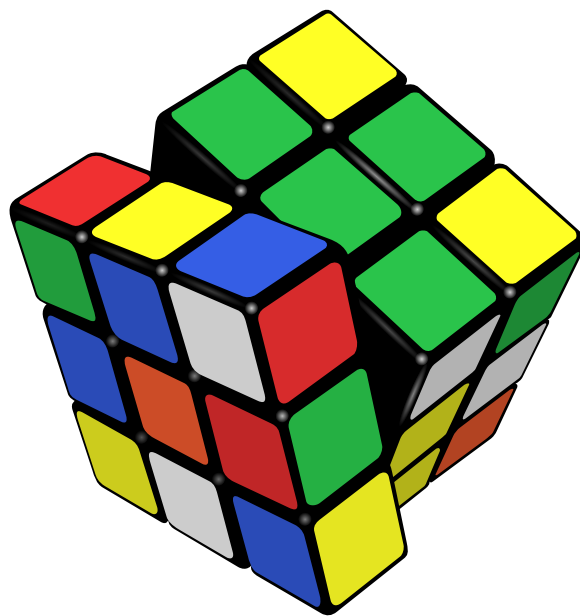


Algebra

Hoyan Mok¹

2020 年 8 月 20 日



¹E-mail: victoriesmo@hotmail.com

笔记说明

本笔记是笔者学习线性代数时的教材, 主要参考资料是 [2].

笔记假定读者已经熟悉朴素集合论的术语与符号, 并已经学习了以矩阵和行列式运算为主的初级线性代数. 但本笔记力求自足, 将矩阵与行列式运算, 置换和多项式等内容附在附录中, 以资读者在阅读正文时可以随时查阅.

笔记后附有符号列表和索引, 方便读者 (也是方便笔者自己) 查阅.

你可以在<https://github.com/HoyanMok/NotesOnMathematics/tree/master/Algebra>获得本笔记最新的 PDF 与 \TeX 源文档. 封面的来源是https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rubik%27s_cube.svg.

目录

笔记说明	i
目录	ii
第一部分 线性代数	1
第一章 群, 环, 域	2
§1 代数运算	2
§2 群	3
§3 环	7
§4 域	9
第二章 线性空间	11
§5 线性空间	11
§6 对偶空间	16
§7 多重线性型	18
第三章 线性算子	20
§8 线性映射	20
§9 线性算子代数	21
第四章 内积空间	25
第五章 张量	26
附录 A 置换	27
§1 置换群	27

目录	iii
附录 B 矩阵和行列式	30
§2 矩阵	30
§3 行列式	31
附录 C 多项式	33
§4 多项式环	33
§5 多项式的根	35
参考文献	36
符号列表	37
索引	39

第一部分

线性代数

第一章 群. 环. 域

§1 代数运算

Definition 1.1 (二元运算). 集合的 Cartesian 平方到自身的映射 $*$: $X^2 \rightarrow X$ 称为其上的一个二元运算. 通常我们记 $*(a, b) := a * b$. 当 X 上定义了二元运算 $*$ 后, 称 $*$ 定义了 X 上的一种代数结构 $(X, *)$, 也称代数系统.

当指代是明确的时候, 我们将混用集合及其代数结构.

作为习惯, 如果 $\cdot, + \in X^{X^2}$, 我们记 $ab := a \cdot b$ 并称其为 a 和 b 的积, 称 $a + b$ 为 a 和 b 的和. 这些只是约定.

若 $a * b = b * a$ 则称 $*$ 或 $(X, *)$ 是交换的, 而若 $(a * b) * c = a * (b * c)$ 则称 $*$ 或 $(X, *)$ 为结合的.

若 $\exists e \in X$ 满足 $\forall x \in A (e * x = x * e = x)$, 则称其为 $*$ 的一个单位元 (identity), 这时可把 $(X, *)$ 记作 $(X, *, e)$. 可以证明一个代数结构最多只有一个单位元. 乘法单位元通常记为 1, 而加法单位元 (也叫零元) 记为 0.

Definition 1.2 (半群和么半群). 若 $*$ 是结合的, 称 $(X, *)$ 是半群 (semigroup); 若 $*$ 还有一个单位元, 则称 $(X, *, e)$ 是么半群 (monoid).

倘若么半群 $(M, *, e)$ 是有限的 (即其元素有限), 称 $\text{card } M$ 为有限么半群的阶.

作为重要的例子, 置换么半群定义为 $(X^X, \circ, \text{id}_X)$, 有么半群结构的 X^X 通常记作 $M(X)$. 半群中, 括号的位置是不重要的 (可用数学归纳法证明). 通常我们记 $x_1 x_2 \cdots x_n$ 为:

$$\prod_{i=1}^1 x_i = x_1, \prod_{i=1}^{n+1} x_i = \left(\prod_{i=1}^n x_i \right) x_n; \quad (1-1)$$

同理 $x_1 + x_2 + \cdots + x_n$ 为:

$$\sum_{i=1}^1 x_i = x_1, \sum_{i=1}^{n+1} x_i = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) + x_n. \quad (1-2)$$

在半群不交换的场合, 指出递推式右端的顺序是重要的. 这种记法称为**左正规**.

若 $x := x_1 = x_2 = \cdots = x_n$, 记 $\sum_{i=1}^n x_i = nx$, $\prod_{i=1}^n x_i = x^n$, 分别表示 x 的 n 倍和 x 的 n 次幂. 它们满足:

$$nx + mx = (n + m)x, \quad n(mx) = nm x, \quad n, m \in \mathbb{N}_+; \quad (1-3)$$

$$x^n x^m = x^{n+m}, \quad (x^m)^n = x^{nm}, \quad n, m \in \mathbb{N}_+. \quad (1-4)$$

在么半群中, 还可以令 $x^0 = 1, 0x = 0$.

