

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	8
0.5	群	9
0.6	环	14
0.7	域	17
1	向量空间	19
2	线性变换	26
2.1	线性变换	26
2.2	表示	29
3	同构定理	34
4	模 I: 基本性质	42
5	模 II: 自由与诺特模	46
6	主理想整环上的模	49
7	线性算子的结构	56
8	特征值和特征向量	61
8.1	投影算子	66
9	实数和复数内积空间	68
9.1	范数和距离	69
9.2	等距算子	70
9.3	正交性	70
9.4	Riesz 表示定理	74

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

定义 0.1 集合(Set): 略.

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: $B - A = \{a \mid a \in B \text{ 且 } a \notin A\}$.
- (4) 补集: $A' = I - A = \{a \mid a \in I \text{ 且 } a \notin A\}$.
- (5) 包含: $A \subseteq B$, 称 A 包含于 B , 或称 B 包含 A , 或称 B 是 A 的子集
 $\iff A \cup B = A \iff A \cup B = B$.

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

$\forall a \in A \cup B$, 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: $\forall a \in A(\cup_i B_i) \iff a \in A \text{ 且 } a \in \cup_i B_i$

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

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

$\iff a \in \cup_i (A \cap B_i)$, 故 $A \cap (\cup_i B_i) \subseteq \cup_i (A \cap B_i)$.

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

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

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

$\iff a \in A \text{ 且 } a \in \cup_i B_i$

$\iff a \in A \cap (\cup_i B_i)$, 故 $\cup_i (A \cap B_i) \subseteq A \cap (\cup_i B_i)$.

综上, 得证. □

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

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

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

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

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

$\iff \cap_i (A \cup B_i)$, 故 $A \cup (\cap_i B_i) \subseteq \cap_i (A \cup B_i)$.

$\forall a \in \cap_i (A \cup B_i) \iff \forall i, a \in A \cup B_i$

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

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

$$\iff a \in A \text{ 或 } a \in \cup_i B_i$$

$$\iff a \in A \cap (\cup_i B_i), \text{ 故 } \cap_i (A \cup B_i) \subseteq A \cap (\cup_i B_i).$$

综上, 得证. □

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

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

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

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

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

$$\iff a \in \cap_i A_i', \text{ 故 } (\cup_i A_i)' \subseteq \cap_i A_i'.$$

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

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

$$\iff a \in I \text{ 且 } a \notin \cup_i A_i'$$

$$\iff a \in (\cup_i A_i)', \text{ 故 } \cap_i A_i' \subseteq (\cup_i A_i)'.$$

综上, 得证. □

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

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

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

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

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

$$\iff a \in \cup_i A_i', \text{ 故 } (\cap_i A_i)' \subseteq \cup_i A_i'.$$

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

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

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

$$\iff a \in I \text{ 且 } a \notin \cap_i A_i$$

$$\iff a \in (\cap_i A_i)', \text{ 故 } \cup_i A_i' \subseteq (\cap_i A_i)'.$$

综上, 得证. □

0.3 映射

定义 0.2 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 0.3 映射相等: 映射 $f : S_1 \rightarrow S_2, g : S_1 \rightarrow S_3, \forall a \in S_1, f(a) = g(a)$, 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 0.4 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 0.5 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$\iff a \in \cup_i f^{-1}(B_i)$, 故 $f^{-1}(\cup_i B_i) \subseteq \cup_i f^{-1}(B_i)$.

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

$\iff \exists k$, s.t. $f(a) \in B_k$

$\iff f(a) \in \cup_i B_i$

$\iff a \in f^{-1}(\cup_i B_i)$, 故 $\cup_i f^{-1}(B_i) \subseteq f^{-1}(\cup_i B_i)$.

综上, 得证. □

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

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

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

$\iff a \in \cap_i f^{-1}(B_i)$, 故 $f^{-1}(\cap_i B_i) \subseteq \cap_i f^{-1}(B_i)$.

$\forall a \in \cap_i f^{-1}(B_i)$, $\forall i$, s.t. $a \in f^{-1}(B_i)$

$\iff \forall i$, s.t. $f(a) \in B_i$

$\iff f(a) \in \cap_i B_i$

$\iff a \in f^{-1}(\cap_i B_i)$, 故 $\cap_i f^{-1}(B_i) \subseteq f^{-1}(\cap_i B_i)$.

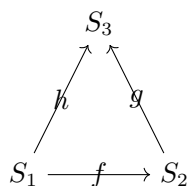
综上, 得证. □

定义 0.6 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.

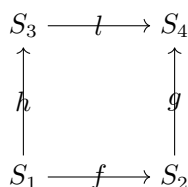
定理 0.1 映射复合的结合律: $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$.

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

定义 0.7 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 0.8 单射(Injective 或 One-to-one): 映射 $f : S_1 \rightarrow S_2$, $\forall a, b \in S_1$, 若 $f(a) = f(b) \implies a = b$, 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 0.9 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 $\iff \forall B \subseteq S_2, f^{-1}(B) \neq \emptyset$.

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

定义 0.10 双射: 映射 f 单射且满射 $\iff f$ 双射.

例 0.2: 恒等映射是双射的. □

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,
 $g: S_2 \rightarrow S_3$, $g(b) = 0 \forall S_2$, 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,
 $g: S_2 \rightarrow S_3$, $g(b) = 0 \forall S_2$, 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. $g \circ f = 1_{S_1}$, 这样的 g 称为 f 的左逆.

证: “ \implies ”: 构造 $g(b) = \begin{cases} a, & a \in f^{-1}(b), \\ \text{任意取一个 } a_0 \in S_1, & f^{-1}(b) = \emptyset, \end{cases}$,
 $\forall a \in S_1$, 记 $b = f(a)$, $\because f$ 单射且 $a \in f^{-1}(b) \neq \emptyset$, $\therefore |f^{-1}(b)| = 1$,
 $\implies g \circ f(a) = a \implies g \circ f = 1_{S_1}$.

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

由于当 $f^{-1}(b) = \emptyset$ 时, $g(b)$ 的取值具有任意性, 故若左逆存在, 则不唯一.

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. $f \circ h = 1_{S_2}$, 这样的 h 称为 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 $f \circ h(b) = b \implies f \circ h = 1_{S_2}$.

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

由于 $|f^{-1}(b)| \geq 1$, $h(b)$ 的取值可能具有任意性, 故若右逆存在, 则不唯一.

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: 因为 f 同时存在左逆和右逆, 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. $b = f(a) \implies f(a) = b \neq f \circ g \circ f(a) = 1_{S_2}(f(a)) = f(a)$, 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 0.11 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 0.12 关系: 卡氏积的子集. $\mathcal{R} \in S \times S$, 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 0.13 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 0.14 等价关系: 关系 $\mathcal{R} \in S \times S$, 若满足

reflexivity: $\forall a \in S, (a, a) \in \mathcal{R}$ (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 $a \sim b, b \sim c \iff a \sim c$)

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

$\because a \in [a], \therefore [a]$ 非空.

$c \in S$, 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: 假设 $[a] \cap [b] \neq \emptyset$, 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. \square

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 $[a] \cap [b] = \emptyset$.
(以上三条证明见前文.)
- (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: $S = \cup_a \{a\}$, 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 0.16 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 0.17 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 0.18 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 0.19 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: 单位元是唯一的.

证: 假设 e_1, e_2 均为单位元, 则 $e_1 * e_2 = e_1 * e_2$, 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 0.20 群的阶: $|G| \equiv$ 群中元素的个数.

定义 0.21 有限群: 若 $|G| < \infty$, 则称 G 为有限群.

定义 0.22 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: $g \in G, g^2 \in G, \dots, g^n \in G \implies \{g, g^2, \dots, g^n\} \subseteq G$

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

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 0.23 子群: 对群 $(G, *)$, H 为 G 的非空子集, 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. □

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

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.

$(H, *) < (G, *) \iff H \subseteq G, \forall a, b \in H, a * b^{-1} \in H$: 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 $\because H \subseteq G, \therefore H < G$. □

定义 0.24 平凡子群: $(G, *)$ 和 $(\{e\}, *)$ 为 $(G, *)$ 的平凡子群.

定义 0.25 真子群(非平凡子群): 除平凡子群以外的子群.

定义 0.26 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: $\forall a, b \in \cap_{i \in K} H_i \implies \forall i \in K, a, b \in H_i$,

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

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 .

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

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

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

定义 0.27 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: $\forall g, n\mathbb{E} = \{n + m \mid m \in \mathbb{E}\} = \begin{cases} \mathbb{E}, & n \text{ 为偶数}, \\ 1\mathbb{E} = \mathbb{O} \equiv \{\text{奇数}\}, & n \text{ 为奇数}, \end{cases}$ 故 \mathbb{E} 在 \mathbb{Z} 中仅有两个陪集: \mathbb{E} 和 \mathbb{O} , 且 $\mathbb{Z} = \mathbb{E} \cup \mathbb{O}$, $\mathbb{E} \cap \mathbb{O} = \emptyset$. □

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

(1) $g_1 H \cap g_2 H = \emptyset$ 或 $g_1 H = g_2 H$.

证: 假设 $g_1 H \cap g_2 H \neq \emptyset$, 则 $\exists c \in g_1 H \cap g_2 H$

$\iff c \in g_1 H$ 且 $c \in g_2 H$

$\iff \exists h_1, h_2$, s.t. $c = g_1 * h_1 = g_2 * h_2$

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

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

$\implies (g_2^{-1} * g_1) * H = H$

$\implies g_1 H = g_2 H$. □

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

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

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

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

综上, $H \rightarrow gH$ 双射, 故得证. □

(3) $G = H \cup g_1H \cup g_2H \cup \cdots \cup g_\alpha H$, 其中 $g_iH \cap g_jH = \emptyset \forall i, j, \alpha$ 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 ”: $g_1H = g_2H \implies \forall g_1 * h_1 \in g_1H, g_1 * h_1 \in g_2H$

$\implies \exists h_2 \in H, \text{ s.t. } g_1 * h_1 = g_2 * h_2$

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

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

“ \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 $H < G, |H| \mid |G|$.

$^a a \mid b$ 表示 b 可被 a 整除.

故若 $|G|$ 为质数, 其子群仅有 $\{e\}$ 和 G 两个, 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: $n \sim m \iff n - m \in \mathbb{E}$. □

定义 0.28 商群: H 为 G 的正规子群, $\frac{G}{H} = \{[g] \equiv gH \mid g \in G\}$.

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 $g_1H = g'_1H, g_2H = g'_2H$, 则 $(g_1 * g_2)H = (g'_1 * g'_2)H$.

$\because g_1H = g'_1H, \therefore \exists h_1, h'_1 \in H, \text{ s.t. } g_1h_1 = g'_1h'_1 \iff g_1 = g'_1 * h'_1 * h_1^{-1}$,

$\because g_2H = g'_2H, \therefore \exists h_2, h'_2 \in H, \text{ s.t. } g_2h_2 = g'_2h'_2 \iff g_2 = g'_2 * h'_2 * h_2^{-1}$,

从而 $g_1 * g_2 = g'_1 * h'_1 * h_1^{-1} * g'_2 * h'_2 * h_2^{-1}$,

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

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

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

定理 0.11 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.

定理 0.12: 交换群的任意一个子群为正规子群.

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

定义 0.29 群同态: 对群 $(G_1, *)$ 和 (G_2, \circ) , 若映射 $f: G_1 \rightarrow G_2$ 满足 $f(a * b) = f(a) \circ f(b)$ (即映射后保持代数结构), 则称 f 为 G_1 到 G_2 的群同态.

(类似于集合间的映射)

定义 0.30 单同态: 单射的群同态.

