 \\ -t_1 & s_1 \end{pmatrix} & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & \begin{pmatrix} s_l & t_l \\ -t_l & s_l \end{pmatrix} \end{pmatrix}_{n \times n}.$$

证: τ 的极小多项式 $m_\tau(x) = (x - \lambda_1) \cdots (x - \lambda_t) q_1(x) \cdots q_l(x)$, 其中 $q_j(x)$ 不可约, $\deg q_j(x) = 2$, $\lambda_i \in \mathbb{R}$ 互不相同, $V = \mathcal{E}_{\lambda_1} \oplus \cdots \oplus \mathcal{E}_{\lambda_t} \oplus D_1 \oplus \cdots \oplus D_l$, 其中 $V_{p_i} = \{v \mid (\tau - \lambda_i)v = 0\}$, $\dim V_{p_i} = 1$, $\text{ann}(D_i) = \langle q_i(x) \rangle$, $\deg q_i(x) = 2$, 无妨 $q_i(x) = x^2 + b_i x + c_i$, $\therefore q_i$ 不可约, $\therefore \Delta = b_i^2 - 4c_i < 0$.

取 D_i 的基 $\mathcal{B}_i \equiv \{v_i, \tau(v_i)\}$, 则 $[\tau]_{\mathcal{B}_i} = \begin{pmatrix} 0 & -c_i \\ 1 & -b_i \end{pmatrix}$.

为使 τ 在 D_i 中的表示更对称, 对 $[\tau]_{\mathcal{B}_i}$ 做相似变换到基 \mathcal{B}'_i 上, s.t. $[\tau]_{\mathcal{B}'_i} = \begin{pmatrix} s_i & t_i \\ -t_i & s_i \end{pmatrix}$, 其中 $s_i = -\frac{b_i}{2}$, $t_i = \frac{\sqrt{4c_i - b_i^2}}{2}$.

问题 10.1: 如何相似变换? $\mathcal{B}'_i = ?$ □

解: $\because [\tau]_{\mathcal{B}_i}$ 和 $[\tau]_{\mathcal{B}'_i}$ 的特征多项式相同, 均为 $q_i(x)$, 特征值相同, 均为 $q_i(x)$ 的根 $x_i^\pm = \frac{-b_i \pm i\sqrt{4c_i - b_i^2}}{2}$, \therefore 这一相似变换和 \mathcal{B}'_i 必 \exists .

$[\tau]_{\mathcal{B}_i}$ 的特征向量为 $\frac{1}{\sqrt{s_i^2 + t_i^2 + 1}} \begin{pmatrix} -x_i^- \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{s_i^2 + t_i^2 + 1}} (-x_i^- v_i + \tau(v_i))$, $\frac{1}{\sqrt{s_i^2 + t_i^2 + 1}} \begin{pmatrix} -x_i^+ \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{s_i^2 + t_i^2 + 1}} (-x_i^+ v_i + \tau(v_i))$,

即 $[\tau]_{\mathcal{B}_i}$ 的特征分解为 $[\tau]_{\mathcal{B}_i} = Q \Lambda Q^{-1}$, 其中 $Q = \frac{1}{\sqrt{s_i^2 + t_i^2 + 1}} \begin{pmatrix} -x_i^- & -x_i^+ \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$, $\Lambda = \begin{pmatrix} x_i^+ & 0 \\ 0 & x_i^- \end{pmatrix}$.

$[\tau]_{\mathcal{B}'_i}$ 的特征向量为 $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$, $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$, 即 $[\tau]_{\mathcal{B}'_i}$ 的特征分解为 $[\tau]_{\mathcal{B}'_i} = P \Lambda P^{-1}$, 其中 $P = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ i & -i \end{pmatrix}$.

相似变换下, $[\tau]_{\mathcal{B}'_i} = T [\tau]_{\mathcal{B}_i} T^{-1}$, 故其中 $T = P Q^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ i & -i \end{pmatrix} \frac{\sqrt{s_i^2 + t_i^2 + 1}}{x_i^+ - x_i^-} \begin{pmatrix} 1 & x_i^+ \\ -1 & -x_i^- \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{s_i^2 + t_i^2 + 1}}{\sqrt{2}(x_i^+ - x_i^-)} \begin{pmatrix} 0 & x_i^+ - x_i^- \\ 2i & -ib_i \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{c_i + 1}}{\sqrt{2}\sqrt{4c_i - b_i^2}} \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{4c_i - b_i^2} \\ 2 & -b_i \end{pmatrix}$, $T^{-1} = Q P^{-1} = \frac{1}{\sqrt{s_i^2 + t_i^2 + 1}} \begin{pmatrix} -x_i^- & -x_i^+ \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ 1 & i \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}(s_i^2 + t_i^2 + 1)} \begin{pmatrix} -(x_i^+ + x_i^-) & -i(x_i^+ - x_i^-) \\ 2 & 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}(c_i + 1)} \begin{pmatrix} b_i & \sqrt{4c_i - b_i^2} \\ 2 & 0 \end{pmatrix}$.

当然, 也可调整 T 前的系数从而得 $T = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{2}{\sqrt{4c_i - b_i^2}} & -\frac{b_i}{\sqrt{4c_i - b_i^2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{t_i} & \frac{s_i}{t_i} \end{pmatrix}$, $T^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{b_i}{2} & \frac{\sqrt{4c_i - b_i^2}}{2} \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -s_i & t_i \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$.

$[\tau]_{\mathcal{B}'_i} = M_{\mathcal{B}_i \mathcal{B}'_i} [\tau]_{\mathcal{B}} M_{\mathcal{B}' \mathcal{B}}$, 其中 $M_{\mathcal{B}_i \mathcal{B}'_i} = \begin{pmatrix} [v_i]_{\mathcal{B}'_i} & [\tau(v_i)]_{\mathcal{B}'_i} \end{pmatrix} = T$, $M_{\mathcal{B}' \mathcal{B}_i} = \begin{pmatrix} [b'_1]_{\mathcal{B}_i} & [b'_2]_{\mathcal{B}_i} \end{pmatrix} = T^{-1} \implies \mathcal{B}'_i = \{b'_1 = -s_i v + \tau(v_i), b'_2 = t_i v_i\}$.

$$\begin{array}{ccc}
 F^n & \xrightarrow{\tau'_A} & F^n \\
 \uparrow \phi'_B & & \uparrow \phi'_B \\
 V & \xrightarrow{\tau} & V \\
 \downarrow \phi_B & & \downarrow \phi_B \\
 F^n & \xrightarrow{\tau_A} & F^n
 \end{array}$$

□

□

对 $F = \mathbb{Q}$, 由于 $\mathbb{Q}[x]$ 中的不可约多项式无次数限制, 线性算子的极小多项式可分解成任意次数不可约多项式的乘积, 此时子空间没有确定的维数, 故此时没有普适的定理.

10.3 特殊的正规算子

定义 10.3 自伴随(/厄米)算子: 满足 $\tau = \tau^*$.

定义 10.4 斜伴随(/反厄米)算子: 满足 $\tau = -\tau^*$.

定义 10.5 酉(/么正)算子: 满足 $\tau^* = \tau^{-1}$.

定理 10.8 厄米算子的性质(课本第3版定理10.11): $\dim V < \infty$, $\tau, \sigma \in \mathcal{L}(V)$, 则

- (1) 若 τ, σ 厄米, 则 $\tau + \sigma$, τ^{-1} , $p(\tau)$ ($p(x) \in \mathbb{R}[x]$) 厄米.
- (2) $F = \mathbb{C}$, 则 τ 厄米 $\iff \langle \tau(v), v \rangle \in \mathbb{R}$.
- (3) τ 为复算子或实对称算子, 则 $\tau = 0 \iff \forall v \in V, \langle \tau(v), v \rangle = 0$.
- (4) τ 厄米, 则 $m_\tau(x)$ 仅有实根.

证: (1) $(\tau + \sigma)^* = \tau^* + \sigma^* = \tau + \sigma \implies \tau + \sigma$ 厄米.

$(\tau^{-1})^* = (\tau^*)^{-1} = \tau^{-1} \implies \tau^{-1}$ 厄米.

$p^*(\tau) = (\sum_i r_i \tau^i)^* = \sum_i r_i (\tau^i)^* = \sum_i r_i (\tau^*)^i = \sum_i r_i \tau^i = p(\tau) \implies p(\tau)$ 厄米.

(2) “ \iff ”: τ 厄米, 即 $\tau^* = \tau \iff \forall v, \tau(v) = \tau^*(v) \iff \langle \tau(v), v \rangle = \langle v, \tau^*(v) \rangle = \langle v, \tau(v) \rangle = \overline{\langle \tau(v), v \rangle} \implies \langle \tau(v), v \rangle \in \mathbb{R}$.

(3) “ \implies ”: 显然. 复算子的 “ \iff ” 见定理 9.1, 下证实对称算子的 “ \iff ”.

实对称算子即实厄米算子. $\because F = \mathbb{R}, \therefore \langle u, v \rangle = \langle v, u \rangle$.

$\forall u, v \in V, 0 = \langle \tau(u+v), u+v \rangle = \langle \tau(u), u \rangle + \langle \tau(u), v \rangle + \langle \tau(v), u \rangle + \langle \tau(v), v \rangle = \langle \tau(u), v \rangle + \langle \tau(v), u \rangle = \langle u, \tau^*(v) \rangle + \langle \tau(v), u \rangle = \langle u, \tau(v) \rangle + \langle \tau(v), u \rangle = 2\langle \tau(v), u \rangle \implies \tau(v) = 0 \implies \tau = 0$.

综上, 得证.

(4) $\because \tau$ 厄米, $\therefore \tau$ 正规.

设 λ 为 τ 的特征值, 亦即 $m_\tau(x)$ 的根, 则 $\bar{\lambda}$ 为 τ^* 的特征值.

$\lambda v = \tau(v) = \tau^*(v) = \bar{\lambda}v \implies \lambda = \bar{\lambda} \implies \lambda \in \mathbb{R}$, 故 $m_\tau(x)$ 仅有实根.