若半群 S 有子集 S' , 使得 $(S', *)$ 是半群, 那么称其为半群 $(S, *)$ 的**子半群**. 同理有么半群 M 的**子么半群** M' .

若半群 $(S, *, e)$ 的元素 a 满足 $\exists a' \in S (aa' = a'a = e)$, 那么称 a 为**可逆的** (invertible), a' 称为其**逆元** (inverse element) 或**逆** (inverse). 通常加法逆元记为 $-a$, 乘法逆元记为 a^{-1} , 且为可逆元素引入 na, a^n 的概念, 其中 $n \in \mathbb{Z}$. 当 n 为负数时, $na = -(-na), a^n = (a^{-n})^{-1}$.

因为群未必是 Abelian, 我们可以也用弱化的**左可逆** $\exists y \text{ s.t. } y * x = 1$ 或**右可逆**的概念.

§2 群

可逆么半群 G 称为**群**, 即:

Definition 2.1 (群). 设有集合 G . 若:

- G1) 定义了二元运算 $\cdot: G^2 \rightarrow G; (x, y) \mapsto xy$.
- G2) 结合性: $\forall x, y, z \in G, (xy)z = x(yz)$.
- G3) 单位元: $\exists e \in G \forall x \in G, xe = ex = x$.
- G4) 可逆性: $\forall x \in G \exists x^{-1} \in G, xx^{-1} = x^{-1}x = e$.

则称 (G, \cdot) 为**群**.

交换群又叫做 **Abelian 群**.

作为重要的例子, 设 X 是一个集合, $S(X) = \{f \in X^X \mid f \text{ 是双射}\}$. 我们断言, $(S(X), \circ, \text{id}_X)$ 是一个群, 称为**变换群**或**置换群**, 其中 \circ 是函数的复合, id_X 是恒等变换. 当它的阶数 $\text{card } X = n$ 是有限的时候, 记 $S_n := S(X)$.

群也有子群的概念. 设 (G, \cdot, e) 是一个群. 当一个集合 $G' \subset G$ 满足:

- SG1) $e \in G'$;
- SG2) $\forall x, y \in G', xy \in G'$;
- SG3) $x \in G' \rightarrow x^{-1} \in G'$,

则称 (G', \cdot, e) 是一个 G 的**子群**. 倘若还有 $G' \neq G$ 则称其为一个**真子群**¹.

¹[1] 等文献把平凡群 $\{e\}$ 也排在真子群的定义外.

Theorem 2.1. 非空的 G' 是群 $(G, \cdot, 1)$ 的子群 $\leftrightarrow \forall x, y \in G' (xy^{-1} \in G')$.

Proof. 根据子群的定义, \rightarrow 是显然的, 下给出 \leftarrow 的证明:

$$\text{SG1)} \quad \forall x \in G' (xx^{-1} = 1 \in G');$$

$$\text{SG2)} \quad \forall x, y \in G', x1^{-1}1y^{-1-1} = xy \in G';$$

$$\text{SG3)} \quad \forall x \in G', 1x^{-1} = x^{-1} \in G'.$$

□

这里将不加证明地给出:

Lemma 1. 群 G 的子群族 $\mathcal{H} = \{H \mid H \text{ 是 } G \text{ 的子群}\}$ 的交 $\cap \mathcal{H}$ 也是 G 的子群.

设 G 有子集 S , 我们说群 $(G, \cdot, 1)$ 是由 S 生成的, 意思是说 G 没有包含 S 的真子群. 记为 $G = \langle S \rangle$.

Theorem 2.2. $\langle S \rangle = \left\{ \prod_{i=0}^{n-1} s_i \mid \forall i \in n (s_i \in S \vee s_i^{-1} \in S) \right\}$.

Proof. 根据群的定义, 形如 $\prod_{i=0}^{n-1} s_i$ 的将构成一个群. 如果存在一个不能写成这种形式的元素, 那么它们将构成一个真子群, 这和 $\langle S \rangle$ 的定义相违背.

□

我们把半群的公式 (1-4) 推广到整数次幂, 证明在此忽略了.

Theorem 2.3. $\forall g \in G, \forall n, m \in \mathbb{Z}$,

$$g^m g^n = g^{m+n}, \quad (g^m)^n = g^{mn}. \quad (2-1)$$

Definition 2.2 (循环群). 设 $(G, \cdot, 1)$ 是一个乘法群, $\exists g_0 \in G$, 使得 $\forall g \in G, \exists n \in \mathbb{Z}, a^n = g$, 那么我们称它是一个循环群, g_0 是一个生成元 (generator), 并记作 $G = \langle g_0 \rangle$.

对于群 G 中任意元素 g , 我们称 $\text{card}\langle g \rangle$ 为元 g 的阶数, 或称 g 为 n 阶元. 而且它将满足:

Theorem 2.4. 任意群 G 中若有 $q \in \mathbb{Z}$ 阶元 g , 则 $\langle g \rangle = \{e, g, \dots, g^{q-1}\}$, 且:

$$g^n = e \leftrightarrow n = kq, \quad n \in \mathbb{Z}. \quad (2-2)$$

证明利用带余除法和定理 2.3, 证明是显然的. 从该定理, 我们可以论断: 循环群都是 Abelian 群.

Definition 2.3 (同构). 两个群 $(G, *)$, (G', \circ) 如若满足: $\exists f: G \rightarrow G'$ s.t.

$$\text{i)} \quad \forall a, b \in G, f(a * b) = f(a) \circ f(b);$$

ii) f 是双射,

则称 f 是一个**同构映射**或**同构** (isomorphism), 并认为两个群是互**相同构**的 (isomorphic), 记为 $G \simeq G'$.