定义 0.31 满同态: 满射的群同态.

定义 0.32 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 0.33 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.

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

$\ker f \subseteq G_1$.

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

定义 0.34 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.

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

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 $f(a) \circ [f(b)]^{-1} = e_2$

$\implies f(a) \circ f(b^{-1}) = e_2$

$\implies f(a * b^{-1}) = e_2$

$\implies a * b^{-1} \in \ker f = \{e_1\}$

$\implies a = b = e_1$, 故 f 单同态. □

0.6 环

定义 0.35 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. □

常用结论:

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

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

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

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

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

(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. □

特殊的环:

(1)

定义 0.36 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 0.37 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 0.38 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.

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

定义 0.39 整环: 有单位元, 交换, 无零因子的环.

定义 0.40 子环: 非空真子集 $\emptyset \neq R_1 \subseteq R$, 若 $(R_1, +, \cdot)$ 亦为环, 则称 R_1 为 R 的子环.

$\therefore (R_1, +)$ 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 ”: $r \cdot a = r \cdot b \iff r \cdot (a - b) = r \cdot a - r \cdot b = r \cdot b - r \cdot b = 0$,

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

“ \impliedby ”: 假设 R 有零因子, $r_0 \cdot a_0 = 0$, 则令 $r = r_0, \forall a, b \in R$, 若 $r \cdot a = r \cdot b = 0$, 则 $a - b = 0$ 或 $a - b = a_0$ 或 $a - b = a_0 + a_0, \dots$, 矛盾, 故假设错误, R 无零因子.

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

定义 0.41 理想: 非空子集 $I \subseteq R$, 若 $\forall a, b \in I, r \in R, a - b \in I, r \cdot a \in I, a \cdot r \in I$, 则称 I 为 R 的理想.

定义 0.42 平凡理想: $(\{0\}, +, \cdot)$ 和 $(R, +, \cdot)$ 为 $(R, +, \cdot)$ 的平凡理想.

定义 0.43 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: $\therefore 0 \in \bigcap_{i \in K} I_i, \bigcap_{i \in K} I_i = \emptyset$.

$\therefore \forall a, b \in \bigcap_{i \in K} I_i, \therefore \forall a, b, \forall k \in K, a, b \in I_k$,

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

$\forall k \in K, a_k \in I_k$, 又 $\therefore I_k$ 为理想, $r \cdot a \in I_k, a \cdot r \in I_k \implies r \cdot a \in I_k, a \cdot r \in I_k$.

综上, $\bigcap_{i \in K} I_i$ 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 $\bigcup_i I_i$ 是 R 的理想.

定义 0.44 生成理想: R 为交换环, 非空子集 $\emptyset \neq S \subseteq R$, 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 $I_0 \in J$, 故 $\bigcap_k I_k \subseteq I_0$.

$\therefore \bigcap_{i \in K} I_i$ 为理想, 又 $\therefore I_0$ 为最小的理想, $\therefore |I_0| \leq |\bigcap_k I_k|$.

综上, 必有 $I_0 = \bigcap_k I_k$. □

- 由某个元素 a 生成的理想: $\langle a \rangle = \{r \cdot a \mid r \in R\}$.
- 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 0.45 商环: $\frac{R}{\sim} \equiv \{[a] \mid a \in R\}$.

$([a], [b]) \mapsto [a + b]$ 和 $([a], [b]) \mapsto [a \cdot b]$ 都是运算.

证: 要证 $([a], [b]) \mapsto [a + b]$ 和 $([a], [b]) \mapsto [a \cdot b]$ 都是运算, 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 $([a], [b]) \mapsto [a + b]$ 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 $\because h_1, h_2 \in I \implies h_1 \cdot h_2 \in I$, 而由理想的定义, $a' \cdot h \in I, h_1 \cdot b' \in I$,
 $\implies a' \cdot b' = a \cdot b - a' \cdot h_1 - h_2 \cdot b \in I$, 故 $[a'] \cdot [b'] = [a' \cdot b'] = [a \cdot b]$. □

定义 0.46 环同态: $(R_1, +, *)$ 和 $(R_2, +, \cdot)$ 为环, 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 0.47 核: $\ker f \equiv \{a \in R_1 \mid f(a) = 0\}$.

定义 0.48 像: $\text{Im } f \equiv \{f(a) \mid a \in R_1\}$.

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

定理 0.20: $\ker f$ 为理想.

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

同理 $a \cdot r \in \ker f$.

综上, $\ker f$ 为 R_1 的理想. □

定义 0.49 单同态: 单射的环同态.

$$\text{单同态} \iff \ker f = \{0\}.$$

定义 0.50 满同态: 满射的环同态.

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

定义 0.51 同构: 双射的环同态.

定义 0.52 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.

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

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

$$\langle 2, 3 \rangle \equiv \{2n + 3m \mid n, m \in \mathbb{Z}\} = \mathbb{Z}. \quad \langle 1 \rangle \equiv \mathbb{Z}.$$

\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: 任何一个由自然数组成的集合均存在最小正整数.)

证: 若 $p \in \mathbb{Z}, p \in \langle n \rangle$, 我们不妨假设 $p > n$, 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 0.53 剩余类环: $\mathbb{Z}_n \equiv \frac{\mathbb{Z}}{\langle n \rangle} = \{[0], [1], \dots, [n-1]\}.$

例 0.19: $\mathbb{Z}_6 = \{[0], [1], [2], [3], [4], [5]\}, [2] \cdot [3] = [6] = [0]$, 故 \mathbb{Z}_6 有零因子. □

0.7 域

定义 0.54 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, $F = \{0, 1\} \cong \mathbb{Z}_2 = \frac{\mathbb{Z}}{\langle 2 \rangle}.$

例 0.20: \mathbb{Z}_2 是最小的有限域. \mathbb{Q} 为最小的无限域. □

定义 0.55 有理数: $\mathbb{Q} = \left\{ \frac{m}{n} \mid n \neq 0, n, m \in \mathbb{Z} \right\}$, 即 $\forall q \in \mathbb{Q}, \exists m, n \in \mathbb{Z}, n \neq 0, q = \frac{m}{n}$.

定义 0.56 域的特征: $\text{char } F \equiv$ 使得 $n \cdot 1 = \overbrace{1 + 1 + \cdots + 1}^{n \text{ 个 } 1 \text{ 相加}} = 0$ 的最小正整数.

例 0.21: $\text{char } \mathbb{Z}_2 = 2, \text{char } \mathbb{Q} = 0$. □

$p = \text{char } F$ 必为质数, 否则 $\exists m, n < p$, s.t. $0 = p \cdot 1 = (n \cdot m) \cdot 1 = (m \cdot 1) \cdot (n \cdot 1) \implies n \cdot 1 = 0$ 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 0.57 域同态: $(F_1, +, \cdot)$ 和 $(F_2, +, \cdot)$ 为域, 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:

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

$$(2) f(1) = 1 \text{ 或 } 0.$$

$$\text{证: } f(1) = f(1 \cdot 1) = f(1) \cdot f(1) \implies f(1) - f(1) \cdot f(1) = 0 \implies f(1) = 0 \text{ 或 } 1. \quad \square$$

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

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

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

Chapter 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

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

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

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

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

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. □

1. 向量空间

例 1.3: $F^n \equiv \{(r_1, \dots, r_n) \mid r_i \in F\}$, 满足 $(r_1, \dots, r_n) + (l_1, \dots, l_n) = (r_1 + l_1, \dots, r_n + l_n)$, $r(r_1, \dots, r_n) = (rr_1, \dots, rr_n)$. 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

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 $\iff \forall a, b \in S, r, t \in F, ra + tb \in S$ (即线性运算封闭).

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

“ \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

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

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

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

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

$rw_1 + tw_2 = r(u_1 + v_1) + t(u_2 + v_2) = (ru_1 + tu_2) + (rv_1 + tv_2)$, 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

定义 1.3 生成子空间和生成集: $\emptyset \neq S \subseteq V$, S 的生成子空间为 $\langle S \rangle \equiv$ 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 ,

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

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

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

1. 向量空间

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. □

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: $\exists r, t$ 不全为零, s.t. $ru + tv = 0$, 不妨设 $0 \neq r \in F$, 则 $ru = -tv \implies r^{-1}ru = -r^{-1}tv \implies u = -\frac{t}{r}v$ □

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, $\therefore r'_1 = r_1, r'_m = r_m$, 故两种线性表示相同.

第一个 “ \Leftarrow ”: $0 \in \langle S \rangle$, 由于 $0u_1 + \dots + 0u_m = 0$ 是且是 0 唯一的线性表示, 故 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, 故假设错误, u_1 不可由 u_2, \dots, u_m 线性表示.

第二个 “ \Leftarrow ”: 假设 S 线性相关, 则 \exists 非零 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).

1. 向量空间

(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 $\exists v \in V - S$, 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 $S \supseteq$ 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 $V \neq \langle S \rangle$, $\exists v \in V - S$, 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 $\langle \{e_1, \dots, e_n\} \rangle = \{r_1 e_1 + \dots + r_n e_n = (r_1, \dots, r_n) \mid r_i \in F, \text{ 对 } i = 1, \dots, n\} = F^n$, 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 $u_2 \in V - \langle u_1 \rangle$ 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 $I \subseteq V$, $S \subseteq V$ 是 V 的生成集, 且 $I \subseteq S$, 则 $\exists V$ 的基 \mathcal{B} , s.t. $I \subseteq \mathcal{B} \subseteq S$.

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

$$- (v_1, \dots, v_n) + (u_1, \dots, u_n) = (v_1 + u_1, \dots, v_n + u_n)$$

$$- r(v_1, \dots, v_n) = (rv_1, \dots, rv_n)$$

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 $V_i \cap (\cup_{j \neq i} V_j) = \{0\}$.

$\{0\}$, 则称 V 为 V_1, \dots, V_m 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: $V = V_1 \oplus \dots \oplus V_n$, $V'_1 = \{(v_1, 0, \dots, 0) \mid v_1 \in V_1\}, \dots, V'_m = \{(0, 0, \dots, v_m) \mid v_m \in V_m\}$ 是 V 的子空间, 则 $V = \bigoplus_{i=1}^n V_i$ 且 $V'_i \cap (\bigcup_{j \neq i} V_j) = \{0\} \implies V_i = \bigoplus_{i=1}^m V'_i$, 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 $v_i \in V_i$ 组成的集合成为支集.

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 $V_{i1} \ni s_{i1} = -s_{i2} - \dots - s_{in} \in \sum_{j=2}^n V_{ij} \implies s_{i1} \in V_{i1} \cap (\bigcup_{j=2}^n V_{ij})$, $s_{i1} \neq 0$ 与 $V_{i1} \cap (\bigcup_{j=2}^n V_{ij}) = \{0\}$ 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 $0 = (u_{t_1} - w_{t_1}) + \dots + (u_{t_k} - w_{t_k}) + u_{t_{k+1}} + \dots + u_{t_n} - w_{t_{k+1}} - \dots - w_{t_m}$, 由 (2) 知 $k = n = m$ 且 $v_{t_i} = u_{t_i}$, 故 v 具有唯一分解式 $v = v_1 + \dots + v_n$.

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

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 $\implies u \notin V_i \cap (\bigcup_{j \neq i} V_j)$,

$0 = 0v_i \in \langle v_i \rangle$ 且 $0 = \sum_{j \neq i} 0v_j \implies 0 \in V_i \cap (\bigcup_{j \neq i} V_j)$

$\implies V_i \cap (\bigcup_{j \neq i} V_j) = \{0\}$.