□

定理 10.9 酉算子的性质(课本第3 版定理10.12): $\dim V < \infty$, $\sigma, \tau \in \mathcal{L}(V)$, 则

(1) σ, τ 酉 $\implies r\tau$ ($|r| = 1$), $\sigma \circ \tau$, τ^{-1} 酉.

(2) τ 酉 $\iff \tau$ 等距同构.

(3) τ 酉 $\iff \tau$ 将一组正交归一基变换为正交归一基.

(4) τ 酉, 则 τ 的特征值模长 = 1.

证: (1) $(r\tau)^*(r\tau) = \bar{r}\tau^*r\tau = \bar{r}r\tau^*\tau = |r|^2\tau^{-1}\tau = 1 \implies r\tau$ 酉.

$(\sigma \circ \tau)^*(\sigma \circ \tau) = \tau^*\sigma^*\sigma\tau = \tau^{-1}\sigma^{-1}\sigma\tau = 1 \implies \sigma \circ \tau$ 酉.

$(\tau^{-1})^* = (\tau^*)^{-1} = (\tau^{-1})^{-1} \implies \tau^{-1}$ 酉.

(2) “ \implies ”: \because 酉算子有逆, \therefore 必双射, 下证等距.

$\langle \tau(u), \tau(v) \rangle = \langle u, \tau^*(\tau(v)) \rangle = \langle u, \tau^{-1}(\tau(v)) \rangle = \langle u, v \rangle \implies \tau$ 等距, 故 τ 等距同构.

“ \impliedby ”: $\because \tau$ 等距同构, $\therefore \langle u, \tau^*(\tau(v)) \rangle = \langle \tau(u), \tau(v) \rangle = \langle u, v \rangle \implies \tau^*(\tau(v)) = v \implies \tau^* \circ \tau = 1 \implies \tau$ 酉.

综上, 得证.

(3) “ \implies ”: 取一组正交归一基 $\mathcal{O} = \{o_1, \dots, o_n\}$, $\langle o_i, o_j \rangle = \delta_{ij}$.

$\because \langle \tau(o_i), \tau(o_j) \rangle = \delta_{ij}$ 且 $\dim \tau(\mathcal{O}) = \dim \mathcal{O}$, $\therefore \tau(\mathcal{O})$ 为一组正交归一基.

“ \impliedby ”: $\forall u, v \in V$, $u = \sum_{i=1}^n \alpha_i o_i$, $v = \sum_{j=1}^n \beta_j o_j$.

$\because \tau(\mathcal{O})$ 为正交归一基, $\therefore \langle \tau(u), \tau(v) \rangle = \langle \tau(\sum_{i=1}^n \alpha_i o_i), \tau(\sum_{j=1}^n \beta_j o_j) \rangle = \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \bar{\beta}_j \langle \tau(o_i), \tau(o_j) \rangle = \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \bar{\beta}_j \delta_{ij} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \bar{\beta}_i = \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \bar{\beta}_j \langle o_i, o_j \rangle = \langle \sum_{i=1}^n \alpha_i o_i, \sum_{j=1}^n \beta_j o_j \rangle = \langle u, v \rangle \implies \tau$ 等距同构 $\implies \tau$ 酉.

综上, 得证.

(4) 设 λ 为 τ 的特征值, $\tau(v) = \lambda v$, $\tau^*(v) = \bar{\lambda}v$.

$v = \tau^{-1}(\tau(v)) = \tau^*(\tau(v)) = \bar{\lambda}\lambda v = |\lambda|^2 v \implies |\lambda| = 1$.

□

定理 10.10 正规算子的结构(课本第3 版定理10.18): (1) $F = \mathbb{C}$,

(a) τ 正规 $\iff \tau$ 正交归一对角化 $\iff \tau$ 有正交谱分解 $\tau = \lambda_1 \rho_1 + \dots + \lambda_k \rho_k$, 其中 λ_i 互不相等, $\rho_1 + \dots + \rho_k = 1$ 为单位分解, 对 $i \neq j$, $\text{Im } \rho_i \perp \text{Im } \rho_j$, $\text{Im } \rho_i \perp \ker \rho_i$.

(b) 特征值为实数的正规算子厄米.

(c) 特征值的模长 = 1 的正规算子酉.

(2) $F = \mathbb{R}$,

(a) τ 正规 $\iff \tau = \mathcal{E}_{\lambda_1} \odot \dots \odot \mathcal{E}_{\lambda_k} \odot D_1 \odot \dots \odot D_l$, 其中 D_i 为二维不可约的 τ 不变子空间, D_i 上 τ 的

矩阵表示为 $\begin{pmatrix} s_i & t_i \\ -t_i & s_i \end{pmatrix}$.

(b) 若上述正交直和式中无 D_i , 则 τ 厄米.

(c) 若在 D_i 上的 τ 的矩阵表示为 $\begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$, 则 τ 酉, 称为 **正交算子**.

定义 10.6 正交算子: $F = \mathbb{R}$ 的酉算子.

10.4 (半)正定算子

定义 10.7 (半)正定算子: $F = \mathbb{R}$, $\dim V < \infty$, $\tau \in \mathcal{L}(V)$ 厄米, 若 $\forall v \in V$, $\langle \tau(v), v \rangle > (\geq) 0$, 则 τ (半)正定.

定理 10.11 (课本第3版定理10.22): $F = \mathbb{R}$, $\dim V < \infty$, $\tau \in \mathcal{L}(V)$ 厄米, 则

(1) τ 半正定 $\iff \tau$ 的特征值 ≥ 0 .

(2) τ 正定 $\iff \tau$ 的特征值 > 0 .

证: “ \implies ”: 设 λ 为 τ 的特征值.

$\because \tau$ (半)正定, $\therefore \langle \tau(v), v \rangle > (\geq) 0$.

又 $\because \langle \tau(v), v \rangle = \langle \lambda v, v \rangle = \lambda \langle v, v \rangle \geq 0$, $\langle v, v \rangle > 0$, $\therefore \lambda > (\geq) 0$, $\therefore \lambda > (\geq) 0$.

“ \impliedby ”: $\because \rho$ 厄米, $\therefore \tau$ 的正交谱分解 $\tau = \lambda_1 \rho_1 + \cdots + \lambda_k \rho_k$.

对 τ 的函数操作均等效于作用于其谱分解的特征值上: $\tau^2 = \sum_{ij} \lambda_i \lambda_j \rho_i \rho_j = \sum_{ij} \lambda_i \lambda_j \delta_{ij} \rho_i = \sum_i \lambda_i^2 \rho_i$.

类似地, $\tau^k = \sum_i \lambda_i^k \rho_i$.

$r \tau^k = r \sum_i \lambda_i^k \rho_i = \sum_i r \lambda_i^k \rho_i \implies$ 对 $f(x) \in F[x]$, $f(\tau) = \sum_i f(\lambda_i) \rho_i$,

\forall 可由多项式近似的 $g(x)$, $g(\tau) = \sum_i g(\lambda_i) \rho_i$.

$\because \tau$ (半)正定, \therefore 必可定义其平方根 $\sqrt{\tau} = \sqrt{\lambda_1} \rho_1 + \cdots + \sqrt{\lambda_k} \rho_k$, 此处 $\lambda_i > (\geq) 0$, 否则 $\sqrt{\tau}$ 不一定合法. □

定理 10.12 (课本第3版定理10.23): τ 厄米, 则

(1) τ 半正定 $\iff \tau$ 有平方根.

(2) τ 半正定 $\iff \tau = \sigma^* \circ \sigma$, 其中 $\sigma \in \mathcal{L}(V)$ (注意这里的 σ 不唯一).

证: (1) τ 半正定, 即 $\tau = \sum_i \lambda_i \rho_i$, 其中 $\lambda_i \geq 0 \iff \sqrt{\tau} = \sum_i r_i \rho_i$, 其中 $r_i = \sqrt{\lambda_i}$.

(2) “ \implies ”: 取 $\sigma = \sqrt{\tau}$ 即得证.

“ \impliedby ”: $\langle \tau(v), v \rangle = \langle \sigma^* \circ \sigma(v), v \rangle = \langle \sigma(v), \sigma(v) \rangle = \|\sigma(v)\|^2 \geq 0 \implies \tau$ 半正定. □

定理 10.13 半正定算子的复合半正定的条件(课本第3 版定理10.24): $\sigma, \tau \in \mathcal{L}(V)$ 半正定, 若 $\sigma \circ \tau = \tau \circ \sigma$, 则 $\sigma \circ \tau$ 半正定.

证: $\because \sigma\tau = \tau\sigma, \therefore \sqrt{\sigma}\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau}\sqrt{\sigma} \implies \sigma\tau = \sqrt{\sigma}\sqrt{\sigma}\sqrt{\tau}\sqrt{\tau} = (\sqrt{\sigma}\sqrt{\tau})(\sqrt{\sigma}\sqrt{\tau}),$ 故 $\sigma\tau$ 半正定. \square

10.5 算子的极分解

定理 10.14 算子的极分解(课本第3 版定理10.25): $F = \mathbb{C}$, 有限维内积向量空间 $V, \tau \in \mathcal{L}(V)$, 则 $\exists!$ 半正定算子 ρ 及酉算子 ν , s.t. $\tau = \nu \circ \rho$, 且若 τ 可逆, 则 ν 唯一.

证: 取 $\rho = \sqrt{\tau^* \tau}$, 则 $\|\rho(v)\|^2 = \langle \rho(v), \rho(v) \rangle = \langle v, \rho^* \rho(v) \rangle = \langle v, \rho^2(v) \rangle = \langle v, \tau^* \tau(v) \rangle = \langle \tau(v), \tau(v) \rangle = \|\tau(v)\|^2$.

取 $\nu: \text{Im } \rho \rightarrow \text{Im } \tau, \rho(v) \mapsto \tau(v)$.

先证 ν 为映射: 若 $\rho(v) = \rho(u)$, 则 $\rho(u-v) = 0 \implies \|\rho(u-v)\|^2 = 0 \implies \|\tau(u-v)\|^2 = \langle \tau(u-v), \tau(u-v) \rangle = 0 \implies \tau(u-v) = 0 \implies \tau(v) = \tau(u)$, 故 ν 为映射.