同构关系的自反性, 传递性和对称性是平凡的.

Theorem 2.5. 设群 $(G, *, 1), (G', \circ, 1')$ 被 f 见证同构, 那么 $f(1) = 1'$.

Proof. $\forall g' \in G'$, 记 $g := f^{-1}(g')$, 那么 $f(g) \circ f(1) = f(g * 1) = g' = f(1 * g) = f(1) \circ f(g)$. 从而 $f(1) = 1'$. \square

Theorem 2.6. 设群 $(G, *, 1), (G', \circ, 1')$ 被 f 见证同构, 那么 $\forall g \in G, f(g^{-1}) = f(g)^{-1}$.

Proof. $f(g) \circ f(g^{-1}) = f(g * g^{-1}) = f(1) = 1' = f(g^{-1} * g) = f(g^{-1}) \circ f(g)$. \square

Theorem 2.7.

$$\text{card}\langle g_0 \rangle = \text{card}\langle g'_0 \rangle \rightarrow \langle g_0 \rangle \simeq \langle g'_0 \rangle.$$

Proof. 倘若 $\text{card}\langle g_0 \rangle = \infty$, 那么 $\nexists n \in \mathbb{Z} - \{0\}$, s.t. $g_0^n = e$; 这意味着, 存在这样的双射 $f: \mathbb{Z} \rightarrow \langle g_0 \rangle$, 满足 $f(n) = g_0^n$, 见证了 $(\mathbb{Z}, +, 0) \simeq (\langle g_0 \rangle, *, e)$.

如果阶数是有限的, 只需令 $f: g^k \rightarrow g'^k$, 其中 $k = 0, 1, \dots, \text{card}\langle g_0 \rangle$. \square

Theorem 2.8 (Cayley 定理). 设 $(G, *, e)$ 任意 n 阶有限群. $\exists H \subset S_0$ s.t. (H, \circ, id_X) 是 S_n 的子群且 $G \simeq H$.

Proof. 取 $H := \{L_g \mid g \in G\}$, 其中 $L_g: G \rightarrow G; g' \mapsto gg'$ 可以证明是双射. 那么 $L: G \rightarrow H; g \mapsto L_g$ 见证了 $H \simeq G$. \square

若 $\varphi: G \rightarrow G$ 见证了 $G \simeq G$ (如 id_G), 那么称 φ 是群 G 的一个**自同构** (automorphism). 所有自同构组成的集合 $\text{Aut}(G)$ 和其上的函数复合 \circ 构成了 $S(G)$ 的一个子群, 称为 G 的**自同构群**.

自同构群有一特殊的子群 $\text{Inn}(G) := \{I_a: g \mapsto aga^{-1} \mid a \in G\}$, 称为**内自同构群** (inner isomorphism), 其元素称为**共轭映射** (conjugation).

Definition 2.4 (共轭). 设 G 是一个群, $a, b \in G$. 如果 $\exists I_g \in \text{Inn}(G)$, 使得 $I_g(a) = b$, 那么我们称 a 和 b 互为**共轭** (conjugate).

我们毫不费力地就能证明共轭关系是等价关系, 而且当 G 是 Abelian 群的时候, 其任意元素的共轭都是其自身.

Definition 2.5 (共轭类). 设 G 是一个群. 由共轭规定的等价类称为**共轭类** (Conjugacy class), 记为 $\text{Cl}(g)$, g 为其代表元. 称 $\text{card}\{\text{Cl}(g) \mid g \in G\}$ 为 G 的**类数** (class number). 如果有一个函数 f 满足 $g' \in \text{Cl}(g) \rightarrow f(g) = f(g')$, 那么称 f 是一个**类函数** (class function).

Definition 2.6 (正规子群). 设 G 是一个群, N 是其子群. 倘若 $\forall I \in \text{Inn}(G), I(N) = N$, 即其在共轭映射下不变, 则称其为 G 的一个**正规子群** (normal subgroup), 记为 $N \triangleleft G$.

可以看出 Abelian 群的所有子群都是正规子群. 以下是正规子群的另一种定义方法:

Theorem 2.9.

$$N \triangleleft G \leftrightarrow \forall g, h \in G (gh \in N \leftrightarrow hg \in N).$$

Proof. 只需注意到 $I_g(gh) = g^{-1}ghg = hg$. □

Definition 2.7 (同态). 设有群 $(G, *, e)$ 和 (G', \circ, e') , 映射 $f: G \rightarrow G'$ 若满足

$$\forall a, b \in G, \quad f(a * b) = f(a) \circ f(b),$$

则称其为群 $(G, *)$ 到群 (G', \circ) 的一个**同态** (homomorphism), 也叫**态射** (morphism). 类似映射, 可定义**单态射** (monomorphism), **满态射** (epimorphism).

集合 $\ker f := f^{-1}(\{e'\})$ 叫做同态 f 的**核** (kernel). 群到自身的同态映射称为**自同态** (endomorphism).

同态 f 的核是 G 的正规子群, 即 $\ker f \triangleleft G$, 而 G 在同态下的像是 G' 的子群.

Theorem 2.10. 如果同态的核是平凡群 (即, $\ker f = \{e\}$), 那么这个同态是单的.

Proof. 如果 $\exists g_1, g_2 \in G$, s.t. $f(g_1) = f(g_2)$, 那么

$$f(g_1 * g_2^{-1}) = f(g_1) \circ f(g_2^{-1}) = f(g_1) \circ f(g_2)^{-1} \circ f(g_2) \circ f(g_2^{-1}) = e' \circ f(e) = e'$$

从而 $g_1 * g_2^{-1} \in \ker f$, 同理 $g_2^{-1} * g_1 \in \ker f$, 即 $g_1^{-1} = g_2^{-1}$ 或 $g_1 = g_2$, 即: f 是单的. □

作为例子, 映射

$$f: G \rightarrow \text{Inn}(G); g \mapsto I_g$$

满足同构的条件 i), 因 $f(a) \circ f(b) = I_{ab} = f(ab)$; 但它不一定是双射, 因而是一个同态.