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

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

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

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

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

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 总可以扩张为 (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 $V = \langle \mathcal{B}_1 \rangle + \langle \mathcal{B}_2 \rangle \implies V = \langle \mathcal{B}_1 \rangle \oplus \langle \mathcal{B}_2 \rangle$, 故 $S^c = \langle \mathcal{B}_2 \rangle$. \square

例 1.9: $\mathbb{R}^2 = S_x \oplus S_y = S_l \oplus S_{l'}$, 其中 S_l 和 $S_{l'}$ 分别为过原点直线 l 和 l' 对应的子空间, l 与 l' 不共线. \square

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 $v_1, \dots, v_t \in \mathcal{B}_1, v_{t+1}, \dots, v_k \in \mathcal{B}_2 \implies V = \langle \mathcal{B}_1 \rangle + \langle \mathcal{B}_2 \rangle.$

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

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

$\implies 0 = u - u = \sum r_i v_i - \sum l_i w_i,$

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 $\implies r_i = l_i = 0, \forall i$

$\implies u = 0.$

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 $v \in \mathcal{B}_1 \cap \mathcal{B}_2$, 则 $v \neq 0, \langle v \rangle = S \cap T$, 与 $S \cap T = \{0\}$ 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 $i = 1, \dots, k, v_i \in \mathcal{B}_1$, 对 $i = k+1, \dots, n, v_i \in \mathcal{B}_2$

$\implies u = \sum_{i=1}^n r_i v_i$, 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 $i = 1, \dots, k, v_i \in \mathcal{B}_1$, 对 $i = k+1, \dots, n, v_i \in \mathcal{B}_2,$

$\because \mathcal{B}_1$ 和 \mathcal{B}_2 为基, $\therefore \mathcal{B}_1$ 和 \mathcal{B}_2 线性无关 $\implies \sum_{i=1}^k r_i v_i \neq 0, \sum_{i=k+1}^n r_i v_i \neq 0$, 与 $0 = 0 + \dots + 0$ 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 $\implies \mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2$ 是 V 的基. \square

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

证: 设 $S \cap T$ 的基为 \mathcal{A} ,

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

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

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 $u \in S, v \in T \implies u \in \langle \mathcal{A} \cup \mathcal{B} \rangle, v \in \langle \mathcal{A} \cup \mathcal{C} \rangle$, 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 $\sum_{i=1}^k r_i v_i + \sum_{i=k+1}^n r_i v_i = 0$,

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 $x = -\sum_{i=k+1}^n r_i v_i \in \langle \mathcal{B} \cup \mathcal{C} \rangle \implies x \in \langle \mathcal{A} \rangle \cap \langle \mathcal{B} \cup \mathcal{C} \rangle = (S - T) \cap T = \emptyset$.

$\because x \in \langle \mathcal{B} \rangle, \therefore x \in S$, 又 $\because x \in \langle \mathcal{B} \cup \mathcal{C} \rangle, \therefore x \in T \implies x \in S \cap T = \langle \mathcal{B} \rangle \implies x \in \langle \mathcal{A} \rangle \cap \langle \mathcal{B} \rangle \implies x = 0$.

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

(类似于同态)

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 $\tau(0) = 0$, $\tau(-v) = -\tau(v)$.

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

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, 也称这两个向量空间同构, 记作 $V \approx W$.

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

(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. □

$\forall r \in F, v \in \mathcal{L}(V, W), v \xrightarrow{\tau} \tau(v) \implies v \xrightarrow{r\tau} r\tau(v)$ 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.

$(r\tau)(v) = r\tau(v) = r[\tau(v)],$ 故 $r\tau$ 为 V 到 W 的线性变换. □

$\mathcal{L}(V, W)$ 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

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

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

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

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

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): (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: 若已知 $\tau(b_i) \forall b_i \in \mathcal{B}$, 则 $\forall v \in V, v = \sum_{i=1}^n r_i b_i, r_i \in F, b_i \in \mathcal{B}, n \in \mathbb{Z}^+$
 $\implies \tau(v) = \tau(\sum_{i=1}^n r_i b_i) = \sum_{i=1}^n r_i \tau(b_i)$. □

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 ”: $\because V = \langle S \rangle, \therefore \forall v \in V, v = \sum_i r_i s_i$,
 又 $\because \tau$ 同构, $\therefore \forall w \in W, \exists v \in V, \text{ s.t. } w = \tau(v) \implies \tau(v) = \tau(\sum_i r_i s_i) = \sum_i r_i \tau(s_i)$.
 “ \impliedby ”: $\because W = \langle \tau(S) \rangle, \therefore \forall w \in W, w = \sum_i r_i \tau(s_i)$,
 又 $\because \tau$ 同构, $\therefore \forall v \in V, \exists w \in W, \text{ s.t. } v = \tau^{-1}(w) = \tau^{-1}(\sum_i r_i \tau(s_i)) = \sum_i r_i \tau^{-1}(\tau(s_i)) = \sum_i r_i s_i$.
 综上, (1) 得证.

(2) “ \implies ”: 假设 $\sum_i r_i \tau(s_i) = 0$, 则 $\tau(\sum_i r_i s_i) = 0$,
 又 $\because \tau$ 同构, $\therefore \ker \tau = \{0\} \implies \sum_i r_i s_i = 0$,
 又 $\because S$ 线性无关, $\therefore r_i = 0 \forall i \implies \tau(S)$ 线性无关.
 “ \impliedby ”: 假设 $\sum_i r_i s_i = 0$, 则 $\tau(\sum_i r_i s_i) = \sum_i r_i \tau(s_i) = 0$,
 又 $\because \tau(S)$ 线性无关, $\therefore r_i = 0 \forall i \implies S$ 线性无关.

综上, (2) 得证.

(3) (1), (2) \implies (3). □

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): $\tau \in \mathcal{L}(V, W)$,

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

(2) $\dim V = \dim \ker \tau + \dim \operatorname{Im} \tau \equiv \operatorname{null} \tau + \operatorname{rk} \tau$, 其中称 $\operatorname{null} \tau \equiv \dim \ker \tau$ 为 τ 的零度, $\operatorname{rk} \tau \equiv \dim \operatorname{Im} \tau$ 为 τ 的秩.

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

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),

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

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

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

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

综上, (1) 得证.

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

□

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

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

f 单射.

证: $\ker f \equiv \{\tau \mid f(\tau) = 0\} = \{\tau \mid M_\tau = 0\}$.

$\forall \tau \in \ker f, \forall \vec{r} \in F^n, \tau(\vec{r}) = M_\tau \vec{r} = \vec{0} \implies M_\tau = 0_{m \times n} \implies \tau = 0$.

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

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, 从而映射 $v \mapsto \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}$ 唯一确定, 故 $\phi_{\mathcal{B}}$ 为映射.

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

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

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

$\phi_{\mathcal{B}}$ 单射.

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

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

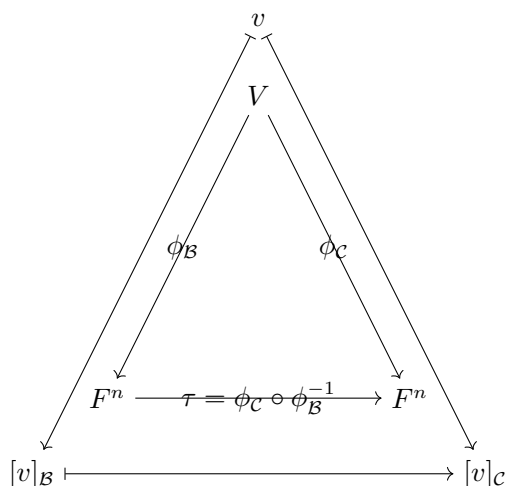
故 $\ker \phi_{\mathcal{B}} = \{0\} \iff \phi_{\mathcal{B}}$ 单射. □

$\phi_{\mathcal{B}}$ 满射.

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

综上, $\phi_{\mathcal{B}}$ 同构.

取 V 的一组定序基 $\mathcal{B} = \{b_1, \dots, b_n\}$, 另一组定序基 $\mathcal{C} = \{c_1, \dots, c_n\}$, v 在 \mathcal{B} 下的表象为 $[v]_{\mathcal{B}}$, 在 \mathcal{C} 下的表象为 $[v]_{\mathcal{C}}$, 映射关系见如下的交换图. 如何联系 v 在不同基下的表象, $[v]_{\mathcal{B}}$ 和 $[v]_{\mathcal{C}}$, 从而得到 τ ?

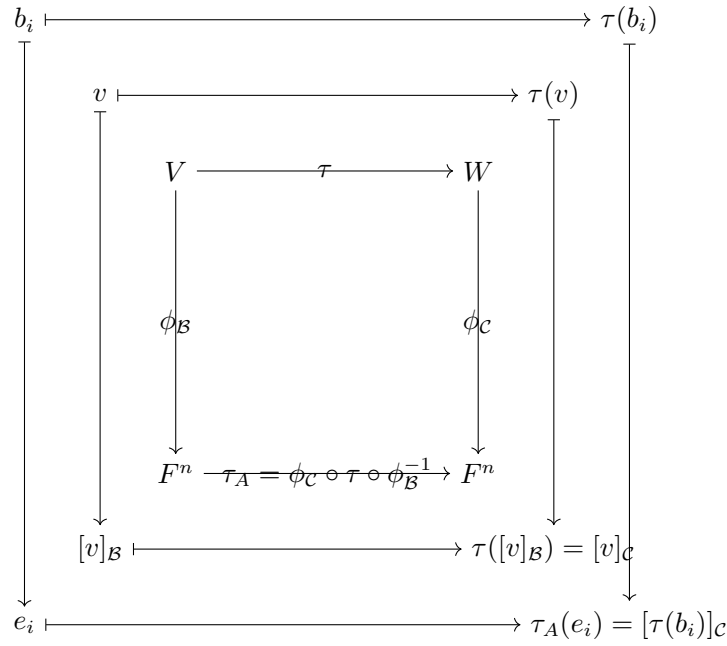


$[v]_{\mathcal{C}} = \tau([v]_{\mathcal{B}}) = M_{\tau}[v]_{\mathcal{B}}$, 其中 $M_{\tau} = \begin{pmatrix} \tau(e_1) & \cdots & \tau(e_n) \end{pmatrix}$.
 $\tau: F^n \rightarrow F^n, \quad e_i \mapsto \tau(e_i) = \phi_{\mathcal{C}}(\phi_{\mathcal{B}}^{-1}(e_i)) = \phi_{\mathcal{C}}(b_i),$
 $M_{\tau} = \begin{pmatrix} [b_1]_{\mathcal{C}} & \cdots & [b_n]_{\mathcal{C}} \end{pmatrix} \equiv M_{\mathcal{BC}}.$

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.



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

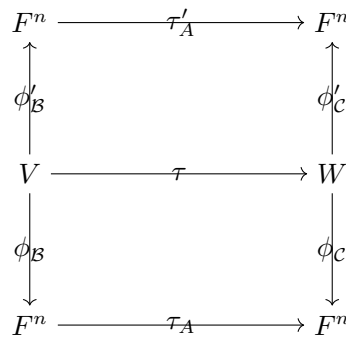
定理 2.9 (课本定理2.14):

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

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

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?