$\because \|\nu(\rho(v))\| = \|\tau(v)\| = \|\rho(v)\|, \therefore \nu$ 等距同构 $\implies \nu$ 酉.

当 τ 不可逆时, 拓展 $\text{Im } \rho$ 为 $\text{Im } \tau$ 的方式不唯一, 故 ν 不唯一. \square

若 σ 酉, 则其特征值模 $|\lambda| = 1$, 可记为 $\lambda_i = e^{i\theta_i}$, 其中 $\theta_i \in \mathbb{R}$,

则 $\sigma = \lambda_1 \rho_1 + \cdots + \lambda_k \rho_k = e^{i\theta_1} \rho_1 + \cdots + e^{i\theta_k} \rho_k$, 其中 $\rho_1 + \cdots + \rho_k = 1$ 为正交单位分解.

令 $H = \theta_1 \rho_1 + \cdots + \theta_k \rho_k$, 则

$$(1) H^* = H.$$

$$(2) \sigma = e^{iH}.$$

此处 H 类似量子力学中的哈密顿量, σ 类似演化算子.

Chapter 12

度量空间

定义 12.1 度量和度量空间: 对集合 M , 映射 $d(\cdot, \cdot) : M \times M \rightarrow \mathbb{R}$, 若满足

正定: $d(u, v) \geq 0$, 且 $d(u, v) = 0 \iff u = v$,

(2) 对称: $d(u, v) = d(v, u)$,

(3) 三角不等式: $d(u, v) \leq d(u, w) + d(w, v)$,

则称 d 为 M 上的一个度量, 称 (M, d) 为度量空间.

对任一集合均可定义度量, 如 $d(u, v) = \begin{cases} 1, & u \neq v, \\ 0, & u = v, \end{cases}$ 且度量不唯一.

定义 12.2 子度量空间: 度量空间的非空子集.

12.1 开集和闭集

对度量空间 (M, d) , $x_0 \in M$, $r > 0$, 可定义:

定义 12.3 开球: $B(x_0, r) \equiv \{y \in M \mid d(y, x_0) < r\}$.

定义 12.4 闭球: $\bar{B}(x_0, r) \equiv \{y \in M \mid d(y, x_0) \leq r\}$.

定义 12.5 球面: $S(x_0, r) \equiv \{y \in M \mid d(y, x_0) = r\}$.

定义 12.6 开集: $S \subseteq M$, $\forall x_0 \in S$, $\exists r > 0$, s.t. $B(x_0, r) \subseteq S$, 则称 S 为开集.

定义 12.7 闭集: $T \subseteq M$, $T^c = M \setminus T$ 是开集, 则 T 为闭集.

定义 12.8 开邻域: 包含 x_0 的任何开集称 x_0 的开邻域.

开球为开集, 闭球为闭集.

证: \forall 开球 $B(x_0, r_0) = \{y \in M \mid d(y, x_0) < r_0\}$, $\forall x \in B(x_0, r_0)$, $\exists r = \frac{1}{2}(r_0 - d(x, x_0)) > 0$, s.t. $B(x, r) \subseteq B(x_0, r_0) \implies$ 开球 $B(x_0, r_0)$.

\forall 闭球 $\bar{B}(x_0, r_0) = \{y \in M \mid d(y, x_0) \leq r_0\}$, $\forall x \in (\bar{B}(x_0, r_0))^c = \{y \in M \mid d(y, x_0) > r_0\}$, $\exists r = \frac{1}{2}(d(x, x_0) - r_0) > 0$, s.t. $B(x, r) \subseteq (\bar{B}(x_0, r_0))^c \implies (\bar{B}(x_0, r_0))^c$ 为开集, 即 $\bar{B}(x_0, r_0)$ 为闭集. \square

例 12.1: 设 \mathbb{R} 上的度量 $d(r, t) = |r - t|$. 对点 x_0 ,

$$B(x_0, r) = \{y \in \mathbb{R} \mid |y - x_0| < r\} = (x_0 - r, x_0 + r),$$

$$\bar{B}(x_0, r) = [x_0 - r, x_0 + r],$$

$$S(x_0, r) = \{x_0 - r, x_0 + r\}.$$

开区间 (a, b) 为开集.

证: $\forall x \in (a, b)$, 取 $r = \frac{1}{2} \min\{|x - a|, |x - b|\} > 0$, $B(x, r) = (x - r, x + r) \subseteq (a, b)$, 故得证. \square

闭区间 $[a, b]$ 为闭集.

$(a, b]$ 既非开集也非闭集. \square

定理 12.1 (课本定理12.1): $\mathcal{O} = \{M \text{ 上的开集}\}$, 则

- (1) $\emptyset, M \in \mathcal{O}$.
- (2) 有限个开集的交仍为开集: $S, T \in \mathcal{O}$, 则 $S \cap T \in \mathcal{O}$.
- (3) $S_i \in \mathcal{O}$, 则 $\cup_{i \in K} S_i \in \mathcal{O}$ (S_i 可以是无限个).

证: (1) 显然.

(2) $x_0 \in S \cap T \iff x_0 \in S, x_0 \in T$.

$\because S$ 为开集, $\therefore \exists r_1 > 0$, s.t. $B(x_0, r_1) \subseteq S$;

$\because T$ 为开集, $\therefore \exists r_2 > 0$, s.t. $B(x_0, r_2) \subseteq T$.

令 $r = \min\{r_1, r_2\}$, 则 $B(x_0, r) \subseteq S$ 且 $B(x_0, r) \subseteq T \implies B(x_0, r) \subseteq S \cap T \implies S \cap T$ 开, 即 $S \cap T \in \mathcal{O}$.

(3) $x_0 \in \cup_i S_i \iff \exists i$, s.t. $x_0 \in S_i$.

$\because S_i$ 为开集, $\therefore \exists r > 0$, s.t. $B(x_0, r) \subseteq S_i \subseteq \cup_i S_i \implies \cup_i S_i$ 开, 即 $\cup_i S_i \in \mathcal{O}$. \square

例 12.2 无穷多个开集的交未必开: $S_i = (-\frac{1}{n}, \frac{1}{n})$.

$$\cap_i S_i = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \{0\} \text{ 闭.} \quad \square$$

单点集为闭集.

证: 单点集 $S = \{a\}$, 补集 $S^c = M \setminus \{a\}$.

$\forall x \in S^c$, 则 $x \neq a$, $d(x, a) > 0$.

取 $r = \frac{1}{2}d(x, a)$, 则 $a \notin B(x, r) \implies B(x, r) \subseteq S^c \implies S^c$ 开, 故 S 闭. \square

有限点集为闭集.

证: 有限点集 $S = \{a_1, \dots, a_n\}$, 补集 $S^c = M \setminus \{a_1, \dots, a_n\}$.

$\forall x \in S^c$, 则 $x \neq a_1, \dots, a_n \implies \forall i, d(x, a_i) > 0$.

取 $r = \frac{1}{2} \min_i \{d(x, a_i)\}$, 则 $\forall a_i, a_i \notin B(x, r) \implies S^c$ 开, 故 S 闭. □

定义 12.9 拓扑和拓扑空间: 集合 $X \neq \emptyset$, \mathcal{O} 是 X 的一些子集构成的簇^a, 若

$\emptyset, X \in \mathcal{O}$,

(1) $S, T \in \mathcal{O}$, 则 $S \cap T \in \mathcal{O}$,

(3) $\{S_i \in \mathcal{O} \mid i \in K\}$, 则 $\bigcup_{i \in K} S_i \in \mathcal{O}$,

则称 \mathcal{O} 为 X 上的一个拓扑, 称 (X, \mathcal{O}) 为拓扑空间, 称 \mathcal{O} 中的集合为 X 上的开集.

^a可理解为“集合的集合”, 此处为避免逻辑循环, 故名之

故确定开集 \iff 确定拓扑.

12.2 度量空间的收敛性

定义 12.10 收敛和极限: 集合 M 中序列 (x_n) , $x \in M$, 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} d(x_n, x) = 0$, 则称序列 (x_n) 收敛于 x , 记作 $x_n \rightarrow x$, 称 x 为序列 (x_n) 的极限.

例 12.3: (r_n) 为 \mathbb{R} 上的序列, $\lim_{n \rightarrow \infty} r_n = 0$, 即 $r_n \rightarrow 0$, 即 $\forall \epsilon > 0, \exists N > 0$, 当 $n > N$ 时, $d(r_n, 0) < \epsilon \iff r_n \in B(0, \epsilon)$. □

收敛的性质:

- (1) $\forall r > 0, B(x, r)$ 中包含 (x_n) 中无穷个元素.
- (2) 有限点列非序列, 无需考虑极限.
- (3) 常序列收敛, $(x_n = x_0) \rightarrow x_0$.
- (4) 对给定序列, 若 \exists 极限, 则极限唯一.

定理 12.2 (课本定理12.2): 闭集关于收敛封闭. S 闭 $\iff S$ 中序列 $(x_n) \rightarrow x \in M$, 则 $x \in S$.

证: “ \implies ”: 取 S 中序列 (x_n) 且 $(x_n) \rightarrow x \in M$.

假设 $x \notin S$, 则 $x \in S^c = M \setminus S$.

$\because S$ 闭, $\therefore S^c$ 开 $\implies \exists r > 0$, s.t. $B(x, r) \subseteq S^c$, 即 $B(x, r) \cap S = \emptyset$, 故 S 中序列 $(x_n) \notin B(x, r)$.

又 $\because x_n \rightarrow x$, $\therefore \exists N_r > 0$, s.t. 当 $n > N_r$ 时, $x_n \in B(x, r)$, 矛盾, 故假设错误, $x \in S$.

“ \Leftarrow ”: 假设 S 非闭, 则 S^c 非开 $\implies \exists x_0 \in S^c$, s.t. $\forall r > 0, B(x_0, r) \not\subseteq S^c$.