Definition 2.8 (陪集). 设 $(G, *, e)$ 是一个群, S 是其子群, $g \in G$, 那么我们称 $g * S := \{g * s \mid s \in S\}$ 为 S 在 G 内的**左陪集** (left coset); 同理 $S * g := \{s * g \mid s \in S\}$ 为 S 在 G 内的**右陪集** (right coset). 这里我们称 g 是一个代表元. 如果 $g * S = S * g$, 则称其为**陪集**.

Theorem 2.11.

$$N \triangleleft G \leftrightarrow \forall g \in G, g * N = N * g.$$

Definition 2.9 (商群). 如果 $N \triangleleft G$, 那么我们记 $G/N := \{g * N \mid g \in G\}$, 称为 G 对 N 的商群. 这个群的乘法定义为子群元素的积的集合:

$$(g * N) \cdot (g' * N) := \{s * t \mid s \in g * N, t \in g' * N\} = (g * g') * N$$

, 单位元是 $e * N = N$ 自身.

§3 环

Definition 3.1 (环). 集合 R 非空, 其上定义了加法 $+$ 和乘法 \cdot , 且满足:

R1) $(R, +, 0)$ 是 Abelian 群;

R2) (R, \cdot) 是半群;

R3) 乘法对加法有分配律:

$$(a + b)c = ac + bc, \quad c(a + b) = ca + cb$$

对 $\forall a, b, c \in R$ 成立.

那么, 我们称 $(R, +, \cdot)$ 是一个环 (ring)². 而且称 $(R, +)$ 作其加法群, 称 (R, \cdot) 为其乘法半群. 倘若 (R, \cdot) 还有单位元 1, 那么我们称 $(R, +, \cdot)$ 为有单位元的环.

若环 R 非空的子集 L 满足

$$\forall x, y \in L (x - y \in L \wedge xy \in L),$$

则称 L 是 R 的一个子环.

若环的乘法半群是交换的, 则称这个环是一个交换环.

作为例子, $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ 是我们熟悉的整数环, $n\mathbb{Z} := \{nk \mid k \in \mathbb{Z}\}$ 是它的一个子环 ($n \in \mathbb{Z}$). 交换环 R 上的所有 n 阶方阵之集合 $M_n(R)$ 也是环.

Definition 3.2 (同态). 设 R 和 R' 是两个环, 有一个映射 f 对加法群和乘法半群都是同态 (保持运算), 即:

$$f(x)f(y) = f(xy), \quad f(x) + f(y) = f(x + y),$$

那么, 我们称其为 R 到 R' 的一个同态或态射, 集合 $\ker f := \{a \in R \mid f(a) = 0\}$ 称为同态的核. 同态 f 的核是 R 的子环. 类似地我们也有单同态, 满同态和同构的概念. 两个环同构记为 $R \cong R'$.

²如果 (R, \cdot) 不结合, 通常称非结合环.

设 $(R, +, \cdot)$ 是环, X 是一个集合, 在 R^X 上定义加法和乘法:

$$f + g: x \mapsto f(x) + g(x); \quad fg: x \mapsto f(x)g(x),$$

就得到了函数环 $(R^X, +, \cdot)$, 其零元是 $0_X: x \mapsto 0$. 如果 R 有单位元 1 , 那么 R^X 也有单位元 $1_X: x \mapsto 1, \forall x \in X$.

作为例子, 考虑到将 $[k]_n \in \mathbb{Z}/\equiv \bmod n$ 映射到 $n^{\mathbb{Z}} \ni \bmod n := \{(m, k) \in \mathbb{Z} \times m \mid n \equiv k \bmod n\}$ 的同构, 模 n 的剩余类环 $(\mathbb{Z}_n, +, \cdot)$ 即可看作函数环 $n^{\mathbb{Z}}$ 的一个交换子环, 其中 $\mathbb{Z}_n := \{[k]_n \mid k \in n\}$. 同构关系让我们也能用剩余类的代表元组成的集合 n 代替剩余类本身进行运算, 这种情况下, n 称为模 n 的剩余类的导出集, 我们能用法表和乘法表给出它的代数结构.

Definition 3.3 (整环). 环 R 中, $a \in R$, 如果 $\exists b \in R - \{0\}$ s.t. $ab = 0$, 则称 a 为环 R 的一个零因子; 类似则可定义右零因子³. 左零因子和右零因子统称零因子. 零元 0 则称为平凡零因子.

若非平凡的交换环 R 带单位元 $1 \neq 0$, 且没有非平凡零因子, 则称 R 是一个整环 (entire ring 或 integral domain).

也有将无非平凡左零因子的带单位的非平凡环称为 *domain* 的.

Theorem 3.1 (消去律). 设 R 是带单位元 $1 \neq 0$ 的交换环. 环 R 是整环 $\leftrightarrow \forall x, y, c \in R, cx = cy \wedge c \neq 0 \rightarrow x = y$.

Proof. 如果 R 满足消去律, 那么 $ab = 0 = 0b = a0$ 将给出 $a = 0 \vee b = 0$ 的论断; 如果 R 是整环, 那么 $cx = cy$ 即 $c(x - y) = 0$ 将得出 $c = 0 \vee x = y$; 倘若 $c \neq 0$, 那么这就是消去律. \square

有单位元的环 R 中元素 x 的可逆性往往指关于乘法的可逆性.

Theorem 3.2. 设 R 是带单位元 1 的环, $U(R) := \{x \in R \mid x \text{ 可逆}\}$ 是一个乘法群.