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

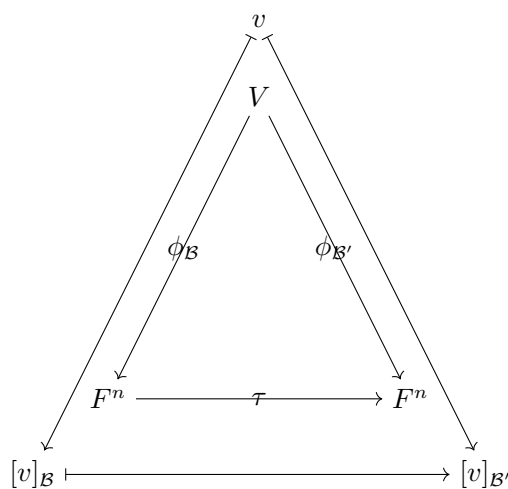
定理 2.11 (课本定理2.16):

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

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



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

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

$\forall [v]_{\mathcal{B}} \in F^n, M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}M_{\mathcal{B}'\mathcal{B}}[v]_{\mathcal{B}} = M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}[v]_{\mathcal{B}'} = [v]_{\mathcal{B}} \implies M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}M_{\mathcal{B}'\mathcal{B}} = n \times n$ 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.

(因为 B 和 A 是同一线性变换在两组不同的基下的表示.)

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

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

$\frac{V}{S}$ 是 F 上的向量空间.

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

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

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

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

故 $[u] + [v] = [u + v]$.

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

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

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

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

$\therefore V$ 是交换群, $\therefore, \text{ s.t. } s_1 - s'_1 + v = v + s_1 - s'_1 \implies u' + v' = u + v + (s_1 - s'_1 + s_2 - s'_2)$

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

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

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

假设 $u \sim u'$, 即 $[u] = [u']$.

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

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

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

$(\frac{V}{S}, +)$ 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 $(\frac{V}{S}, +)$ 是交换群. (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

3. 同构定理

- (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 $\frac{V}{S}$ 是 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.

$\because [u + v] = \{w \in V \mid w - (u + v) \in S\}, r[u] = [ru], \therefore r[u] + t[v] = [ru] + [tv] = [ru + tv]$, 故 Π_S 为线性变换.

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

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

$\Pi_S(v) = [v] = S + v = [0] = S \implies v \in S \implies \ker \Pi_S = S$. □

定理 3.2 (课本定理3.3): (1) S, T 是子空间, 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 $\frac{T}{S} \subseteq \frac{V}{S}$.

$\forall [u_1], [u_2] \in \frac{T}{S}, r, t \in F, r[u_1] + t[u_2] = [ru_1 + tu_2], \because u_1, u_2 \in T, \therefore ru_1 + tu_2 \in T \implies [ru_1 + tu_2] \in \frac{T}{S}$, 故 $\frac{T}{S}$ 是线性空间.

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

故 T 为 V 的子空间.

$\because [0] = S, \therefore S \subseteq T$.

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

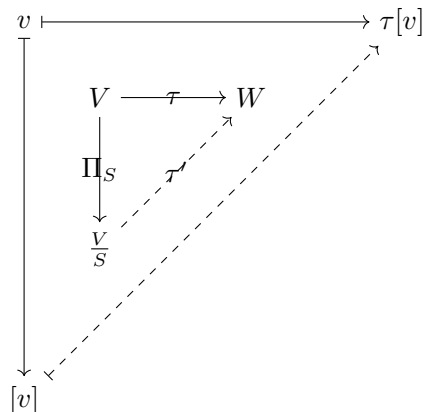
$\forall [v] \in \frac{T}{S}, v \in T \implies [v] \in X$.

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

故 $\frac{T}{S} = X$.

综上, 得证. □

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 $\exists! \tau'$, s.t. $\tau = \tau' \circ \Pi_S$, 即 $\forall v \in V, \tau(v) = \tau'([v])$, 此时上图可交换.

^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 $\tau'([u]) = \tau'([v])$,

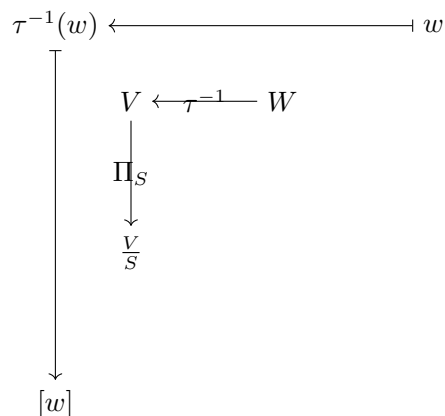
即若 $u \sim v$, 则 $\tau(u) = \tau(v)$,

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

即 $S \subseteq \ker \tau$. □

此时, $\ker \tau' = \{[v] \in \frac{V}{S} \mid \tau'([v]) = 0\} = \{[v] \in \frac{V}{S} \mid \tau(v) = 0\} = \{[v] \in \frac{V}{S} \mid v \in \ker \tau\} = \{[v] \mid v \in \ker \tau\} = \frac{\ker \tau}{S}$,
 $\text{Im } \tau' = \{\tau'([v]) \mid [v] \in \frac{V}{S}\} = \{\tau'([v]) \mid v \in V\} = \{\tau(v) \mid v \in V\} = \text{Im } \tau$ ($\because \Pi_S$ 满射, $\therefore \forall [v] \in \frac{V}{S}, \exists v \in V$).

那么, 如果 τ 双射, 即 $\exists \tau^{-1} \in \mathcal{L}(W, V)$, 再加上条件 $\ker \tau \subseteq S$, 即 $\ker \tau = S$, 如何?

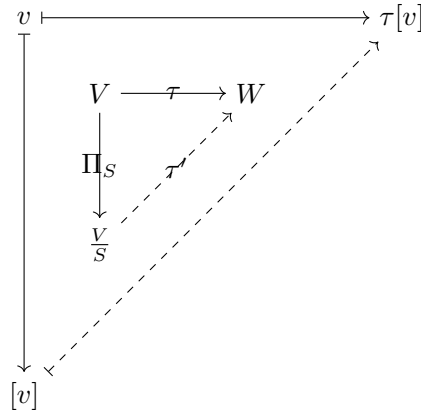


此时, $\ker \tau' = \frac{\ker \tau}{S} = \{[v] \mid v \in \ker \tau\} = \{[v] \mid v \in S\} = \{[0]\} \implies \tau'$ 单射.

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, $\frac{V}{\ker \tau} = \frac{V}{S} \approx \text{Im } \tau$.

3. 同构定理



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

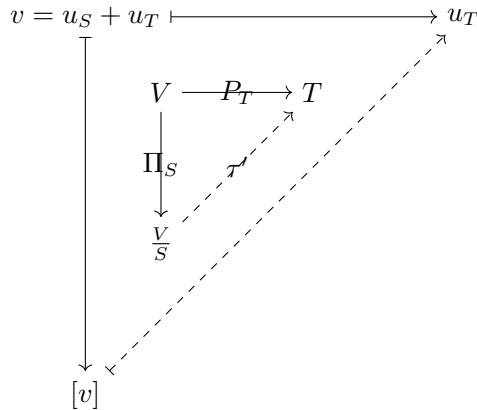
更一般地, 若 $V = S \oplus T$, 则 $\frac{V}{S} = T$, $\frac{V}{T} \approx S$.

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 $P_T: V \rightarrow T$, $v = u_S + u_T \mapsto u_T$.

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

$\exists! \tau'$ 单射, s.t. $P_T = \tau' \circ \Pi_S$.

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



同理可证 $\frac{V}{T} \approx S$. □

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

- (1) $\ker V^*$ 为 F 上的向量空间.
- (2) $\dim F = 1$, $\text{Im } f \subseteq F$, $\therefore \dim \text{Im } f \leq 1$, $\dim \ker f \geq \dim V - 1$.
- (3) V^* 非空, \therefore 必有零映射 $0 \in V^*$, $0: V \rightarrow F$, $v \mapsto 0$.
- (4) 若 $\dim \text{Im } f = 0$, 则 $\text{Im } f = \{0\}$, f 为零映射.
- (5) 若 $\dim \text{Im } f = 1$, 则 $\text{Im } f = \langle r \rangle$, 其中 $0 \neq r \in F \implies \text{Im } f = F$,
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 $f(\langle v \rangle^c) = \{0\}$.

证明一下 (5) 的末句:

3. 同构定理

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

则有 $f\left(\frac{ru}{f(u)}\right) = r \implies \frac{ru}{f(u)} \in f^{-1}(r) \implies f^{-1} = \langle v \rangle \oplus \langle u \rangle$,

又 $\because u \in \langle v \rangle^c$, $\therefore \dim f^{-1} \geq 2$, 这与 $f^{-1} \subseteq (\ker f)^c$, $\dim(\ker f)^c = \dim \operatorname{Im} f \leq 1$ 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) 若 $0 \neq v \in V$, $\exists 0 \neq f \in V^*$, 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 $f(v) = 1$, $f \in V^*$.

我们来验证一下: $\forall u_1, u_2 \in V$, $r, t \in F$, u_1 和 u_2 可写成 $u_1 = r_1v + w_1$, $u_2 = r_2v + w_2$

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

故得证.

并且需要注意这里的 f 的构造不是唯一的: 我们可以构造 $f: V \rightarrow F$, $rv + u \mapsto rt$, 其中 $u \in \langle v \rangle^c$, 如此一来, $f(v) = t$.

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

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

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

$\implies \exists v \in V$, s.t. $V = \ker f \oplus (\ker f)^c = \langle v \rangle$,

又 $\because f(x) \neq 0$, $\therefore x \in \langle v \rangle \implies \langle x \rangle = \langle v \rangle \implies V = \ker f \oplus \langle x \rangle$, 故得证.

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

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

取 $\lambda = \frac{f(x)}{g(x)}$ 即得.

“ \implies ”: 若 $\exists \lambda \neq 0$, $f = \lambda g$, 则显然 $\ker f = \ker g$. □

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. $b_i^*(b_i) = 1$, 对 $j \neq i$, $b_i^*(b_j) = 0$, 即 $b_i^*(b_j) = \delta_{ij}$, 从而可以构造出 $\mathcal{B}^* = \{b_1^*, \dots, b_n^*\} \subseteq V^*$, 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) $\sum_{i=1}^m r_i b_i^* = 0 \implies \forall v \in V, (\sum_{i=1}^m r_i b_i^*)(v) = 0(v) = 0$
 $\implies \sum_{i=1}^m r_i b_i^*(v) = 0$

3. 同构定理

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, 从而得到 $r_j = 0 \forall i$, 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 $v = \sum_{i=1}^n b_i^*(v) b_i$
 $\implies f(v) = f(\sum_{i=1}^n b_i^*(v) b_i) = \sum_{i=1}^n b_i^*(v) f(b_i) = \sum_{i=1}^n f(b_i) b_i^*(v) = (\sum_{i=1}^n f(b_i) b_i^*)(v)$, 这里 $b_i^*(v), f(b_i) \in F$,
 因此可以交换位置, 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. □

按照类似上面的方法, $\forall v \in V$, 我们都可构造 $v^* \in V^*$, s.t. $\forall u_1 \in \langle v \rangle, v^*(u) = 1, \forall u_2 \in \langle v \rangle^c, v^*(u_2) = 0$,
 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 $v^{**} : V^* \rightarrow F, f \mapsto f(v)$.

$V \rightarrow V^* \rightarrow V^{**}, v \mapsto v^* \mapsto v^{**}, b_i \mapsto b_i^* \mapsto b_i^{**}$, 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 $u = v$, 则 $\forall f \in V^*, u^{**}(f) = f(u) = f(v) = v^{**}(v)$, 即得证.