特别地, 令 $r = 1$, 则 $\exists x_1 \in B(x_0, 1)$, s.t. $x_1 \notin S^c$, 即 $x_1 \in S$,

\dots , 令 $r = \frac{1}{n}$, 则 $\exists x_n \in B(x_0, \frac{1}{n})$, s.t. $x_n \notin S^c$, 即 $x_n \in S$,

$\dots \implies x_n \rightarrow x_0$.

又 $\because (x_n) \in S$, \therefore 由题设, $x_0 \in S$, 矛盾, 故假设错误, S 闭.

综上, 得证. □

12.3 集合的闭包

定义 12.11 闭包: $S \subseteq M$, 称包含 S 的最小闭集或包含 S 的所有闭集的交为 S 的闭包, 记作 $\text{cl}(S)$.

给定 S , 必 \exists 其闭包.

定义 12.12 极限点(/聚点): $\emptyset \neq S \subseteq M, x \in M$, 若 $\forall r > 0, B(x, r) \cap S$ 包含异于 x 的点, 则称 x 为 S 的极限点或聚点, S 对应的极限点的集合记作 $l(S)$.

例 12.4: $(a, b) \subseteq \mathbb{R}$, 则 $l((a, b)) = [a, b]$.

$c \notin [a, b], S = (a, b) \cup \{c\}$, 则 $l(S) = [a, b]$. □

定理 12.3 (课本定理12.3): (1) $x \in l(S) \iff \exists$ 序列 $(x_n) \in S$, s.t. $x_n \neq x \forall n$ 且 $x_n \rightarrow x$.

(2) S 闭 $\iff l(S) \subseteq S$.

(3) $\text{cl}(S) = S \cup l(S)$.

证: (1) “ \implies ”: $\because x \in l(S), \therefore \exists x_n \neq x$, s.t. $x_n \in B(x, \frac{1}{n}) \cap S$
 $\implies d(x_n, x) < \frac{1}{n}$, 故 $\exists (x_n) \in S$, s.t. $\forall n, x_n \neq x, x_n \rightarrow x$.

“ \impliedby ”: 设 $(x_n) \rightarrow x$ 且 $x \neq x_n \in S$.

$\forall r > 0, \exists N$, s.t. 当 $n > N$ 时, $x_n \in B(x, r)$, 即 $\exists x_n \neq x$, s.t. $x_n \in B(x, r) \cap S$, 故 $x \in l(S)$.

综上, 得证.

(2) “ \implies ”: 设 $x \in l(S)$, 则由 (1) 得, $\exists (x_n) \in S$, s.t. $x_n \neq x \forall n$ 且 $x_n \rightarrow x$.

又 $\because S$ 闭, $\therefore x \in S \implies l(S) \subseteq S$.

“ \impliedby ”: $\forall S$ 中序列 $(x_n) \rightarrow x$, 若 $\exists n$, s.t. $x_n = x$, 则 $x = x_n \in S$,

或 $x_n \neq x \forall n$, 则由 (1) 得 $x \in l(S) \subseteq S$, 故 S 闭.

综上, 得证.

(3) 显然 $S \subseteq S \cup l(S) \equiv T$.

设 $x \in l(T)$, 则由 (1) 得, \exists 序列 $(x_n) \in T$, s.t. $x_n \neq x \forall n$ 且 $x_n \rightarrow x$.

假设 $x \notin S$ 且 $x \notin l(S)$, 则 $\because x \notin l(S), \therefore \exists r > 0, B(x, r) \cap S = \emptyset$.

但 $\because (x_n) \rightarrow x, \therefore \exists x_n \in B(x, r) \implies x_n \notin S$.

又 $\because x_n \in T \equiv S \cup l(S), \therefore x_n \in l(S)$.

取 x_n , s.t. $d(x_n, x) < r$, 则 $B(x_n, \frac{r-d(x_n, x)}{2}) \subseteq B(x, r)$,

且 $\because x_n \in l(S), \therefore \exists y \in S \cap B(x_n, \frac{r-d(x_n, x)}{2}) \subseteq S \cap B(x, r)$, 与 $B(x, r) \cap S = \emptyset$ 矛盾, 故假设错误, $x \in S$ 或 $x \in l(S)$, 即 $x \in T \equiv S \cup l(S) \implies T$ 闭.

又 $\because S \subseteq T, \therefore$ 由闭包定义, $\text{cl}(S) \subseteq T$.

另一方面, 由闭包定义, $S \in \text{cl}(S)$.

假设 $l(S) \not\subseteq \text{cl}(S)$, 即 $\exists x \in l(S)$ 且 $x \notin \text{cl}(S)$, 则 $\forall r > 0, B(x, r) \cap S \neq \emptyset$, 且 \exists 闭集 S' , s.t. $x \notin S'$ 即 $x \in (S')^c$.

$\because S'$ 闭 $\implies (S')^c$ 开, $\therefore \exists r > 0$, s.t. $B(x, r) \subseteq (S')^c$, 与 $B(x, r) \cap S \neq \emptyset$ 矛盾, 故假设错误, $l(S) \subseteq \text{cl}(S) \implies T \equiv S \cup l(S) \subseteq \text{cl}(S)$.

综上, 得证. □

12.4 稠密子集

定义 12.13 稠密子集: $S \subseteq M$, 若 $\text{cl}(S) = M$, 则称 S 为 M 的稠密子集.

若 S 为 M 的稠密子集, 则 $M = \text{cl}(S) = S \cup I(S)$, 这意味着 M 中任一点均可由 S 中的某一序列逼近.

例 12.5: $\mathbb{R} = \mathbb{Q} \cup \text{无理数}$. \forall 无理数 r , \exists 有理数序列 $(r_n) \rightarrow r$, $\therefore \mathbb{Q}$ 为 \mathbb{R} 的稠密子集.

同理, 无理数也为 \mathbb{R} 的稠密子集.

实际上, \mathbb{Q} 在 $[0, 1]$ 上的测度 $= 0$, 即无理数远多于有理数. □

12.5 连续

定义 12.14 连续和不连续: 度量空间 (M, d) 和 (M', d') , 映射 $f: M \rightarrow M'$, $x_0 \in M$, 若 $\forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0$, s.t. $f(B(x_0, \delta)) \subseteq B(f(x_0), \epsilon)$, 即 $d(x, x_0) < \delta \implies d'(f(x), f(x_0)) < \epsilon$, 则称 f 在 x_0 处连续, 若 $\exists \epsilon > 0, \forall \delta > 0, f(B(x_0, \delta)) \not\subseteq B(f(x_0), \epsilon)$, 则称 f 在 x_0 处不连续.

定理 12.4 连续的判定(课本定理12.4): $f: M \rightarrow M'$ 连续 \iff 若 M 中序列 (x_n) 收敛于 x , 则 $(f(x_n)) \rightarrow f(x)$ (即 f 保持收敛性不变).

证: “ \implies ”: $\because f$ 连续, $\therefore \forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0$, s.t. $f(B(x, \delta)) \subseteq B(f(x), \epsilon)$.

$\because (x_n) \rightarrow x, \therefore \forall \delta > 0, \exists N > 0$, 当 $n > N$ 时, $d(x_n, x) < \delta$

$\implies d(f(x_n), f(x)) < \epsilon$, 故 $(f(x_n)) \rightarrow f(x)$.

“ \impliedby ”: 假设 f 在 $x \in M$ 处不连续, 则 $\exists \epsilon > 0$, s.t. $\forall \delta > 0, f(B(x, \delta)) \not\subseteq B(f(x), \epsilon)$, 即 $\exists x' \in B(x, \delta)$, s.t. $f(x') \notin B(f(x), \epsilon)$.

特别地, 取 $\delta = 1, \exists x_1 \in B(x, 1)$, s.t. $f(x_1) \notin B(f(x), \epsilon)$,

\dots , 取 $\delta = \frac{1}{n}, \exists x_n \in B(x, \frac{1}{n})$, s.t. $f(x_n) \notin B(f(x), \epsilon)$,

\dots , 从而得到序列 $(x_n) \rightarrow x$, 但 $d(f(x_n), f(x)) > \epsilon$

$\implies f(x)$ 不收敛至 $f(x)$, 与题设矛盾, 故假设错误, f 在 x_0 处连续.

综上, 得证. □

定理 12.5 (课本定理12.5): 若 $(x_n) \rightarrow x, (y_n) \rightarrow y$, 则 $(d(x_n, y_n)) \rightarrow d(x, y)$.

证: $\forall \epsilon > 0, \because (x_n) \rightarrow x, \therefore \exists N_1 > 0$, s.t. 当 $n > N_1$ 时, $d(x_n, x) < \frac{\epsilon}{2}$,

$\because (y_n) \rightarrow y, \therefore \exists N_2 > 0$, s.t. 当 $n > N_2$ 时, $d(y_n, y) < \frac{\epsilon}{2}$

$\implies \exists N = \max\{N_1, N_2\}$, s.t. 当 $n > N$ 时, $|d(x_n, y_n) - d(x, y)| = |d(x_n, y_n) - d(x, y_n) + d(x, y_n) - d(x, y)| \leq |d(x_n, y_n) - d(x, y_n)| + |d(x, y_n) - d(x, y)| \leq d(x_n, x) + d(y_n, y) < \epsilon$, 故得证. □

推论: $(d(x_n, y)) \rightarrow d(x_0, y)$, 即 $d(\cdot, y): M \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto d(x, y)$ 为 M 到 \mathbb{R} 的连续映射.

同理, $d(\cdot, \cdot): M \times M \rightarrow \mathbb{R}, (x, y) \mapsto d(x, y)$ 亦为连续映射.

定义 12.15 柯西序列: (x_n) 为 M 中序列, 若 $\forall \epsilon > 0, \exists N > 0$, 当 $n, m > N$ 时, $d(x_n, x_m) < \epsilon$, 则称 (x_n) 为柯西序列.

定理 12.6: 收敛 \implies 柯西, 反之不真.