Proof. 单位元 1 当然可逆. 由定义可逆元素的逆也是可逆的. 如果 $x, y \in R$ 可逆, 那么

$$(xy)(y^{-1}x^{-1}) = x(yy^{-1})x^{-1} = xx^{-1} = 1 = y^{-1}x^{-1}xy = (xy)^{-1}(xy),$$

即 xy 可逆. \square

如果 $U(R) = R - \{0\}$, 那么我们称 R 是一个除环 (division ring), 也称斜域或反对称域 (skew field). 除环没有零因子.

³[1] 中把 0 排除在外了.

§4 域

交换除环 F 称为**域** (field)⁴. 群 $P^* = U(P)$ 称为域的乘法群. 如果 $y \neq 0$, 那么我们通常记 $x/y = \frac{x}{y} := xy^{-1}$.

我们可类似环, 定义同构和自同构. 同态的意义不大, 因为如果 F 到 F' 的同态 f 的核 $\ker f \neq \{0\}$, 那么 $\ker f = F$. 如果 F' 是域 F 的子环, 而且也是一个域, 则称其为 F 的一个**子域**, 反之称 F 为 F' 的一个**扩域**.

类似群的生成, 包含 $F \cup \{a\}$ 的最小 F 的扩域, 记为 $F(a)$. 如有理数域 \mathbb{Q} 的扩域 $\mathbb{Q}(\sqrt{2})$.

Theorem 4.1. 有限剩余类环 \mathbb{Z}_p 是域, 当且仅当 p 是素数.

Proof. 记 \mathbb{Z}_p 的元素为 $[0], [1], \dots, [p-1]$. 由素数的定义, $\forall [k] \in \mathbb{Z}_p^* := \mathbb{Z}_p - \{[0]\}$,

$$[k], [2k], \dots, [(p-1)k]$$

都不为 $[0]$, 而且两两不等. 进而, $\exists i \in \mathbb{N}_+$ s.t. $i < p \wedge [ik] = 1$. 又 \mathbb{Z}_p 是交换环, 可知这个 $[i] = [k]^{-1}$, 即 \mathbb{Z}_p 的乘法组成一个群. \square

出于 \mathbb{Z}_p 的这个性质, 我们也记其为 \mathbb{F}_p 或 $\text{GF}(p)$. 值得一提的是, p^n 元有限域 $\text{GF}(p^n)$ 也是存在的.

Corollary 1 (Fermat 小定理). 设 p 是素数, $a \in \mathbb{N}$ 且 $a \nmid p$.

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}.$$

Proof. 当 $[k] \in \mathbb{Z}_p^*$ 时, $I_{[k]}: \mathbb{Z}_p^* \rightarrow \mathbb{Z}_p^*; [n] \mapsto [kn]$ 如定理 4.1 是 $S(\mathbb{Z}_p^*)$ 的元素. 从而:

$$\left(\prod_{k=1}^{p-1} [k] \right) [a]^{p-1} = \prod_{k=1}^{p-1} [k].$$

因为域都是整环, 满足消去律 3.1, 从而 $[a]^{p-1} = [1]$. \square

Definition 4.1 (素域). 若域 P 不含任何非平凡真子域, 则称其为**素域** (prime field).

Lemma 2. \mathbb{Q} 和 \mathbb{Z}_p 是素域.

Proof. 让集合 $\{0, 1\}$ 对加法, 减法, 乘法和除法封闭, 我们将得到 \mathbb{Q} 或 \mathbb{Z}_p 的导出集 p , 取决于 1 在加法群中的阶数. \square

⁴作为总结: 域上定义了加法和乘法, 加法是 Abelian 群, 乘法是 Abelian 幺半群, 而且零元以外的元素都关于乘法可逆, 最后, 乘法对加法有分配律.

Theorem 4.2. 任意非平凡域 F 必含且只含一个素子域 P , 而且它将同构于 \mathbb{Q} 或 \mathbb{Z}_p , 其中 p 是素数.

Proof. 若有两个素子域, 它们的交必然也是 F 的子域, 根据素域的定义, 这个交不可能是真子域, 从而这两个素域相等. 这就保证了, 如果存在这么一个素子域 P , 它一定是唯一的. 接下来我们研究它的存在性.

定义 \mathbb{Z} 到 F 的同态 $f(n) = ne$, 其中 e 是 F 的单位元. 其核为 $\ker f = m\mathbb{Z}$, 其中 $m \in \mathbb{N}$.

如果 $m = 0$, 那么 $ne \neq o$, 其中 o 是 F 的零元, 只要 $n \neq 0$. 考虑 f 在 \mathbb{Q} 上的扩张, 可以证明 $P := f(\mathbb{Q}) = \{ne \mid n \in \mathbb{Z}\}$ 即构成了与 \mathbb{Q} 同构的素子域.

如果 $m \neq 0$, 那么 $m = p$ 是素数. 如果 m 不是素数, 假设它有两个 (m 和 1 以外的) 因数 a, b , $abe = o$ 意味着 $ae = o$ 或 $be = o$ (定理 3.1), 将与 $\ker f = m\mathbb{Z}$ 矛盾. 考虑 f 在 p (作为 \mathbb{Z}_p 的导出集) 上的限制, $P := \{o, e, 2e, \dots, (p-1)e\}$ 即构成了与 \mathbb{Z}_p 同构的素子域. \square

在刚才的证明中, 我们已经遭遇了:

Definition 4.2 (特征). 设域 F 的单位元和零元分别是 e, o . 若存在 $p \in \mathbb{N}$ 使得 $pe = o$, 则称 p 为域的特征 (characteristic), 记为 $\text{char}(F) = p$; 特别地, 定义 $\text{char}(F) = 0$, 如果不存在这样的 p .