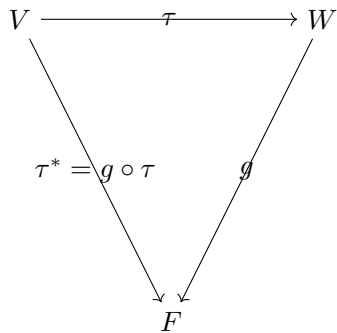
(2) $\tau(ru + tv) = (ru + tv)^{**}$,
 $\forall f \in V^*, (ru + tv)^{**}(f) = f(ru + tv) = rf(u) + tf(v) = ru^{**}(f) + tv^{**}(f) = r\tau(u)(f) + t\tau(v)(f) \implies$
 $\tau(ru + tv) = r\tau(u) + t\tau(v)$,
 结合 (1) 即得证.

(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 $\dim V = n < \infty$, 则 $\dim V^* = \dim V^{**} = n$, V^{**} 与 V 同构, 一个线性空间的二重对偶就回到自身, 所以实际上套娃式的 V^{***} 是没有意义的, 这里我们就写成 $V^{**} = V$.

定义 3.5 算子伴随: 由线性变换 τ 可引出算子伴随 $\tau^* : W^* \rightarrow V^*, g \mapsto g \circ \tau$.

3. 同构定理



(1) τ^* 是映射.

(2) τ^* 是线性的.

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

(2) $\tau^*(rg_1 + tg_2) = (rg_1 + tg_2) \circ \tau = rg_1 \circ \tau + tg_2 \circ \tau = r\tau^*(g_1) + t\tau^*(g_2)$, 故得证.

□

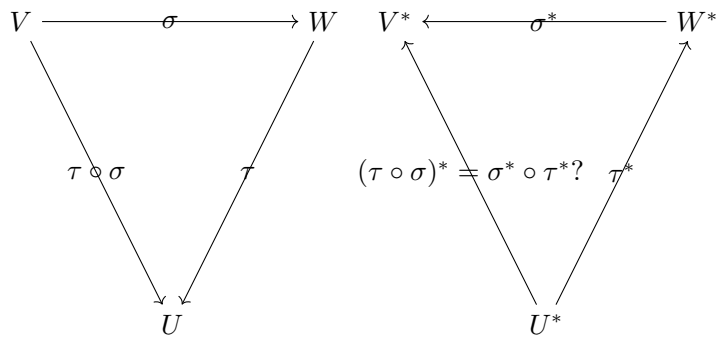
定理 3.7 (课本定理3.18): (1) $\tau, \sigma \in \mathcal{L}(V, W)$, $a, b \in F$, 则 $(a\tau + b\sigma)^* = a\tau^* + b\sigma^*$, 即求和与算子伴随可交换.

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

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

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

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



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

□

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

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} 的对偶空间, 则 $[\tau^*]_{\mathcal{C}^* \mathcal{B}^*} = ([\tau]_{\mathcal{B} \mathcal{C}})^T$.

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 $[\tau]_{\mathcal{B} \mathcal{C}} = [\alpha_{ij}]_{m \times n}$, $\tau^* \in \mathcal{L}(W^*, V^*)$ 的矩阵表示为 $[\tau^*]_{\mathcal{C}^* \mathcal{B}^*} = [\beta_{ij}]_{n \times m}$,

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

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

又 $\because \tau^*(c_i^*) = c_i^* \circ \tau$, 我们将这一复合函数作用在 b_j 上有, $(c_i^* \circ \tau)(b_j) = (\sum_{l=1}^n \beta_{li} b_l^*)(b_j) = \sum_{l=1}^n \beta_{li} b_l^*(b_j) = \beta_{ji}$
 $\implies \beta_{ji} = c_i^*(\tau(b_j))$, 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. □

Chapter 4

模 I: 基本性质

定义 4.1 模: R 为有单位元交换环, $(M, +)$ 为交换群, 数乘: $R \times M \rightarrow M, (r, m) \mapsto m$ 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: $(-r)m + rm = (-r + r)m = 0m = 0 \implies (-r)m = -rm.$

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

$\forall r \in R$, 可构造映射 $\bar{r} : M \rightarrow M, m \mapsto rm$. \bar{r} 是 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 $1a = a, 2a = a + a, \dots, na = \overbrace{a + \dots + a}^{n \text{ 个 } a \text{ 相加}}, -a = -1a, -2a = (-a) + (-a),$
 $-na = \overbrace{(-a) + \dots + (-a)}^{n \text{ 个 } (-a) \text{ 相加}},$ 数乘 $\alpha : \mathbb{Z} \times G \rightarrow G, (n, a) \mapsto na$, 满足

(1) α 是映射

4. 模 I: 基本性质

$$(2) (n+m)a = na + ma$$

$$(3) (nm)a = n(ma)$$

$$(4) n(a+b) = na + nb$$

证: (1) 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, 故得证.

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

$$(3) (nm)a = \overbrace{a+\cdots+a}^{nm\text{个}a\text{相加}} = \overbrace{\overbrace{a+\cdots+a}^{m\text{个}a\text{相加}} + \cdots + \overbrace{a+\cdots+a}^{m\text{个}a\text{相加}}}^{n\text{组}} = \overbrace{ma+\cdots+ma}^{n\text{个}ma\text{相加}} = n(ma).$$

$$(4) n(a+b) = \overbrace{(a+b)+\cdots+(a+b)}^{n\text{个}(a+b)\text{相加}} = \overbrace{a+\cdots+a}^{n\text{个}a\text{相加}} + \overbrace{b+\cdots+b}^{n\text{个}b\text{相加}} = na + nb.$$

(5) 由定义显然. □

故 $M \in \mathbb{Z} - \text{mod}$. □

例 4.2: \forall 交换群 $(G, +)$, $G \in \mathbb{Z} - \text{mod}$. □

例 4.3: $R \in R - \text{mod}$, 其中的数乘即 R 中的乘法. □

例 4.4: $\mathbb{Z}_p = \frac{\mathbb{Z}}{p} = \{[0], \cdots, [p-1]\}$, $(\mathbb{Z}_p, +)$ 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 4.5: $R^n = \{(r_1, \cdots, r_n) \mid r_i \in R\} \in R - \text{mod}$, 其中 $(r_1, \cdots, r_n) + (l_1, \cdots, l_n) = (r_1 + l_1, \cdots, r_n + l_n)$, $r(r_1, \cdots, r_n) = (rr_1, \cdots, rr_n)$. □

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 判定子模的方法(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

4. 模 I: 基本性质

(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. □

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.

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

定义 4.4 有限生成模: 生成集由有限个元素构成的生成模.

定义 4.5 循环模: 由一个元素生成的模.

例 4.6: $R \in R - \text{mod}$ 是一个循环模, $\therefore R = \langle\langle 1 \rangle\rangle = \{r1 \mid r \in R\}$. □

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

假设 S 是有限生成的, $S = \langle\langle f_1, \dots, f_m \rangle\rangle$, $f_i = \sum_{j_1, \dots, j_m=0}^{N_i} a_{i_1, \dots, i_n}^{j_1, \dots, j_n} x_{i_1}^{j_1} \cdots x_{i_n}^{j_n}$ 是有限个变元的有限次多项式, 故 S 无法生成无限个变元的无限次多项式, 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 4.4 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.

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

$\therefore 0[1] = [0], 1[1] = [1], 2[1] = [2], 3[1] = [3], 4[1] = [4], 5[1] = [5]$,

$0[5] = [0], 1[5] = [5], 2[5] = [10] = [4], 3[5] = [15] = [3], 4[5] = [20] = [2], 5[5] = [25] = [1]$.

故 \mathbb{Z}_6 的表示不唯一. □

4. 模 I: 基本性质

$M \in R - \text{mod}$, 但 M 的子模未必自由.

例 4.9: $R = \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} = \{(n, m) \mid n, m \in \mathbb{Z}\}$, 其中 $(n, m)(k, l) = (nk, ml)$, $(n, m) + (k, l) = (n + k, m + l)$ 是仅为交换环 (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 $S = \mathbb{Z} \times \{0\} = \{(n, 0) \mid n \in \mathbb{Z}\}$, $\because \forall n \neq 0, (n, 0)(0, 1) = (0, 0)$, \therefore 无线性无关元, 从而非自由. \square

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

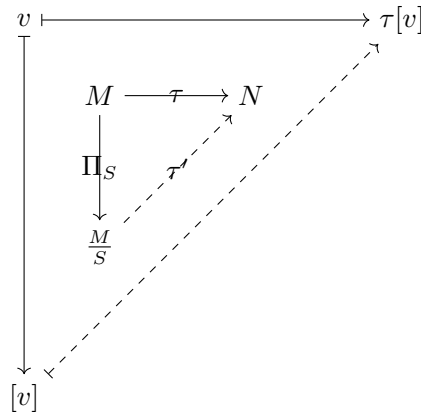
取 $r = t = 1$, 则 $\forall u, v \in M, \tau(u + v) = \tau(u) + \tau(v)$, 故 τ 为群同态.

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 $\iff \text{Im } \tau = N$.

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

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



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

(1) Π_S 满射.

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

定理 4.7 同态第一基本定理: 若 $S \subseteq \ker \tau$, 则 $\exists! \tau'$, s.t. $\tau = \tau' \circ \Pi_S$.

$$\ker \tau' = \frac{\ker \tau}{S}.$$

定理 4.8 同构第一基本定理: 若 $S = \ker \tau$, 则 $\tau' = \frac{\ker \tau}{S} = \{[0]\}$, 即 τ' 单射.

$\because \text{Im } \tau' = \text{Im } \tau$, \therefore 若进一步有 τ , 则 τ' 同构.

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 $S_1 \subseteq S_2 \subseteq S_3 \subseteq S_4 \subseteq S$,
...

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 $S = \bigcap_{i \in J} S_i$ 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 $S = \langle\langle v_m, \dots, v_m \rangle\rangle$,

$\forall K = 1, \dots, m, u_k \in S = \bigcup_{i \in J} S_i \implies \exists i_k \in J$, s.t. $u_k \in S_{i_k}$,

令 $K = \max\{i_1, \dots, i_m\}$, 则由升链的性质, $u_1, \dots, u_m \in S_K$

$\implies S_K = S$, 故升链必终止于 S_K .

综上, 得证. □

例 5.1: $\therefore \mathbb{Z}$ 的任意理想均有单个元素生成, 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,
 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 $M = \langle \langle v_1, \dots, v_n \rangle \rangle \in R - \text{mod}$, $M = \{ \sum_{i=1}^n r_i v_i \mid r_i \in R \}$.

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

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

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

$\implies \tau$ 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 $I_1 = \{ (0, \dots, 0, a_{k+1}) \mid \exists a_1, \dots, a_k \in R, \text{ s.t. } (a_1, \dots, a_k, a_{k+1}) \in I \}$, $I_2 = \{ (a_1, \dots, a_k, 0) \mid \exists a_k \in R, \text{ s.t. } (a_1, \dots, a_k, a_{k+1}) \in I \}$.

$\forall (0, \dots, 0, a_{k+1}), (0, \dots, 0, b_{k+1}) \in I_1$, $\exists a_1, \dots, a_k, b_1, \dots, b_k \in R$, s.t. $(a_1, \dots, a_k, a_{k+1}), (b_1, \dots, b_k, b_{k+1}) \in I$,
 $\because I$ 是子模, $\therefore \forall r, t \in R$, $r(a_1, \dots, a_k, a_{k+1}) + t(b_1, \dots, b_k, b_{k+1}) = (ra_1 + tb_1, \dots, ra_k + tb_k) \in I \implies r(0, \dots, 0, a_{k+1}) + t(0, \dots, 0, b_{k+1}) = (0, \dots, 0, ra_{k+1} + tb_{k+1}) \in I_2$, 故 I_1 为 R^{k+1} 的子模.