证: 设 $(x_n) \rightarrow x$, 则 $\forall \epsilon > 0, \exists N_1 > 0$, s.t. 当 $n > N_1$ 时, $d(x_n, x) < \frac{\epsilon}{2}$,

$\exists N_2 > 0$, s.t. 当 $m > N_2$ 时, $d(x_m, x) < \frac{\epsilon}{2}$

$\implies \exists N = \max\{N_1, N_2\}$, s.t. 当 $n, m > N$ 时, $d(x_n, x_m) \leq d(x_n, x) + d(x_m, x) < \epsilon$, 故 (x_n) 柯西. \square

例 12.6 不收敛的柯西序列(课本例12.12): $C[0, 1] \equiv \{[0, 1] \text{ 区间上的连续函数}\}$.

$f(x), g(x) \in C[0, 1]$, 度量 $d(f(x), g(x)) = \int_0^1 |f(x) - g(x)| dx$.

令 $f_n(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < \frac{1}{2}, \\ n(x - \frac{1}{2}), & \frac{1}{2} \leq x \leq \frac{1}{2} + \frac{1}{n}, \\ 1, & \frac{1}{2} + \frac{1}{n} < x \leq 1, \end{cases}$ 则 $(f_n(x)) \rightarrow \begin{cases} 0, & 0 \leq x < \frac{1}{2}, \\ 1, & \frac{1}{2} < x < 1 \end{cases}$ 不连续, 故 $(f_n(x))$ 柯西但在 $C[0, 1]$ 上不收敛 (极限在 $C[0, 1]$ 外). \square

12.6 完备

定义 12.16 完备: 称柯西序列均收敛的空间为完备的.

定义 12.17 完备子空间: S 为度量空间 M 的子集, 若 S 完备, 则称 S 为 M 的完备子空间.

定理 12.7 (课本定理12.6): 对度量空间 M ,
任一完备子集闭.

(2) 若 M 完备, $S \subseteq M$, 则 S 闭 $\iff S$ 完备.

证: (1) 取完备子集 $S \subseteq M$, 取 S 中任意序列 $(x_n) \rightarrow x \in M \implies (x_n)$ 柯西.

又 $\because S$ 为完备子集, $\therefore (x_n)$ 收敛, 设 $(x_n) \rightarrow y \in S$.

又 \because 极限唯一, $\therefore x = y \in S \implies S$ 闭.

(2) “ \Leftarrow ”: 已由 (1) 证.

“ \Rightarrow ”: \forall 柯西列 $(x_n) \in S, \because S \subseteq M, \therefore (x_n)$ 为 M 中的柯西列.

又 $\because M$ 完备, $\therefore (x_n)$ 收敛, 设 $(x_n) \rightarrow x$.

又 $\because S$ 闭, $\therefore x \in S$, 故 S 完备.

综上, 得证. \square

例 12.7: 在欧氏度量 $d(u, v) = \sqrt{\sum_i |u_i - v_i|^2}$ 下, $\mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{R}^n, \mathbb{C}^n$ 完备. \square

例 12.8 (课本例12.11): $C[a, b]$ 上度量 $d(f, g) = \sup_{x \in [a, b]} \{|f(x) - g(x)|\}$, $(C[a, b], d)$ 完备. \square

证: 在 $(C[a, b], d)$ 上, $d(f, g) = \sup\{|f(x) - g(x)|\} < \epsilon \iff |f(x) - g(x)| < \epsilon, \forall x \in [a, b]$.

设 (f_n) 柯西, 则 $\forall \epsilon > 0, \exists N > 0$, s.t. 当 $m, n > N$ 时, $d(f_n(x), f_m(x)) < \epsilon \iff |f_n(x) - f_m(x)| < \epsilon, \forall x \in [a, b]$,
即给定 $\forall x \in [a, b], (f_n(x))$ 为 \mathbb{R} 或 \mathbb{C} 上的柯西列.

又 $\because \mathbb{R}$ 和 \mathbb{C} 完备, $\therefore (f_n(x))$ 收敛.

设 $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} (f_n(x))$, 则取 $m \rightarrow \infty$ 得当 $n > N$ 时, $|f_n(x) - f(x)| < \epsilon, \forall x \in [a, b]$

$\implies (f_n) \rightarrow f$, 故 $C[a, b]$ 完备. \square

□

12.7 等距

定义 12.18 等距: (M, d) 和 (M', d') 为度量空间, 若映射 $f: M \rightarrow M'$ 满足 $d'(f(x), f(y)) = d(x, y)$, 则称 f 等距.

定理 12.8 等距的性质(课本定理12.7): $f: (M, d) \rightarrow (M', d')$ 等距, 则

- (1) f 单射.
- (2) f 连续.
- (3) 若 f 可逆, 则 f^{-1} 等距.

证: (1) (此处的 M 和 M' 仅为集合, 没有定义额外的运算, 故 0 (加法单位元) 不一定存在, 必须从定义证明单射.)

设 $f(x) = f(y)$, 则 $d(f(x), f(y)) = 0$.

又 $\because f$ 等距, $\therefore d(x, y) = d(f(x), f(y)) = 0 \implies x = y$, 故得证.

(2) $\forall M$ 的收敛序列 $(x_n) \rightarrow x$, $\forall \epsilon > 0$, $\exists N > 0$, s.t. 当 $n > N$ 时, $d(x_n, x) < \epsilon$.

$\because f$ 等距, $\therefore d(f(x_n), f(x)) = d(x_n, x) < \epsilon \implies (f(x_n)) \rightarrow f(x)$.

$\because f$ 保持收敛, $\therefore f$ 连续.

(3) 若 f 可逆, 则 $f^{-1}(f(x)) = x$.

$\because f$ 等距, $\therefore d(f(x), f(y)) = d(x, y) = d(f^{-1}(f(x)), f^{-1}(f(y))) \implies f^{-1}$ 等距.

□

12.8 度量空间的完备化

定理 12.9 完备化定理(课本定理12.8): 对度量空间 (M, d) , \exists 完备度量空间 (M', d') 及等距 $\tau: M \rightarrow M'$, s.t. $\tau(M)$ 在 M' 中稠密.

具体如何完备化?

取 $V = \{M \text{ 中所有柯西序列}\}$, 定义等价关系 $(x_n) \sim (y_n) \iff \lim_{n \rightarrow \infty} d(x_n, y_n) = 0$, 则等价类 $\frac{V}{\sim}$ 即 M' .

Chapter 13

希尔伯特空间

$F = \mathbb{C}(\mathbb{R})$, V 是 F 上的内积向量空间, 则可诱导出范数 $\|v\| = \sqrt{\langle v, v \rangle}$, 度量 $d(u, v) = \|u - v\| = \sqrt{\langle u - v, u - v \rangle}$, 故 (V, d) 为度量空间.

$v \in V, r > 0, B(v, r) = \{u \in V \mid d(u, v) < r\} = \{u \in V \mid \sqrt{\langle u - v, u - v \rangle} < r\}$.

收敛: $(v_n) \rightarrow v \iff \lim_{n \rightarrow \infty} d(v_n, v) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\langle v_n - v, v_n - v \rangle} = 0$.

线性变换 $\tau: V \rightarrow W$ 连续 $\iff (\tau(v_n)) \rightarrow \tau(v)$.

13.1 希尔伯特空间

定理 13.1 (课本定理13.5): (1) $(x_n) \rightarrow x, (y_n) \rightarrow y \implies (\langle x_n, y_n \rangle) \rightarrow \langle x, y \rangle$.

(2) 序列收敛 \implies 序列的范数收敛. $(x_n) \rightarrow x$, 则 $(\|x_n\|) \rightarrow \|x\|$.

证: (2) $(x_n) \rightarrow x \iff \forall \epsilon > 0, \exists N > 0$, 当 $n > N$ 时, $d(x_n, x) = \|x_n - x\| < \epsilon$
 $\implies \|\|x_n\| - \|x\|\| \leq \|x_n - x\| < \epsilon$, 故 $(\|x_n\|) \rightarrow \|x\|$.

(1) $|\langle x_n, y_n \rangle - \langle x, y \rangle| = |\langle x_n, y_n \rangle - \langle x_n, y \rangle + \langle x_n, y \rangle - \langle x, y \rangle| \leq |\langle x_n, y_n \rangle - \langle x_n, y \rangle| + |\langle x_n, y \rangle - \langle x, y \rangle| = |\langle x_n, y_n - y \rangle| + |\langle x_n - x, y \rangle| \leq \|x_n\| \|y_n - y\| + \|x_n - x\| \|y\|$.

$\because (x_n) \rightarrow x, (y_n) \rightarrow y, \therefore \|x_n - x\| \rightarrow 0, \|y_n - y\| \rightarrow 0 \implies |\langle x_n, y_n \rangle - \langle x, y \rangle| \rightarrow 0 \implies (\langle x_n, y_n \rangle) \rightarrow \langle x, y \rangle$.

□

注意 (2) 反之不真, 如 $(x_n = (-1)^n)$ 的范数收敛, 但序列本身不收敛.

上述定理说明内积向量空间上天然 \exists 连续映射 $\|\cdot\|: V \rightarrow \mathbb{R}, v \mapsto \|v\|, \langle x, \cdot \rangle: V \rightarrow F, v \mapsto \langle x, v \rangle$.

定义 13.1 希尔伯特空间: 在内积诱导的度量下完备的度量空间.

定理 13.2 完备化定理(课本定理13.6): 对内积向量空间 V , \exists 希尔伯特空间 H 及等距映射 $\tau: V \rightarrow H$, s.t. $\tau(V)$ 在 H 中稠密.

定理 13.3 (课本定理13.7): V 为内积向量空间, 子空间 $S \subseteq V$, 则

(1) S 完备 $\implies S$ 闭.

(2) V 为希尔伯特空间, S 为 V 的子空间, S 闭 $\iff S$ 完备.

(3) $\dim S < \infty$, 则 S 闭且完备.

证(1)(2) 与定理 12.7 的证明同.

(3) $\because \dim S = n, \therefore \exists$ 正交归一基 $\{b_1, \dots, b_n\}$.

取 S 中序列 $(v_n) \rightarrow v \in V$, 下证 $v \in S$.

假设 $v \notin S$, 则 $\hat{v} \in S$ 且 $v - \hat{v} \perp S$.