第二章 线性空间

§5 线性空间

Definition 5.1 (线性空间). 设 \mathbb{F} 是一个域, $(V, +, \mathbf{0})$ 是一个 Abelian 群. 如果定义标量乘积运算: $\mathbb{F} \times V \rightarrow V; (\lambda, \mathbf{x}) \mapsto \lambda \mathbf{x}$ 且满足:

- 1) $1\mathbf{x} = \mathbf{x}, \forall \mathbf{x} \in V$ (酉性);
- 2) $(\alpha\beta)\mathbf{x} = \alpha(\beta\mathbf{x}), \forall \alpha, \beta \in \mathbb{F}, \forall \mathbf{x} \in V$;
- 3) $(\alpha + \beta)\mathbf{x} = \alpha\mathbf{x} + \beta\mathbf{x}, \forall \alpha, \beta \in \mathbb{F}, \forall \mathbf{x} \in V$;
- 4) $\lambda(\mathbf{x} + \mathbf{y}) = \lambda\mathbf{x} + \lambda\mathbf{y}$,

那么, 我们称 V 是 \mathbb{F} 上的一个线性空间, 或称向量空间, 其元素称为向量, 相对而言 \mathbb{F} 的元素则被称为纯量.

通常我们称 $(\mathbf{x}_i)_{i \in I}$ 为向量组, I 是指标集.

Definition 5.2 (线性组合). 设 V 是 \mathbb{F} 上的线性空间. 倘若 $\forall i \in n, \lambda_i \in \mathbb{F}, \mathbf{x}_i \in V, n$ 是正整数, 那么

$$\sum_{i \in n} \lambda_i \mathbf{x}_i$$

称为向量组 $(\mathbf{x}_i)_{i \in n}$ 的一个系数为 $(\lambda_i)_{i \in n}$ 的线性组合, $i \in n$.

可数向量甚至不可数个向量之和的研究, 将在泛函分析中得到更加细致的讨论.

Definition 5.3 (线性包络). 设 V 是 \mathbb{F} 上的线性空间, $(\mathbf{x}_i)_{i \in n}$ 是其中的一个向量组, n 是正整数. 其线性包络 (linear span) 定义为

$$\langle \mathbf{x}_i \rangle_{i \in n} = \left\{ \sum_{i \in n} \lambda_i \mathbf{x}_i \mid (\lambda_i)_{i \in n} \in \mathbb{F}^n \right\}.$$

或者, 设 $M \subset V$, 那么其线性包络定义为

$$\langle M \rangle = \left\{ \sum_{i \in n} \lambda_i \mathbf{x}_i \mid n \in \mathbb{N}, \forall i \in n (\lambda_i \in \mathbb{F} \wedge \mathbf{x}_i \in M) \right\}.$$

Definition 5.4 (子空间). 设 V' 是 \mathbb{F} 上的线性空间 V 的加法子群, 且对标量乘积封闭, i.e. $\forall \mathbf{x} \in V', \forall \lambda \in \mathbb{F}, \lambda \mathbf{x} \in V'$, 那么, 我们称 V' 是 V 的一个 (线性) 子空间.

显然 $\langle M \rangle$ 对 $\forall M \in 2^V$ 都是 V 的子空间 (而且是包含 M 的最小的那个), 从而我们也说这种情况下 $\langle M \rangle$ 是 M 张出 (span) 或生成的线性空间.

Definition 5.5 (线性相关). 设 V 是 \mathbb{F} 上的线性空间, 其中有线性组 $(\mathbf{x}_i)_{i \in n}$. 若 $\exists (\alpha_i)_{i \in n} \in \mathbb{F}^n$ s.t. $\exists i \in n (\alpha_i \neq 0)$ 且

$$\sum_{i \in n} \alpha_i \mathbf{x}_i = \mathbf{0},$$

那么称向量组 $(\mathbf{x}_i)_{i \in n}$ 是线性相关的. 反之则称它们线性无关或线性独立.

Theorem 5.1. 向量组 $(\mathbf{x}_i)_{i \in n}$ 是线性相关的, 当且仅当 $\exists i \in n$ s.t.

$$\exists (\beta_j)_{j \in n - \{i\}} \in 2^{\mathbb{F}} \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{x}_i = \sum_{j \in n - \{i\}} \beta_j \mathbf{x}_j.$$

Proof. 证明此定理只需取 i 使得见证线性相关的线性组合中 \mathbf{x}_i 的系数不为 0 即可. □

Definition 5.6 (维数). 设 V 是 \mathbb{F} 上的线性空间. 若 $\exists n \in \mathbb{N}$, 满足

$$n = \max\{r \mid \exists (\mathbf{x}_i)_{i \in r} \text{ s.t. 它们是线性独立的}\},$$

那么称 n 是 V 的维数, 记为 $\dim V = n$, V 是 n 维线性空间. 倘若不存在这样的 n , 则 V 是无穷维线性空间.

特别地, $\dim\{\mathbf{0}\} = 0$.

Definition 5.7 (基底). 设 V 是 \mathbb{F} 上的 n 线性空间, $(\hat{\mathbf{e}}_i)_{i \in n}$ 倘若线性无关, 则称其为 V 的一组基底. 特别地, 如果 $\dim V = 0$, 空集 \emptyset 是它的一组基底.

因为基底的顺序并不重要, 有时我们也有基底向量的集合 $\{\hat{\mathbf{e}}_i\}_{i \in n}$ 表示它.