$\forall (a_1, \dots, a_k, 0), (b_1, \dots, b_k, 0) \in I_2$, $\exists a_{k+1}, b_{k+1}$, s.t. $(a_1, \dots, a_k, a_{k+1}), (b_1, \dots, b_k, b_{k+1}) \in I$
 $\therefore I$ 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, $\exists g_{i_1}, \dots, g_{i_k} \in R$, s.t. $\bar{g}_i \equiv (g_{i_1}, \dots, g_{i_n}, g_i) \in I$,

又有 $\bar{f}_i = (f_i, 0)$,

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

于是 $r_{k+1} = \sum_{i=1}^m \alpha_i g_i$, $(h, 0) \equiv r - \sum_{i=1}^m \alpha_i \bar{g}_i = (*, \dots, *, 0) \in I$, 从而 $(h, 0) \in I_2$, $h \in J_2$, 设 $h = \sum_{i=1}^n \beta_i f_i$
 $\implies r = \sum_{i=1}^m \alpha_i \bar{g}_i + \sum_{i=1}^n \beta_i \bar{f}_i$, 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 基本定理(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 $\sum_{i=0}^n a_i x^i + \sum_{j=0}^m b_j x^j = \sum_{k=0}^{\max\{n,m\}} (a_k + b_k) x^k$, $(\sum_{i=0}^n a_i x^i) (\sum_{j=0}^m b_j x^j) = \sum_{k=0}^{nm} (\sum_{i+j=k} a_i b_j) x^k$.

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

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

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,

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

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

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

\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 $a_n = \sum_{i=1}^{t_K} \alpha_i r_{Ki}$,

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

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

重复以上操作直至多项式的最高次数 $n < K$, 此时, $a_n \in I_n = \langle r_{n1}, \dots, r_{nt_n} \rangle, a_n = \sum_{j=1}^{t_n} \beta_j r_{nj}, f(x) - \sum_{j=1}^{t_n} \beta_j g_{nj} =$, 即执行以上操作有限次后, $f(x)$ 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: r 整除 $s \iff s = xr, x \in R$, 记作 $r \mid s$.

(2)

定义 6.3 单位: R 中的可逆元.

例 6.2: \mathbb{Z} 中的 1 和 -1 互逆, 故 1 和 -1 均为单位.

实际上, 若 F 为域, 则 $F^* \equiv \mathbb{Z} - \{0\}$ 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: r 与 b 互素 $\implies a$ 与 b 无非单位公因子.

注意:

- 单元必素, 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 $(ar^{-1})r = a$, $(br^{-1})r = b \implies r$ 为素元.

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

- 对于整环来说, 素元不可约, 反之未必.

证: 设 p 为素元, 若 $p = ab$, 则 $1p = p = ab \implies p \mid ab$.

$\because p$ 为素元, $\therefore p \mid a$ 或 $p = b$.

不妨 $p \mid a$, 则 $a = px$, 其中 $x \in R$

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

$\because p \neq 0$ 且 R 为整环 (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.

$9 = 3^2 = (2 + \sqrt{-5})(2 - \sqrt{-5})$,

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

- 对于非整环来说, 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, $a, b \in R$,

a 与 b 互素 $\iff \exists r, t \in R$, s.t. $ra + tb = 1$.

证: “ \implies ”: R 为 PID, 令 $I = \langle a, b \rangle$,

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

$\because a, b$ 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,

$\therefore 1 = ra + tb, \therefore c \mid 1 \implies c$ 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: 若 r 不可约, 则直接得证.

若 r 可约, 则设 $r = r_1 r_2$, r_1 和 r_2 至少有一个非单位,

不妨 r_1 不是单位, 则 r_1 不可约.

若 r_2 不可约, 则得证,

若 r_2 可约, 则 $\langle r \rangle \subseteq \langle r_2 \rangle$,

对 r_2 继续如上分解, 可得 $\langle r \rangle \subseteq \langle r_2 \rangle \subseteq \cdots$,

又 $\because R$ 为 PID, $\therefore R$ 诺特, 即 $\exists K \in \mathbb{Z}^+$, s.t. $\langle r_K \rangle = \langle r_{K+1} \rangle = \cdots$,

故重复如上分解操作, 最终可将 r 表为有限个不可约元的乘积. \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, $0 \in M_{\text{tor}}$, $\therefore M_{\text{tor}} \neq \emptyset$.

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 $\exists 0 \neq r \in R$, $r[v] = [rv] = [0] = M_{\text{tor}} \implies rv \in M_{\text{tor}} \implies v = r^{-1}(rv) \in M_{\text{tor}} \implies [v] = M_{\text{tor}} = [0]$, 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 $u_k = (a_1^k, \dots, a_{k-1}^k, r_k, 0, \dots, 0) \in S, S = \langle u_1, \dots, u_n \rangle$ 生成 (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. □

定理 6.4 (课本定理6.6): R 为 PID, $M \in R - \text{mod}$ 有限生成,
 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 ”: 取 $M = \langle \langle u_1, \dots, u_m \rangle \rangle$,

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 $a_{i1}, \dots, a_{ik}, a_i$, 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 $a = a_{k+1} \dots a_m$, 则 $a \neq 0$,

$aM = \langle \langle au_1, \dots, au_k, au_{k+1}, \dots, au_m \rangle \rangle \subseteq \langle \langle u_1, \dots, u_k \rangle \rangle$,

$\because \{u_1, \dots, u_k\}$ 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 $a \neq 0, \therefore \ker \tau = \{v \in M \mid av = 0\} = \{0\}$.

(3) τ 满射.

故 τ 同构 $\implies M$ 也自由.

综上, 得证. □

$\because M$ 自由, $\therefore M = \langle \langle v_1, \dots, v_n \rangle \rangle$,

又 $\because \{v_1, \dots, v_n\}$ 线性无关, \therefore 对 $i \neq j, \langle \langle v_i \rangle \rangle \cap \langle \langle v_j \rangle \rangle = \{0\} \implies M = \langle \langle v_1 \rangle \rangle \oplus \dots \oplus \langle \langle v_n \rangle \rangle$.

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 $M_{\text{free}} = \frac{M}{M_{\text{tor}}}$.

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),

证: 若 $\sum_{i=1}^t r_i u_i = 0$, 则 $\Pi(\sum_{i=1}^t r_i u_i) = \sum_{i=1}^t r_i \Pi(u_i) = \sum_{i=1}^t r_i [u_i] = 0$,

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. □

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 $M = M_{\text{free}} \oplus M_{\text{tor}}$:

$$\forall v \in M, \Pi(v) = [v] \in \frac{M}{M_{\text{tor}}} = \langle\langle [u_1], \dots, [u_t] \rangle\rangle \implies \Pi(v) = [v] = \sum_{i=1}^t l_i [u_i].$$

$$\text{令 } u = \sum_{i=1}^t l_i u_i \in M_{\text{free}}, \text{ 则 } \tau(u) = \tau\left(\sum_{i=1}^t l_i u_i\right) = \sum_{i=1}^t l_i \Pi(u_i) = \sum_{i=1}^t l_i [u_i] = \Pi(v).$$

$$\Pi(v - u) = \Pi(v) - \Pi(u) = 0 \implies v - u \in \ker \Pi = M_{\text{tor}},$$

$$\text{于是 } v = u + (v - u), \text{ 其中 } u \in M_{\text{free}}, v - u \in M_{\text{tor}} \implies M = M_{\text{free}} + M_{\text{tor}}.$$

$$\text{取 } w \in M_{\text{free}} \cap M_{\text{tor}}, \text{ 则 } w \in M_{\text{free}} \iff w = \sum_{i=1}^t \alpha_i u_i,$$

$$\text{且 } w \in M_{\text{tor}} \iff \Pi(w) = 0$$

$$\implies 0 = \Pi(w) = \Pi\left(\sum_{i=1}^t \alpha_i u_i\right) = \sum_{i=1}^t \alpha_i \Pi(u_i) \implies \alpha_1 = \dots = \alpha_t = 0 \implies w = 0 \implies M_{\text{free}} \cap M_{\text{tor}} = \{0\}.$$

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 $\mu = pq$, 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 $M = M_p + M_q$.

$$\text{若 } v \in M_p \cap M_q, \text{ 则 } v \in M_p \iff pv = 0,$$

$$\text{且 } v \in M_q \iff qv = 0$$

$$\implies v = 1v = (rp + tq)v = rpv + tqv = r0 + t0 = 0 + 0 = 0 \implies M_p = M_q = \{0\}.$$

$$\because M_p = \{v \mid pv = 0\}, \therefore \text{ann}(M_p) = \langle p \rangle, \text{ 易推广得 } M_{p_i} = \langle p_i^{e_i} \rangle.$$

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 由两个生成元时, 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 $J = \langle \langle t \rangle \rangle$.

$\because p^e u_2 = 0 \implies p^e \in J$, $\therefore p^e \in J \implies t \mid p^e$,

又 $\because p$ 不可约, $\therefore t = p^{e_2}$ 且 $e_2 \leq e$,

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 $v \in \langle \langle w \rangle \rangle \implies \exists r \in R$, $v = rw$

$\implies v = rw = ru_2 - r\beta u_1 \in \langle \langle u_1 \rangle \rangle$,

$\because r\beta u_1 \in \langle \langle u_1 \rangle \rangle$, $\therefore ru_2 \in \langle \langle u_1 \rangle \rangle$, (由 J 的定义) 即 $r = p^{e_2} r_1$,

回代得 $v = rw = p^{e_2} r_1 u_2 - p^{e_2} r\beta u_1 = p^{e_2} r_1 u_2 - p^{e_2} r_1 \beta u_1 = p^{e_2} r_1 u_2 - r_1 (\beta p^{e_2}) u_1 = r_2 (p^{e_2} u_2 - \alpha u_1) = r_2 0 = 0 \implies \langle \langle u_1 \rangle \rangle \cap \langle \langle w \rangle \rangle = \{0\}$. □

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 $M_{\text{free}} = \frac{M}{M_{\text{tor}}}$.

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 $\text{ann}(M_{p_i}) = \langle p_i^{e_i} \rangle$,

$M_{p_i} = \langle \langle v_i \rangle \rangle \oplus \cdots \oplus \langle \langle v_{it_i} \rangle \rangle$, 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,

$$\begin{array}{ccc} F^n & \xrightarrow{\tau'_A} & F^n \\ \uparrow \phi'_B & & \uparrow \phi'_B \\ V & \xrightarrow{\tau} & W \\ \downarrow \phi_B & & \downarrow \phi_B \\ F^n & \xrightarrow{\tau_A} & F^n \end{array}$$

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 $h(\tau) = \sum_j b_j \tau^j \in \mathcal{L}(V)$,

对于给定的 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 $V = V_{p_1} \oplus \dots \oplus V_{p_m} = \bigoplus_{i=1}^m \bigoplus_{j=1}^{t_i} \langle v_{ij} \rangle$, 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? 我们只要找到 V 的阶 μ , s.t. $\text{ann}(V) = \langle \mu \rangle$, $\mu = up_1^{e_1} \dots p_m^{e_m}$, 就可得到挠子模 V_{p_i} , s.t. $\text{ann}(V_{p_i}) = \langle p_i^{e_i} \rangle$ 及循环子模 $\langle v_{ij} \rangle$, 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 $\text{ann}(V_{p_i}) = \langle p_i^{e_i}(x) \rangle$,

$V_{p_i} = \langle v_{i1} \rangle \oplus \dots \oplus \langle v_{it_i} \rangle$, 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 $V = \bigoplus_{i=1}^m \bigoplus_{j=1}^{t_i} \langle v_{ij} \rangle$.

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 的线性子空间.