$\|v_n - v\|^2 = \|v_n - \hat{v} + \hat{v} - v\|^2$, 其中 $v_n - \hat{v} \in S, \hat{v} - v \in S^\perp$

$\implies \|v_n - v\|^2 = \|v_n - \hat{v}\|^2 + \|v - \hat{v}\|^2 \geq \|v - \hat{v}\|^2 > 0$, 与 $(v_n) \rightarrow v$ 矛盾, 故假设错误, $v \in S \implies S$ 闭.

由完备化定理, \exists 希尔伯特空间 H 及等距映射 $\tau: S \rightarrow H$, s.t. $\tau(S)$ 在 H 中稠密.

$\because \tau$ 等距, $\therefore \tau$ 单射 $\implies \tau: S \rightarrow \tau(S)$ 等距同构.

又 $\because \dim S = n, \therefore \dim \tau(S) = n \implies \tau(S)$ 闭.

又 $\because \tau(S)$ 在 H 中稠密, $\therefore H = \text{cl}(\tau(S)) = \tau(S) \implies S \approx H$.

又 $\because H$ 为希尔伯特空间, $\therefore S$ 为希尔伯特空间.

□

13.2 无穷级数

此前我们已经证明, 对给定的向量, 由有限维子空间有正交归一基可表示其在有限维子空间中的最佳近似; 由于无限维子空间有最大正交归一集, 但该最大正交归一集未必为基, 故向量在无限维子空间中未必有最佳近似; 以开子集为例可说明, 向量在子集中未必有最佳近似.

定义 13.2 级数收敛和绝对收敛: 序列 (x_n) 的前 n 项和 $s_n = \sum_{i=1}^n x_i$, 若 (s_n) 在 V 中收敛于 s , 则称级数 $\sum_{i=1}^\infty x_i$ 在 V 中收敛于 s , 记作 $\sum_{i=1}^\infty x_i = s$; 若 $\sum_{i=1}^\infty |x_i|$ 收敛, 则称 $\sum_{i=1}^\infty x_i$ 绝对收敛.

定理 13.4 收敛和绝对收敛的关系(课本定理13.8): 内积向量空间 V 完备 $\iff V$ 上绝对收敛级数收敛.

证: “ \implies ”: 取绝对收敛级数 $\sum_{i=1}^\infty x_i$, 则 $\sum_{i=1}^\infty |x_i|$ 收敛.

令 $s_n = \sum_{i=1}^n \|x_i\|$, 则 (s_n) 收敛 $\implies (s_n)$ 柯西, 即 $\forall \epsilon > 0, \exists N > 0$, 当 $n, m > N$ 时, $\|s_n - s_m\| < \epsilon$.

不妨 $n < m$, 则 $|s_n - s_m| = |\sum_{i=1}^n \|x_i\| - \sum_{i=1}^m \|x_i\|| = |\sum_{i=n+1}^m \|x_i\|| < \epsilon$.

令 $a_n = \sum_{i=1}^n x_i$, $\|a_n - a_m\| = \|\sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^m x_i\| = \|\sum_{i=n+1}^m x_i\| \leq \sum_{i=n+1}^m \|x_i\| < \epsilon \implies a_n = \sum_{i=1}^n x_i$ 柯西.

又 $\because V$ 完备, $\therefore a_n$ 收敛 $\implies \sum_{i=1}^\infty x_i$ 在 V 中收敛.

“ \impliedby ”: 取 V 中柯西序列 (x_n) , 则 $\forall \epsilon > 0, \exists N > 0$, s.t. 当 $n > N$ 时, $\|x_n - x_m\| < \epsilon$.

特别地, $\forall \epsilon > 0$, 令 $\epsilon_k = \frac{\epsilon}{2^k}$, 其中 $k = 0, 1, \dots, \exists N_k > 0$, s.t. 当 $n, m > N_k$ 时, $\|x_n - x_m\| < \epsilon_k = \frac{\epsilon}{2^k}$.

选 $N_1 < N_2 < \dots$, 则 $\|x_{N_{k+1}} - x_{N_k}\| < \frac{\epsilon}{2^k} \implies \sum_{k=1}^\infty \|x_{N_{k+1}} - x_{N_k}\| < \sum_{k=1}^\infty \frac{\epsilon}{2^k} = \epsilon \implies \sum_{k=1}^\infty \|x_{N_{k+1}} - x_{N_k}\|$ 收敛.

又 $\because V$ 上绝对收敛级数收敛, $\therefore \sum_{k=1}^\infty x_{N_{k+1}} - x_{N_k} = \lim_{k \rightarrow \infty} x_{N_{k+1}} - x_{N_1}$ 收敛 $\implies x_{N_{k+1}}$ 收敛.

由引理 13.1 得 x_n 收敛, 故 V 完备.

综上, 得证.

□

引理 13.1: 柯西序列的子列收敛, 则其必收敛.

证: 设柯西序列 (x_n) 的子列 $(x_{N_k}) \rightarrow x$, 即 $\forall \epsilon > 0, \exists K > 0$, s.t. 当 $k > K$ 时, $\|x_{N_k} - x\| < \frac{\epsilon}{2}$.

$\therefore (x_n)$ 柯西, $\therefore \forall \epsilon > 0, \exists N > 0$, s.t. 当 $n, m > N$ 时, $\|x_n - x_m\| < \frac{\epsilon}{2}$.

取 $m = \max\{N + 1, N_K + 1\}$, $\|x_n - x\| = \|x_n - x_m + x_m - x\| \leq \|x_n - x_m\| + \|x_m - x\| < \epsilon \implies (x_n) \rightarrow x$. \square

13.3 近似问题

定义 13.3 凸集: 若 $\forall x, y \in C, \forall p \in [0, 1], px + (1 - p)y \in C$, 则称 C 为凸集.

例 13.1: 三角形、矩形、圆形均为凸集.

三角形中任一点可表为其三个顶点的凸组合 ($\sum_i p_i x_i$, 其中 $p_i > 0 \forall i, \sum_i p_i = 1$).

无法写成其他点的凸组合的点称为极点, 如三角形的三个顶点.

过凸集的极限点且将整个空间划分为含有凸集和不含凸集的两部分的超平面称为面 (face), 如过三角形的一个顶点但未过三角形内部的直线.

过凸集的不止一个极限点的面, 称为 facet, 如三角形的边所在的直线. \square

定理 13.5 (课本定理13.9): V 为内积向量空间, S 为 V 的完备的凸闭子集, 则 $\forall x \in V, \exists! \hat{x} \in S$, s.t. $\|x - \hat{x}\| = \inf_{y \in S} \|x - y\|$, 称 \hat{x} 为 x 在 S 中的最佳近似.

证: 令 $\delta = \inf_{y \in S} \|x - y\|$, 则 $\forall \epsilon > 0, \exists y \in S$, s.t. $\|x - y\| < \delta + \epsilon$.

取 $\epsilon_k = \frac{1}{k}$, 则 $\exists y_1 \in S$, s.t. $\|x - y_1\| < \delta + \epsilon_1$,

$\dots, \exists y_n \in S$, s.t. $\|x - y_n\| \leq \delta + \epsilon_n$,

\dots , 从而得序列 $(y_n) \in S$.

令 $s_n = x - y_n$, 则 $(\|s_n\|) \rightarrow \delta$.

$\|s_i - s_j\|^2 = 2(\|s_i\|^2 + \|s_j\|^2) - \|s_i + s_j\|^2$, 其中 $\|s_i + s_j\|^2 = \|x - y_i + x - y_j\|^2 = 4\|x - \frac{y_i + y_j}{2}\|^2$,

$\therefore y_i, y_j \in S$ 且 S 凸, $\therefore \frac{y_i + y_j}{2} \in S \implies \|x - \frac{y_i + y_j}{2}\|^2 \geq \delta^2$

$\implies \|s_i - s_j\|^2 \leq 2(\|s_i\|^2 + \|s_j\|^2) - 4\delta^2 \rightarrow 4\delta^2 - 4\delta^2 = 0 \implies \|s_i - s_j\|^2 = \|x - y_i - x + y_j\|^2 = \|y_i - y_j\|^2 \rightarrow 0$, 故 (y_n) 为 S 中柯西列.

又 $\therefore S$ 完备, $\therefore (y_n) \rightarrow x \implies \|x - \hat{x}\| = \lim_{n \rightarrow \infty} \|x - y_n\| = \delta$.

下证 \hat{x} 的唯一性: 设 $w \in S$, s.t. $\|x - w\| = \delta$.

$\|\hat{x} - w\|^2 = \|\hat{x} - x + x - w\|^2 = 2(\|x - \hat{x}\|^2 + \|x - w\|^2) - \|\hat{x} - x - (x - w)\|^2$, 其中 $\|\hat{x} - x - (x - w)\| = 4\|x - \frac{\hat{x} + w}{2}\|^2$.

$\therefore \hat{x}, w \in S$ 且 S 凸, $\therefore \frac{\hat{x} + w}{2} \in S \implies \|x - \frac{\hat{x} + w}{2}\|^2 \geq \delta^2$

$\implies \|\hat{x} - w\|^2 \leq 2(\|x - \hat{x}\|^2 + \|x - w\|^2) - 4\delta^2 = 4\delta^2 - 4\delta^2 = 0 \implies \|\hat{x} - w\|^2 = 0 \implies w = \hat{x}$.

综上, 得证. \square

若 S 非凸, 则 \hat{x} 未必唯一.

由上述定理, 可定义 $\min_{y \in S} \|x - y\| \equiv \inf_{y \in S} \|x - y\|$.

定理 13.6 (课本定理13.10): V 为内积向量空间, S 为 V 的完备子空间, 则 $\forall x \in V, \exists x$ 在 S 中的最佳近似 \hat{x} 且 $x - \hat{x} \perp S$.

证: S 为子空间 $\iff S$ 中线性运算封闭 $\implies S$ 凸, 由定理 13.5 得, $\exists!x$ 在 S 中的最佳近似 $\hat{x} \in S$, s.t. $\|x - \hat{x}\| = \inf_{y \in S} \|x - y\|$.