Theorem 5.2 (唯一分解). 设 V 是 \mathbb{F} 上的 n 线性空间, $(\hat{\mathbf{e}}_i)_{i \in n}$ 是其一组基底. 那么 $\forall \mathbf{v} \in V$, $\exists! (v_i)_{i \in n}$ (称为 \mathbf{v} 在基底 $(\hat{\mathbf{e}}_i)_{i \in n}$ 下的坐标), s.t.

$$\mathbf{v} = \sum_{i \in n} v_i \hat{\mathbf{e}}_i.$$

Proof. 唯一性只需要假定有两组分解, 相减并利用基底的线性独立性即可证明. 下面只证存在性: 根据维数的定义, $(\mathbf{v}, \hat{\mathbf{e}}_0, \dots, \hat{\mathbf{e}}_{n-1})$ 线性相关, 从而 $\exists \alpha \in \mathbb{F} \exists (\alpha_i)_{i \in n} \in \mathbb{F}^n$ s.t. $(\alpha, \alpha_0, \dots, \alpha_{n-1})$ 不全为 0 且

$$\alpha \mathbf{v} + \sum_{i \in n} \alpha_i \hat{\mathbf{e}}_i = \mathbf{0},$$

考虑到基底的线性独立性, $\alpha \neq 0$, 由域的可逆性, 我们得出了一组线性组合系数 $(-\alpha_i/\alpha)_{i \in n}$. \square

根据这个定理, 我们断言线性空间 V 的基底 $(\hat{e}_i)_{i \in n}$ 张出 V 本身, i.e. $V = \langle \hat{e}_i \rangle_{i \in n}$.

若 v 在基底 $\hat{e} = (\hat{e}_i)_{i \in n}$ 下的坐标为 $(v_i)_{i \in n}$, 记之为 $v|_{\hat{e}}$.

Corollary 2. 设 V' 是 V 的子空间. 如果 $V' \subsetneq V$, 那么 $\dim V' < \dim V$.

Corollary 3. 如果线性无关的向量组 $(e_j)_{j \in n}$ 满足 $\forall j \in n, e_j \in \langle f_i \rangle_{i \in m}$, 那么 $n \leq m$.

我们称一个向量组中, 如果存在 r 个线性无关的向量, 且所有 $r+1$ 个向量都线性相关, 则我们称 r 为向量组的秩 (rank), 而那 r 个线性无关的向量是最大线性无关组. 我们接下来证明这样的最大线性无关组总是存在, 而且其个数等于向量组张出的线性空间之维数:

Theorem 5.3. 设 $(x_j)_{j \in m}$ 是线性空间 V 的向量组.

$$\dim \langle x_j \rangle_{j \in m} = r \leftrightarrow \exists \{x_{j_k}\}_{k \in r} \in 2^{\{x_j\}_{j \in m}} ((x_{j_k})_{k \in r} \text{ 是最大线性无关组}).$$

Proof. 由维数的定义, $r+1$ 个线性无关的向量将不可能张出维数为 r 的线性空间. 倘若不存在 r 个线性无关向量, 在 $\langle x_j \rangle_{j \in m}$ 中取出一组基底共 r 个线性无关的向量, 这是违背推论 3 的. 因而, 最大线性无关组总是存在, 而且其个数等于向量组张出的线性空间之维数. \square

Theorem 5.4 (Steintz 替换). 设 V 是 \mathbb{F} 上的 n 线性空间, $(\hat{e}_i)_{i \in n}$ 是其一组基底. 任意线性无关组 $(\hat{f}_i)_{i \in s}$, 都可从基底中取出 $(\hat{e}_{i_k})_{i_k \in n, k \in t}$ 使得

$$(\hat{f}_0, \dots, \hat{f}_{s-1}, \hat{e}_{i_0}, \dots, \hat{e}_{i_{t-1}})$$

是 V 的一组基底.

Proof. 取 i_0 使得 $\hat{e}_{i_0} \notin \langle \hat{f}_i \rangle_{i \in s}$; 接着取 i_{k+1} 使得 $\hat{e}_{i_{k+1}} \notin \langle \hat{f}_0, \dots, \hat{f}_{s-1}, \hat{e}_{i_k} \rangle$, 直到不能进行下去, 剩下的基底全部都可由前面的向量组线性表出, 令此时 $k = t-1$. 从而: V 中任何向量都可由基底 $(\hat{e}_i)_{i \in n}$ 表出, 从而也就可以由 $(\hat{f}_0, \dots, \hat{f}_{s-1}, \hat{e}_{i_0}, \dots, \hat{e}_{i_{t-1}})$ 表出, 从而 $s+t \geq n$.

另一方面, 不难通过归纳得知, $(\hat{f}_0, \dots, \hat{f}_{s-1}, \hat{e}_{i_0}, \dots, \hat{e}_{i_{t-1}})$ 是线性无关的, 由维数的定义, 我们断言 $t+s \leq n$. 即 $t+s = n$, 我们已然得到 V 的一组基底了. \square

设 \mathbb{F} 上的 n 维线性空间有两组基底 $\hat{e} = (\hat{e}_j)_{j \in n}$, $\hat{f} = (\hat{f}_i)_{i \in n}$, 考虑定理 5.2, 我们写出:

$$\hat{f}_i = \sum_{j \in n} a_{ji} \hat{e}_j, \quad \forall i \in n. \quad (5-1)$$

这里的 a_{ji} 决定了矩阵

$$\mathbf{A} = (a_{ij})_{i,j \in n} = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & \cdots & a_{0,n-1} \\ a_{10} & a_{11} & \cdots & a_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n-1,0} & a_{n-1,1} & \cdots & a_{n-1,n-1} \end{pmatrix}. \quad (5-2)$$

矩阵 (5-2) 被称为 \hat{e} 到 \hat{f} 的一个**转换矩阵**. 值得注意的是下标的位置 (这与有限维向量空间的线性映射的矩阵差了一个转置, 见 §8). 让我们引入矩阵和与积的概念¹, 用 \hat{f} 把 \hat{e} 表出, 就可以得到转换矩阵的逆 \mathbf{A}^{-1} . 这两个矩阵之间的关系是 $\mathbf{A}\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{A} = \mathbf{I}$.