“ \impliedby ”: $\because S$ 是 V 的不变子空间, $\therefore \forall v, \tau(v) \in S \implies \forall i = 0, \dots, \dim V, \tau^i(v) \in S$,

$g(x)v + h(x)v = g(\tau)(v) + h(\tau)(v) = (\sum_i a_i \tau^i)(v) + (\sum_j b_j \tau^j)(v) = \sum_i (a_i + b_i) \tau^i(v) \in S$, 故 S 为 V 的子模. \square

$\because \langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$ 为 V 的 $F[x]$ 子模, $\therefore \langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$ 为不变子空间, 即 $\tau(\langle\langle v_{ij} \rangle\rangle) \subseteq \langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$, 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 $\langle\langle b_1 \rangle\rangle$ 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 $\langle\langle b_1, b_2 \rangle\rangle$ 是 τ 不变的, 即 $\tau(b_1) \in \langle\langle b_1, b_2 \rangle\rangle, \tau(b_2) \in \langle\langle b_1, b_2 \rangle\rangle$, 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 $\langle\langle v_1, \dots, v_k \rangle\rangle$ 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 $\langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$ 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 $\langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$, 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 $\langle\langle v \rangle\rangle$ 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: $\tau^m(v) = -[r_{m-1}\tau^{m-1}(v) + \cdots + r_1\tau(v) + r_0v]$,

$\implies \tau^{m+1}(v) = \tau(\tau^m(v)) = \tau(-[r_{m-1}\tau^{m-1}(v) + \cdots + r_1\tau(v) + r_0v])$

$= -[r_{m-1}\tau^m(v) + r_{m-2}\tau^{m-1}(v) + \cdots + r_1\tau^2(v) + r_0\tau(v)]$

$= -\{r_{m-1}[-r_{m-1}\tau^m(v) + \cdots + r_1\tau^2(v) + r_0\tau(v)] + r_{m-2}\tau^{m-1}(v) + \cdots + r_1\tau^2(v) + r_0\tau(v)\}$

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* 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 $\langle\langle v \rangle\rangle$: $\langle\langle v \rangle\rangle = \{h(x)v \mid h(x) \in F[x]\} = \{h(\tau)(v) \mid h(x) \in F[x]\}$,

$\forall h(\tau)v \in \langle\langle v \rangle\rangle$, 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 $\langle v_{ij} \rangle$ 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

$$[\tau]_{\mathcal{B}} = \bigoplus_{ij} C[p_i^{e_{ij}}(x)] = \begin{pmatrix} C[p_1^{e_{11}}(x)] & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & C[p_1^{e_{1t_1}}(x)] & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & C[p_m^{e_{m1}}(x)] \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & C[p_m^{e_{mt_m}}(x)] \end{pmatrix}.$$

定义 7.6 有理标准型: 上述线性变换的矩阵表示称为有理标准型.

$$n = \dim V = \sum_{ij} d_{ij} = \sum_{ij} \deg p_i^{e_{ij}}(x) = \deg \left[\prod_{ij} p_i^{e_{ij}}(x) \right].$$

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 $[\tau]_{\mathcal{B}'}$,

$$\text{则 } C_{[\tau]_{\mathcal{B}'}}(x) = \det(xI - [\tau]_{\mathcal{B}'}) = \det(xI - M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}[\tau]_{\mathcal{B}}M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}^{-1}) = \det(M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(xI - [\tau]_{\mathcal{B}})M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}^{-1}) = \det(M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}^{-1}M_{\mathcal{B}\mathcal{B}'}(xI - [\tau]_{\mathcal{B}})) = \det(xI - [\tau]_{\mathcal{B}}) = C_{[\tau]_{\mathcal{B}}}(x). \quad \square$$

$\because C_{\tau}(x) = \prod_{ij} p_i^{e_{ij}} = \prod_i p_i^{\sum_{j=1}^{t_i} e_{ij}}$, $m_{\tau}(x) = up_1^{e_1} \cdots p_m^{e_m}$, 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 $z^n + a_{n-1}z^{n-1} + \cdots + a_1z + a_0 = 0$
 $\implies f(\bar{z}) = \bar{z}^n + a_{n-1}\bar{z}^{n-1} + \cdots + a_1\bar{z} + a_0 = f(\bar{z}) = 0$, 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: 线性算子 $\tau \in \mathcal{L}(V)$, $\lambda \in F$, 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: $\text{spec}(\tau) \equiv \{\tau \text{ 的特征值}\}$.

$$(1) \tau(v) = \lambda v \iff \tau(v) - \lambda v = 0$$

$$\iff (\tau - \lambda)(v) = 0$$

$$\iff v \in \ker(\tau - \lambda)$$

$$(\because v \neq 0)$$

$$\iff \ker(\tau - \lambda) \neq 0$$

$$\iff (\tau - \lambda) \text{ 非单}$$

$$\iff (\tau - \lambda) \text{ 是退化的.}$$

(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 $f(x)$ 零化 v , 即 $f(\tau)(v) = 0 \implies f(x) \in \text{ann}(v)$,

又 $\because x - \lambda$ 不可约, $\therefore \text{ann}(v) = \langle x - \lambda \rangle$,

$\because \text{ann}(V) = \langle m_\tau(x) \rangle, \therefore \forall u \in V, m_\tau(x)(u) = 0 \implies m_\tau(v) = 0 \implies m_\tau(x) \in \text{ann}(v) = \langle x - \lambda \rangle \implies (x - \lambda) \mid m_\tau(x),$

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 $\{\lambda_1, \dots, \lambda_k\}$ 线性无关;
- (2) 若 $i \neq j$, $\mathcal{E}_i \neq \mathcal{E}_j = \{0\}$.

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, $\lambda_{k-1}[r(\lambda_1 - \lambda_k)v_1 + r_2(\lambda_2 - \lambda_k)v_2 + \dots + r_{k-1}(\lambda_{k-1} - \lambda_k)v_{k-1}] - \tau[r(\lambda_1 - \lambda_k)v_1 + r_2(\lambda_2 - \lambda_k)v_2 + \dots + r_{k-1}(\lambda_{k-1} - \lambda_k)v_{k-1}] = 0$,
 $r_1(\lambda_k - \lambda_1)(\lambda_{k-1} - \lambda_1)v_1 + r_2(\lambda_k - \lambda_2)(\lambda_{k-1} - \lambda_2)v_2 + \dots + r_{k-1}(\lambda_k - \lambda_{k-2})(\lambda_{k-1} - \lambda_{k-2})v_{k-2} = 0$,
 重复以上操作 $k-1$ 次得, $r_1(\lambda_2 - \lambda_1) \cdots (\lambda_k - \lambda_1)v_1 = 0$,
 $\because \lambda_1, \dots, \lambda_k$ 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: 首先证 $p(\text{spec}(\tau)) \subseteq \text{spec}(p(\tau))$: $\forall v \in \text{spec}(\tau)$, $\tau(v) = \lambda v \implies \tau^k(v) = \lambda^k v$,
 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 $f(x) = (x - r_1) \cdots (x - r_m)$, 其中 $r_i \in F$, 或有重复
 $\implies (\tau - r_1) \cdots (\tau - r_m)(v) = 0$, 其中 $r_i \in \text{spec}(\tau)$
 其中必 $\exists r_i$, s.t. $(\tau - r_i) \cdots (\tau - r_m)(v) = 0 \implies p(r_i) - \lambda = 0 \implies p(r_i) = \lambda$,
 $\implies \lambda \in p(\text{spec}(\tau))$, 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 $[\tau(b_1)]_{\mathcal{B}'_{ij}} = [\tau(v_{ij})]_{\mathcal{B}'_{ij}} = [(\tau - \lambda_i + \lambda_i)(v_{ij})]_{\mathcal{B}'_{ij}} = [(\tau - \lambda_i)(v_{ij}) + \lambda_i(v_{ij})]_{\mathcal{B}'_{ij}} = \begin{pmatrix} \lambda_i \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$, $[\tau(b_2)]_{\mathcal{B}'_{ij}} = [\tau(\tau - \lambda_i + \lambda_i)(v_{ij})]_{\mathcal{B}'_{ij}} = [(\tau - \lambda_i + \lambda_i)((\tau - \lambda_i)(v_{ij}))]_{\mathcal{B}'_{ij}} = [(\tau - \lambda_i)^2(v_{ij}) + \lambda_i(\tau - \lambda_i)(v_{ij})]_{\mathcal{B}'_{ij}} = \begin{pmatrix} 0 \\ \lambda_i \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$, \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 $\mathcal{B} = \bigcup_{ij} \mathcal{B}'_{ij}$ 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 $\mathcal{B}_{ij} = \{v_{ij}, \tau(v_{ij}), \cdots, \tau^{e_{ij}-1}(v_{ij})\}$ 亦为 $\langle v_{ij} \rangle$ 的一组基, $[\tau]_{\mathcal{B}=\bigcup_{ij} \mathcal{B}_{ij}}$ 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 $h(x)v = 0 \implies h(x) \in \text{ann}(v_{ij}) = \langle(x - \lambda_i)^{e_{ij}}\rangle$,

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 $h(x)v =$, 即 $h(\tau)v = (l_0 + l_0\tau + \dots + l_{e_{ij}-1}\tau^{e_{ij}-1})(v) = (l_0 + l_0((\tau - \lambda_i) + \lambda_i) + \dots + l_{e_{ij}-1}((\tau - \lambda_i) + \lambda_i)^{e_{ij}-1})(v)$ 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 $\deg r(x) < \deg(x - \lambda_i)^{e_{ij}-1} = e_{ij} - 1$,

$\implies h(x)v_{ij} = h'(x - \lambda_i)v_{ij} = (q(\tau - \lambda_i)(\tau - \lambda_i)^{e_{ij}} + r(\tau - \lambda_i))(v_{ij}) = q(\tau - \lambda_i)p(\tau - \lambda_i)(v_{ij}) + r(\tau - \lambda_i)(v_{ij})$, 其中 $\because (x - \lambda_i)^{e_{ij}-1} \in \text{ann}(v_{ij})$, $\therefore (\tau - \lambda_i)^{e_{ij}}(v_{ij}) = 0 \implies h(x)v_{ij} = r(\tau)(v_{ij})$ 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 $\in \mathcal{E}_{\lambda_i}$?

$\{(\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij}) \mid j = 1, \dots, t_i\} \subseteq \mathcal{E}_{\lambda_i}$, $\because V_{p_i} = \bigoplus_{j=1}^{t_i} \langle\langle v_{ij} \rangle\rangle$, $\therefore \{(\tau - \lambda_i)^{e_{ij}-1}(v_{ij}) \mid j\}$ 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 $e_{ij} = 1 \forall j \implies e_i = e_{i1} = 1$

$\implies m_\tau(\lambda) = (x - \lambda_1) \dots (x - \lambda_m)$,

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) $V_{p_i} = \mathcal{E}_i$, $V = \mathcal{E}_{\lambda_1} \oplus \dots \oplus \mathcal{E}_{\lambda_m}$.

(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).

$$\ker \rho_{ST} = T, \text{Im } \rho_{ST} = S, V = \ker \rho_{ST} + \text{Im } \rho_{ST}.$$

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 上的恒等变换).