下证 $x - \hat{x} \perp S$: $\forall y \in S, \forall r \in F, \|v - ry\|^2 = \langle v - ry, v - ry \rangle = \langle v, v \rangle + \langle v, -ry \rangle + \langle -ry, v \rangle + \langle -ry, -ry \rangle = \|v\|^2 - \bar{r}\langle v, y \rangle - r\langle y, v \rangle + |r|^2 \|y\|^2 = \|v\|^2 + \|y\|^2 \left(r\bar{r} - \bar{r}\frac{\langle v, y \rangle}{\|y\|^2} - r\frac{\langle y, v \rangle}{\|y\|^2} \right) = \|v\|^2 + \|y\|^2 \left(r - \frac{\langle v, y \rangle}{\|y\|^2} \right) \left(\bar{r} - \frac{\langle y, v \rangle}{\|y\|^2} \right) - \|y\|^2 \frac{\langle v, y \rangle \langle y, v \rangle}{\|y\|^4} = \|v\|^2 + \|y\|^2 \left| r - \frac{\langle v, y \rangle}{\|y\|^2} \right|^2 - \frac{|\langle v, y \rangle|^2}{\|y\|^2}.$

当 $r = \frac{\langle v, y \rangle}{\|y\|^2}$ 时, $\|v - ry\|^2$ 取最小值, 此时 $\|v - ry\|^2 = \|v\|^2 - \frac{|\langle v, y \rangle|^2}{\|y\|^2}.$

特别地, 令 $v = x - \hat{x}$, 则 $\|x - \hat{x} - ry\|^2 \geq \|x - \hat{x}\|^2 - \frac{|\langle x - \hat{x}, y \rangle|^2}{\|y\|^2}.$

又 $\because \|x - \hat{x}\| = \inf_{y \in S} \|x - y\| \leq \|x - (\hat{x} + ry)\|$, $\therefore \frac{|\langle x - \hat{x}, y \rangle|^2}{\|y\|^2} = 0 \implies x - \hat{x} \perp y \implies x - \hat{x} \perp S.$

综上, 得证. □

定理 13.7 投影定理(课本定理13.11): V 为内积向量空间, S 为 V 的完备子空间, 则 $V = S \odot S^\perp$.

特别地, 若 H 为希尔伯特空间, S 为 H 的闭子空间, 则 $H = S \odot S^\perp$.

定理 13.8 (课本定理13.12): S, T 为 V 的子空间, 则

- (1) 若 $V = S \odot T$, 则 $T = S^\perp$.
- (2) 若正交补 \exists , 则唯一. 若 $S \odot T = S \odot T'$, 则 $T = T'$.

证: (1) $\because V = S \odot T, \therefore \forall x \in T, x \perp S \implies T \subseteq S^\perp$.

$\forall w \in S^\perp \subseteq V = S \odot T, w = w_S + w_T$, 其中 $w_S \in S, w_T \in T$.

$\because w \in S^\perp, w_S \in S, \therefore 0 = \langle w_S, w \rangle = \langle w_S, w_S + w_T \rangle = \langle w_S, w_S \rangle + \langle w_S, w_T \rangle = 0 \implies w_S = 0 \implies w = w_T \in T \implies S^\perp \subseteq T$.

综上, 得证.

(2) $\because V' \equiv S \odot T = S \odot T'$, 则 $T = T' = S^\perp$. □

补空间不唯一, 但补空间之间互相同构.

定理 13.9 (课本定理13.13): H 为希尔伯特空间, 则

- (1) 若 $A \subseteq H$, 则 $\text{cspan}(A) = A^{\perp\perp}$ ^a.
- (2) 若 S 为 H 的子空间, 则 $\text{cl}(S) = S^{\perp\perp}$.
- (3) 若 K 为 H 的完备子空间, 则 $K = K^{\perp\perp}$.

^a $\text{cspan}(A) = \text{cl}(\text{span } A)$ 为 A 中向量所张成的空间的闭包.

证: (1) 即证 $\text{cspan}(A)^\perp = A^\perp$: $\because A \subseteq \text{cspan}(A), \therefore \text{cspan}(A)^\perp \subseteq A^\perp$.

$\text{cspan}(A) = \text{span}(A) \cup \text{l}(\text{span}(A)).$

$\forall x \in A^\perp, x \perp A$.

$\forall y \in \text{span}(A), y = \sum_i r_i x_i$, 其中 $r_i \in F, x_i \in A$.

$\because x \perp A, \therefore \langle x, x_i \rangle = 0 \forall i \implies \langle x, y \rangle = \langle x, \sum_i r_i x_i \rangle = \sum_i \bar{r}_i \langle x, x_i \rangle = 0 \implies x \perp \text{span}(A).$

$\forall z \in \text{l}(\text{span}(A)), \forall r, B(z, r) \cap \text{span}(A)$ 中包含异于 z 的点.

取 $r_n = \frac{1}{n}$, 则可得序列 $(z_n) \in \text{span}(A)$. s.t. $z_n \neq z \forall n$ 且 $B(z_n, z) < r_n$ 即 $(z_n) \rightarrow z$.

$\because x \in A^\perp, \therefore x \perp \text{span}(A)$.

又 $\because (z_n) \in \text{span}(A), \therefore x \perp z_n$ 即 $\langle x, z_n \rangle = 0 \forall n$.

又 $\because \langle x, \cdot \rangle : V \rightarrow \mathbb{R}, v \mapsto \langle x, v \rangle$ 连续, $(z_n) \rightarrow z, \therefore \langle x, z_n \rangle \rightarrow \langle x, z \rangle$.

又 $\because \langle x, z_n \rangle = 0$ 为常序列, $\therefore \langle x, z \rangle = 0 \implies x \perp \text{l}(\text{span}(A))$.

$\because x \perp \text{span}(A), x \perp \text{l}(\text{span}(A)), \therefore x \perp \text{span}(A) \cup \text{l}(\text{span}(A)) = \text{cspan}(A) \implies A^\perp \subseteq \text{cspan}(A)$.

综上, $\text{cspan}(A) = A^{\perp\perp} \implies H = \text{cspan}(A) \odot \text{cspan}(A)^\perp = \text{cspan}(A) \odot A^\perp \implies \text{cspan}(A) = A^{\perp\perp}$.

(2) 将 (1) 中的 $\text{span}(A)$ 换成 S 即得证.

(3) $\because K$ 为 H 的完备子空间, $\therefore K$ 闭 $\implies K = \text{cl}(K)$, 利用 (2) 即得证.

□

利用上述定理可得如下推论:

定理 13.10 (课本定理13.14): H 为希尔伯特空间, $A \subseteq H$, 若 $\text{span}(A)$ 在 H 中稠密, 则 $A^\perp = \{0\}$.

证: $\because \text{span}(A)$ 在 H 中稠密, $\therefore \text{cspan}(A) = \text{cl}(\text{span}(A)) = H$.

$\because H$ 为希尔伯特空间, $A \subseteq H, \therefore \text{cspan}(A) = A^{\perp\perp} \implies H = A^{\perp\perp} \implies A^\perp = H^\perp = \{0\}$.

□

定理 13.11 (课本定理13.15): \mathcal{O} 为 Hilbert 基, 则 $\mathcal{O}^\perp = \{0\}$.

证: $\because \mathcal{O}$ 为 Hilbert 基, $\therefore \mathcal{O}$ 为极大的正交集, 即得证.

□

定理 13.12 (课本定理13.25): H 为 Hilbert 空间, $\mathcal{O} = \{o_k \mid k \in K\}$ 为 H 中的正交归一簇, 则 $\forall x \in H$, $\hat{x} = \sum_{k \in K} \langle x, o_k \rangle o_k$ 在 H 中收敛, 为 x 在 $\text{span}(\mathcal{O})$ 中的最佳近似, $\sum_{k \in K} |\langle x, o_k \rangle|^2 \leq \|x\|^2$.

定理 13.13 (课本定理13.26): H 为 Hilbert 空间, $\mathcal{O} = \{u_k \mid k \in K\}$ 为 H 中的正交归一簇, 则下列叙述等价:

(1) \mathcal{O} 为 Hilbert 基.

(2) $\mathcal{O}^\perp = \{0\}$.

(3) $x = \hat{x}$.

(4) $\|x\| = \|\hat{x}\|$.

13.4 有界线性变换的 Riesz 表示定理

定义 13.4 有界线性变换: H_1, H_2 为希尔伯特空间, $\tau \in \mathcal{L}(H_1, H_2)$, 若 $\sup_{0 \neq x \in H_1} \frac{\|\tau(x)\|}{\|x\|} < \infty$, 则称 τ 有界, 记 $\|\tau\| \equiv \sup_{0 \neq x \in H_1} \frac{\|\tau(x)\|}{\|x\|}$, 称为 τ 的范数.

记 $\mathcal{B}(H_1, H_2) = \{H_1 \text{ 到 } H_2 \text{ 的有界线性变换}\}$, $\mathcal{B}(H_1) \equiv \{H_1 \text{ 的有界线性算子}\}$.

例 13.2: (1) 零变换有界, $\|0\| = 0$.

(2) 恒等变换有界, $\|1\| = 1$.

(3) 若 $\dim H_1 < \infty$, $\dim H_2 < \infty$, 则 $\forall \tau \in \mathcal{L}(H_1, H_2)$ 有界.

□

定理 13.14: 若 τ 有界, 则 $\|\tau(y)\| \leq \|\tau\| \|y\|$.

证: 若 $y = 0$, 则显然.

$$\forall 0 \neq y, \frac{\|\tau(y)\|}{\|y\|} \leq \sup_{x \neq 0} \frac{\|\tau(x)\|}{\|x\|} = \|\tau\| \implies \|\tau(y)\| \leq \|\tau\| \|y\|.$$

综上, 得证.