(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 $v_{\ker} \in \ker \sigma, v_{\text{Im}} \in \text{Im } \sigma$

$$\Rightarrow \sigma(v) = \sigma(v_{\ker} + v_{\text{Im}}) = \sigma(v_{\ker}) + \sigma(v_{\text{Im}}) = \sigma(v_{\ker}) + 1(v_{\text{Im}}) = 0 + v_{\text{Im}}, \text{ 故 } \sigma \text{ 为 } \text{Im } \sigma \text{ 上沿 } \ker \sigma \text{ 的投影.}$$

□

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, $\forall v \in V, \rho(v) \in \text{Im } \rho$,

$$\therefore \rho(v - \rho(v)) = \rho(v) - \rho(\rho(v)) = \rho(v) - \rho^2(v) = 0, \therefore v = (v - \rho(v)) + \rho(v), \text{ 其中 } v - \rho(v) \in \ker \rho, \rho(v) \in \text{Im } \rho \implies V = \ker \rho \oplus \text{Im } \rho.$$

故 $V = \ker \rho + \text{Im } \rho$.

$$\text{又有 } \forall \rho(u) \in \text{Im } \rho, \rho(\rho(u)) = \rho^2(u) = \rho(u) \implies \rho|_{\text{Im } \rho} = 1|_{\text{Im } \rho},$$

由定理 8.7 得, 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 $\rho\sigma = \sigma\rho = 0$, 则称 ρ 与 σ 正交, 记作 $\rho \perp \sigma$.

$$\rho \perp \sigma \iff \forall v \in V, \rho\sigma(v) = \rho(\sigma(v)) = 0 \text{ 且 } \sigma\rho(v) = \sigma(\rho(v)) = 0 \iff \text{Im } \sigma \subseteq \ker \rho \text{ 且 } \text{Im } \rho \subseteq \ker \sigma.$$

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. $\rho_j(u) = v$

$\implies v = \rho_i(v) = \rho_i(\rho_j(u)) = \rho_i \rho_j(u) = 0 \implies \text{Im } \rho_i \cap (\sum_{j \neq i} \text{Im } \rho_j) = \{0\}$.

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 $v_i = \rho_i(v) \in S_i$

$\implies v = \rho_1(v) + \cdots + \rho_k(v) = (\rho_1 + \cdots + \rho_k)(v) \implies \rho_1 + \cdots + \rho_k = 1$.

$\forall v \in V, \rho_j(v) \in \text{Im } \rho_j = S_j \subseteq \sum_{j \neq i} S_i \implies \rho_j \rho_i(v) = \rho_j(\rho_i(v)) = 0$, 其中 $i \neq j \implies \rho_j \rho_i = 0$,

同理, $\rho_j \rho_i = 0$, 即 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 $\langle \cdot, \cdot \rangle : V \times V \rightarrow F$, $(u, v) \mapsto \langle u, v \rangle$ 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 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 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, $\tau \in \mathcal{L}(V)$,

(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: $\|v\| \equiv \sqrt{\langle v, v \rangle}$, 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) $\|u + v\|^2 = \langle u + v, u + v \rangle = \langle u, u \rangle + \langle u, v \rangle + \langle v, u \rangle + \langle v, v \rangle$, $\|u - v\|^2 = \langle u - v, u - v \rangle = \langle u, u \rangle - \langle u, v \rangle - \langle v, u \rangle + \langle v, v \rangle$,

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 $\|\cdot\| : V \rightarrow F, v \mapsto \|v\|$, 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 $\forall x \in X, y \in Y$, 有 $x \perp y$, 则称 X 与 Y 正交, 记作 $X \perp Y$.

(3) $X^\perp = \{v \in V \mid v \perp X\}$.

$$\langle 0, v \rangle = \langle 0 + 0, v \rangle = \langle 0, v \rangle + \langle 0, v \rangle \implies \langle 0, v \rangle = 0.$$

$\therefore 0 \in X^\perp, \therefore X^\perp$ 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) $\forall u, v \in X^\perp, \forall x \in X, \langle u, x \rangle = 0, \langle v, x \rangle = 0$
 $\implies \langle ru + tv, x \rangle = r\langle u, x \rangle + t\langle v, x \rangle = r \cdot 0 + t \cdot 0 = 0$
 $\implies ru + tv \in X^\perp$, 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, $\langle u_i, u_j \rangle = \delta_{ij}$, 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 $\{u_k \mid k \in K\}$ 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 $\because u_k \neq 0, \therefore \langle u_k, u_k \rangle \neq 0 \implies r_k = 0$

□

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

$$o_1 = v_1$$

再对 o_1, \dots, o_n, \dots 归一化, 得到正交归一集 $\mathcal{O} = \{o_1, \dots, o_n, \dots\}$, s.t. $\langle \mathcal{B} \rangle = \langle \mathcal{O} \rangle$.

定义 9.11 Hammett 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 Hammett 基.

例 9.5 Hilbert 基并非Hammett 基的例子(课本第3 版例9.5): □

定理 9.11 (课本定理9.11): \mathcal{O} 为正交归一集, $S = \langle \mathcal{O} \rangle$, $\forall v \in V$, 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 $u = \sum_{i=1}^k l_i u_i$,

$$\begin{aligned} v - u \perp S &\implies \forall u_j \in S, j = 1, \dots, k, \langle v - u, u_j \rangle = 0 \implies \langle v, u_j \rangle - \langle u, u_j \rangle = 0 \implies \langle v, u_j \rangle = \langle u, u_j \rangle = l_j \implies \\ u &= \sum_{i=1}^k l_i u_i = \sum_{i=1}^k \langle v, u_i \rangle u_i = \hat{v}. \end{aligned}$$

综上, 得证.

$$\begin{aligned} (2) \quad \forall w \in S, d^2(u, w) &= \|v - w\|^2 = \|v - \hat{v} + \hat{v} - w\|^2, \\ &\because \hat{v} \in S, w \in S, \therefore \hat{v} - w \in S, \\ \text{又 } &\because v - \hat{v} \perp S, \therefore v - \hat{v} \perp \hat{v} - w \\ \implies d^2(u, w) &= \|v - \hat{v}\|^2 + \|\hat{v} - w\|^2, \\ &\because \|\hat{v} - w\|^2 \geq 0, \therefore d^2(u, w) \geq \|v - \hat{v}\|^2 = d^2(v, \hat{v}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (3) \quad \|v\|^2 &= \|v - \hat{v} + \hat{v}\|^2, \\ &\because v - \hat{v} \perp S, \hat{v} \in S, \therefore v - \hat{v} \perp \hat{v}, \\ \text{由勾股定理, } &\|v - \hat{v}\|^2 + \|\hat{v}\|^2 \geq \|\hat{v}\|^2 \implies \|v\| \geq \|\hat{v}\|. \end{aligned}$$

□

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): S 为有限维子空间, 则

- (1) $S^{\perp\perp} = S$.
- (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, $S \subseteq S^{\perp\perp}$.

$\forall w \in S^{\perp\perp} \subseteq V, \because S$ 有限维, $\therefore V = S \odot S^\perp \implies w = w_S + w_{S^\perp} \implies w_S = w - w_{S^\perp}$,
 $0 = \langle w_S^\perp, w_S \rangle = \langle w_{S^\perp}, w - w_{S^\perp} \rangle = \langle w_{S^\perp}, w \rangle - \langle w_{S^\perp}, w_{S^\perp} \rangle$,
 $\because w \in S^{\perp\perp}, \therefore \langle w_{S^\perp}, w \rangle = 0 \implies \langle w_{S^\perp}, w_{S^\perp} \rangle = 0 \implies w_{S^\perp} = 0 \implies w = w_S \in S$, 故 $S^{\perp\perp} \subseteq S$.
 综上, 得证.

(2) $\because \dim\langle X \rangle < \infty, \therefore |X| < \infty$, 设 $X = \{u_1, \dots, u_k\}$.

$\forall w_1 \in \langle X \rangle, w_1 = \sum_{i=1}^k r_i u_i$,
 $\forall w_2 \in X^\perp, \langle w_1, w_2 \rangle = \langle \sum_{i=1}^k r_i u_i, w_2 \rangle = \sum_{i=1}^k r_i \langle u_i, w_2 \rangle = 0 \implies \langle X \rangle \subseteq X^{\perp\perp}$.
 $\forall w \in X^{\perp\perp}$, 令 w 在 $\langle X \rangle$ 上的最佳近似 $\hat{w} = \sum_{i=1}^k l_i u_i \in \langle X \rangle$,
 $\langle w - \hat{w}, w - \hat{w} \rangle = \langle w, w - \hat{w} \rangle - \langle \hat{w}, w - \hat{w} \rangle$,
 $\because w - \hat{w} \in \langle X \rangle^\perp, \hat{w} \in \langle X \rangle, \therefore \langle \hat{w}, w - \hat{w} \rangle = 0$,
 $\because w - \hat{w} \in X^\perp, w \in X^{\perp\perp}, \therefore \langle w, w - \hat{w} \rangle = 0$
 $\implies \langle w - \hat{w}, w - \hat{w} \rangle = 0 \implies w - \hat{w} = 0 \implies w = \hat{w} \in \langle X \rangle \implies X^{\perp\perp} \subseteq \langle X \rangle$.

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) Parseval 不等式: $\langle v, w \rangle = \sum_{i=1}^k \langle v, u_i \rangle \overline{\langle w, u_i \rangle}$, 即在定序基 \mathcal{O} 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)”: $V = \langle \mathcal{O} \rangle, \forall u \in \mathcal{O}^\perp \subseteq V, v = \sum_{i=1}^k l_i u_i$

$\because u \in \mathcal{O}^\perp, \therefore \forall i = 1, \dots, k, \langle u, u_i \rangle = 0,$

$0 = \langle u, u_j \rangle = \sum_{i=1}^k l_i \langle u_i, u_j \rangle = \sum_{i=1}^k l_i \delta_{ij} = l_j \implies u = \sum_{i=1}^k l_i u_i = 0.$

“(2) \implies (3)”: $v = v - \hat{v} + \hat{v}, \because \mathcal{O}^\perp = \{0\}, S^\perp \subseteq \mathcal{O}^\perp, \therefore S^\perp = \{0\} \implies V = S \odot S^\perp.$

□

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一向量的内积代替, 或对偶空间中的任一函数均可用一向量表示.

证: $\dim \text{Im } f \leq 1$. 若 $\dim \text{Im } f = 0$, 则 $f = 0 \implies x = 0$;

若 $\dim \text{Im } f \neq 0$, 则 $\dim \text{Im } f = 1, \exists 0 \neq u \in V, \text{ s.t. } f(u) \neq 0.$

$\because V = \ker f \oplus \text{Im } f$ 且 $\ker f^c \approx \text{Im } f, \therefore \dim \ker f^c = \dim \text{Im } f = 1,$

$\implies \ker f^c = \langle u \rangle \implies V = \langle u \rangle \odot \ker f,$

$\implies \langle u \rangle^\perp = \{0\} \implies f(\langle u \rangle^\perp) = 0$, 故 $V = \langle u \rangle \odot \langle u \rangle^\perp.$

$\because V = \langle u \rangle \odot \langle u \rangle^\perp, \therefore \forall v \in V, v = ru + w$, 其中 $w \in \ker f, f(v) = f(ru + w) = rf(u) + f(w) = rf(u),$

取 $x = \frac{\overline{f(u)}}{\langle u, u \rangle} u$, 则 $\langle v, x \rangle = \langle v, \frac{\overline{f(u)}}{\langle u, u \rangle} u \rangle = \frac{f(u)}{\langle u, u \rangle} \langle v, u \rangle = \frac{f(u)}{\langle u, u \rangle} \langle ru + w, u \rangle = \frac{rf(u)}{\langle u, u \rangle} \langle u, u \rangle = rf(u).$

□

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: $\mathcal{R} : V^* \rightarrow V, f \mapsto x, \text{ s.t. } f(v) = \langle v, x \rangle.$

(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) $\ker \mathcal{R} = \{f \in V^* \mid \mathcal{R}(f) = 0\} = \{f \in V^* \mid f(v) = \langle v, 0 \rangle = 0\} = \{0\}$, 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.