□

定理 13.15 (课本定理13.30): τ 有界, 则

$$(1) \|\tau\| = \sup_{\|x\|=1} \|\tau(x)\|.$$

$$(2) \|\tau\| = \sup_{\|x\| \leq 1} \|\tau(x)\|.$$

$$(3) \|\tau\| = \inf\{c \mid \|\tau(x)\| \leq c \cdot \|x\|\}.$$

$$\text{证: } (1) \frac{\|\tau(x)\|}{\|x\|} = \sqrt{\frac{\langle \tau(x), \tau(x) \rangle}{\|x\|^2}} = \sqrt{\langle \frac{\tau(x)}{\|x\|}, \frac{\tau(x)}{\|x\|} \rangle} = \sqrt{\langle \tau\left(\frac{x}{\|x\|}\right), \tau\left(\frac{x}{\|x\|}\right) \rangle} = \left\| \tau\left(\frac{x}{\|x\|}\right) \right\|.$$

$$\text{令 } y = \frac{x}{\|x\|}, \text{ 则 } \|y\| = 1, \|\tau\| = \sup_{x \neq 0} \frac{\|\tau(x)\|}{\|x\|} = \sup_{\|y\|=1} \|\tau(y)\|.$$

$$(2) \text{一方面, } \sup_{\|x\| \leq 1} \|\tau(x)\| \geq \sup_{\|x\|=1} \|\tau(x)\| = \|\tau\|;$$

$$\text{另一方面, } \sup_{\|x\| \leq 1} \|\tau(x)\| \leq \sup_{\|x\| \leq 1} \frac{\|\tau(x)\|}{\|x\|} \leq \sup_{x \neq 0} \frac{\|\tau(x)\|}{\|x\|} = \|\tau\|,$$

$$\text{故 } \|\tau\| = \sup_{\|x\| \leq 1} \|\tau(x)\|.$$

(3) 由定理 13.14 即得证.

□

定理 13.16 (课本定理13.31): τ 有界 $\iff \tau$ 连续.

证: “ \implies ”: 取 H_1 中收敛序列 $(x_n) \rightarrow x$, 则 $\forall \epsilon > 0, \exists N > 0$, s.t. 当 $n > N$ 时, $\|x_n - x\| < \frac{\epsilon}{\|\tau\|}$
 $\implies \|\tau(x_n) - \tau(x)\| = \|\tau(x_n - x)\| \leq \|\tau\| \|x_n - x\| < \epsilon \implies (\tau(x_n)) \rightarrow \tau(x)$, 故 τ 连续.

“ \impliedby ”: 以 0 为例, 其余点同理可证.

$\because \tau$ 连续, $\therefore \forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0$, s.t. $\tau(B(0, \delta)) \subseteq B(\tau(0), \epsilon) = B(0, \epsilon)$.

特别地, 令 $\epsilon = 1$, 则 $\exists \delta_1 > 0$, s.t. $\tau(B(0, \delta_1)) \subseteq B(0, 1)$.

若 $\|x\| \leq \delta_1$, 则 $\|\tau(x)\| \leq 1 \implies$ 若 $\|x\| = \delta_1$, 则 $\|\tau(x)\| \leq 1, \frac{\|\tau(x)\|}{\|x\|} \leq \frac{1}{\delta_1}$

$\implies \forall \|x\| = 1, \|\delta_1 x\| = \delta_1, \frac{\|\tau(x)\|}{\|x\|} = \frac{\|\tau(\delta_1 x)\|}{\|\delta_1 x\|} \leq \frac{1}{\delta_1} \implies \tau$ 有界.

综上, 得证.

□

有界线性变换/算子的性质: $\tau, \sigma \in \mathcal{B}(H_1, H_2)$, 则

(1) $\tau + \sigma \in \mathcal{B}(H_1, H_2)$ 且 $\|\tau + \sigma\| \leq \|\tau\| + \|\sigma\|$.

$$\text{证: } \|\tau + \sigma\| = \sup_{x \neq 0} \frac{\|(\tau + \sigma)(x)\|}{\|x\|} = \sup_{x \neq 0} \frac{\|\tau(x) + \sigma(x)\|}{\|x\|} \leq \sup_{x \neq 0} \frac{\|\tau(x)\| + \|\sigma(x)\|}{\|x\|} \leq \sup_{x \neq 0} \frac{\|\tau(x)\|}{\|x\|} + \sup_{x \neq 0} \frac{\|\sigma(x)\|}{\|x\|} = \|\tau\| + \|\sigma\| \implies \tau + \sigma \in \mathcal{B}(H_1, H_2). \quad \square$$

$$(2) \quad \forall r \in F, r\tau \in \mathcal{B}(H_1, H_2) \text{ 且 } \|r\tau\| = |r| \|\tau\|.$$

$$\text{证: } \|r\tau\| = \sup_{x \neq 0} \frac{\|r\tau(x)\|}{\|x\|} = \sup_{x \neq 0} \frac{|r| \|\tau(x)\|}{\|x\|} = |r| \|\tau\| \implies r\tau \in \mathcal{B}(H_1, H_2). \quad \square$$

$\tau, \sigma \in \mathcal{B}(H_1)$, 则

$$(3) \quad \sigma \circ \tau \in \mathcal{B}(H_1) \text{ 且 } \|\sigma \circ \tau\| \leq \|\sigma\| \|\tau\|.$$

$$\text{证: } \because \|\sigma \circ \tau(x)\| = \|\sigma(\tau(x))\| \leq \|\sigma\| \|\tau(x)\| \leq \|\sigma\| \|\tau\| \|x\|, \therefore \|\sigma \circ \tau\| = \sup_{x \neq 0} \frac{\|\sigma \circ \tau(x)\|}{\|x\|} \leq \sup_{x \neq 0} \|\sigma\| \|\tau\| = \|\sigma\| \|\tau\| \implies \sigma \circ \tau \in \mathcal{B}(H_1). \quad \square$$

$(\mathcal{B}(H_1, H_2), +)$ 为交换群.

证: $(\mathcal{B}(H_1, H_2), +)$ 满足

(1) **结合律:** 由线性变换加法的结合律即得,

$$(2) \quad \text{有单位元: 零映射 } 0 \in \mathcal{B}(H_1, H_2), \forall \tau \in \mathcal{B}(H_1, H_2), \|0 + \tau\| = \sup_{0 \neq x \in H_1} \frac{\|(0 + \tau)(x)\|}{\|x\|} = \sup_{0 \neq x \in H_1} \frac{\|\tau(x)\|}{\|x\|} = \|\tau\|, \\ \text{同理 } \|\tau + 0\| = \|\tau\|,$$

$$(3) \quad \text{有逆元: } \forall \tau \in \mathcal{B}(H_1, H_2), \exists -\tau \in \mathcal{B}(H_1, H_2), \text{ s.t. } \tau + (-\tau) = (-\tau) + \tau = 0,$$

故得证. \square

$\mathcal{B}(H_1, H_2)$ 为向量空间.

证: 前面已定义了有界线性变换的数乘及 $(\mathcal{B}(H_1, H_2), +)$ 为交换群, 由于其满足

$$(1) \quad r(\tau + \sigma) = r\tau + r\sigma,$$

$$(2) \quad (r + t)\tau = r\tau + t\tau,$$

$$(3) \quad (rt)\tau = r(t\tau),$$

$$(4) \quad \text{有单位元: } \exists 1 \in F, \text{ s.t. } 1\tau = \tau,$$

故得证. \square

$(\mathcal{B}(H), +, \circ)$ 为环.

证: $(\mathcal{B}(H), +, \circ)$ 满足

$$(1) \quad (\mathcal{B}(H_1), +) \text{ 为交换群,}$$

(2) **结合律:** 由线性变换的复合即得,

$$(3) \quad \text{左分配律: } \tau \circ (\sigma + \pi) = \tau \circ \sigma + \tau \circ \pi,$$

$$\text{右分配律: } (\tau + \sigma) \circ \pi = \tau \circ \pi + \sigma \circ \pi,$$

故得证. \square

定理 13.17 Riesz 表示定理(课本定理13.32): H 为希尔伯特空间, $\forall f \in H^* \equiv \{H \text{ 到 } F \text{ 上的有界线性变换}\} = \mathcal{B}(H, F)$, $\exists! z \in H$, s.t. $\forall x \in H$, $f(x) = \langle x, z \rangle$ 且 $\|z\| = \|f\|$.

证: 若 $f = 0$, 则取 $z = 0$ 即得证, 下证 $f \neq 0$ 的情况:

由引理 13.2 得, $\ker f$ 为闭子空间, 又 $\because H$ 为希尔伯特空间, $\therefore \ker f$ 完备子空间 $\implies H = \ker f \odot \ker f^\perp$.

由同构第一基本定理得 $\frac{H}{\ker f} \approx F \approx \ker f^\perp \implies \dim \ker f^\perp = 1 \implies \exists x \in H$, s.t. $\ker f^\perp = \langle x \rangle$.

$\forall y \in H$, $y = rx + w$, 其中 $w \in \langle x \rangle^\perp = \ker f \implies f(y) = f(rx + w) = rf(x) + f(w) = rf(x)$.

取 $z = \frac{f(x)}{\langle x, x \rangle} x$, 则 $\langle y, \frac{f(x)}{\langle x, x \rangle} x \rangle = \frac{f(x)}{\langle x, x \rangle} \langle rx + w, x \rangle = \frac{rf(x)}{\langle x, x \rangle} \langle x, x \rangle = rf(x) = f(y)$. □

引理 13.2: $\tau \in \mathcal{B}(H, F)$, 则 $\ker \tau$ 为闭子空间.

证: $\ker f = \{v \in H \mid f(v) = \langle v, z_0 \rangle = 0\}$, 其中 z_0 为 f 的 Riesz 向量.

$\forall \ker f$ 中序列 $(x_n) \rightarrow x_0$, $\because \langle \cdot, z_0 \rangle$ 连续, $\therefore 0 = \langle x_n, z_0 \rangle \rightarrow \langle x_0, z_0 \rangle = 0 \implies x_0 \in \ker f$, 故 $\ker f$ 收敛封闭 $\implies f$ 闭. □

$\tau^* \in \mathcal{B}(H_2, H_1)$ 且 $\|\tau^*\| \leq \|\tau\|$, 即 $\mathcal{B}(H_1, H_2)$ 是伴随封闭的 (证略).

$\because \mathcal{B}(H)$ 是伴随封闭的, $\mathcal{B}(H)$ 关于线性算子的加法和复合成环, 关于线性算子的加法和点乘成向量空间, $\therefore \mathcal{B}(H)$ 为辛代数.