设 $\mathbf{v} \in V$,

$$\mathbf{v} = \sum_{i \in n} v_i \hat{e}_i = \sum_{i \in n} v'_i \hat{f}_i = \sum_{i \in n} v'_i \sum_{j \in n} a_{ji} \hat{e}_j$$

那么,

$$\mathbf{v}|_{\hat{e}} = \left(\sum_{j \in n} a_{ij} v'_j \right)_{i \in n}$$

或 $\mathbf{v}|_{\hat{e}} = \mathbf{A} \mathbf{v}|_{\hat{f}}$. 同理 $\mathbf{v}|_{\hat{f}} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{v}|_{\hat{e}}$.

Definition 5.8 (同构). 如果 \mathbb{F} 上的线性空间 V, W 之间存在 $f: V \rightarrow W$ s.t.

1) f 是双射;

2) $\forall \alpha, \beta \in \mathbb{F}, \forall \mathbf{u}, \mathbf{v} \in V, f(\alpha \mathbf{v} + \beta \mathbf{u}) = \alpha f(\mathbf{v}) + \beta f(\mathbf{u})$,

那么, 两个线性空间被认为是**同构**的.

我们指出同构关系具有等价关系的性质, 并且将基底映射到基底, 并保持维数, 这里不再一一验证了. 类似地, 我们建立线性空间**同态**的概念, 即保持线性结构的映射, 双同态即是同构. 线性空间 V 到 U 的同态集记作 $\mathcal{L}(V, U)$.

Theorem 5.5. 所有 \mathbb{F} 上的 n 维线性空间都同构于 (坐标空间) \mathbb{F}^n .

Proof. 任取 \mathbb{F} 上的 n 维线性空间 V 中的向量 \mathbf{v} 和一组基底 \hat{e} , 向量 \mathbf{v} 到它的坐标 $\mathbf{v}|_{\hat{e}} \in \mathbb{F}^n$ 都是一个同构. \square

线性空间的交依然是线性空间, 但是它们的并却不一定.

Definition 5.9 (子空间的和). 设 U, W 都是 V 的子空间, 定义²

$$U + W := \langle U \cup W \rangle = \{\mathbf{u} + \mathbf{w} \mid \mathbf{u} \in U, \mathbf{w} \in W\}$$

为 U 和 W 的**和**. 若 $U \cap W = \emptyset$, 那么记 $U \oplus W := U + W$, 称为**直和**.

¹本笔记不想再重复了, 请参见任意一本初等线性代数教材, 或 [1].

²这里不用 $+$ 表示集合的并.

Theorem 5.6 (*Grassmann 恒等式*).

$$\dim(U + W) = \dim U + \dim W - \dim(U \cap W).$$

Proof. 设 $\dim(U \cap W) = m$, 有基底 $\hat{e} = (\hat{e}_i)_{i \in m}$, $\dim U = k$, $\dim W = \ell$. 由定理, $\dim U$ 可取基底 $(\hat{e}_0, \dots, \hat{e}_{m-1}; \hat{f}_0, \dots, \hat{f}_{k-m-1})$, $\dim V$ 可取基底 $(\hat{e}_0, \dots, \hat{e}_{m-1}; \hat{g}_0, \dots, \hat{g}_{\ell-m-1})$, 那么

$$U + W = \langle \hat{e}_0, \dots, \hat{e}_{m-1}; \hat{f}_0, \dots, \hat{f}_{k-m-1}; \hat{g}_0, \dots, \hat{g}_{\ell-m-1} \rangle.$$

接下来我们证明向量组

$$\hat{e}_0, \dots, \hat{e}_{m-1}; \hat{f}_0, \dots, \hat{f}_{k-m-1}; \hat{g}_0, \dots, \hat{g}_{\ell-m-1}$$

线性独立. 若存在非平凡的线性组合:

$$\sum_{s \in m} \varepsilon_s \hat{e}_s + \sum_{i \in k-m} \varphi_i \hat{f}_i + \sum_{j \in \ell-m} \gamma_j \hat{g}_j = \mathbf{0},$$

但是前两项是 U 中的元素, 第三项是 W 中的元素, 这将说明它们都属于 $U \cap W$, 这意味着第三项可用 \hat{e} 表出, 这是一个矛盾. \square

Corollary 4. 若 $U = \sum_{i \in m} U_i$ 是直和, 当且仅当:

$$\dim U = \sum_{i \in m} \dim U_i.$$

Proof. 利用 Grassmann 恒等式 5.6 和数学归纳法易证. \square

Theorem 5.7. 域 \mathbb{F} 上的 n 维线性空间 V 的任意 m 维线性子空间 U , 都能找到 V 的线性子空间 W 使得 $V = U \oplus W$ (称 V 和 W 是互补的子空间).

Proof. 证明用 Steintz 替换 5.4 即可. \square

记 $\text{codim } U = \dim V - \dim U$.

当 L 是 V 的一个子空间时, 我们记线性空间作为加法群的陪集 $\mathbf{x} + L := \{\mathbf{x} + \mathbf{y} \mid \mathbf{y} \in L\}$, 并记其代表元为. 考虑到线性空间作为加法群是 Abelian 群, 其所有子群 (子空间蕴含了加法子群) 都是正规子群, 从而:

Definition 5.10 (商空间). 域 \mathbb{F} 上的线性空间 V 有子空间 L , 记线性空间作为加法群的商群 V/L , 并在 $\mathbb{F} \times V/L$ 上定义标量乘法:

$$\alpha(\mathbf{x} + L) := \alpha\mathbf{x} + L,$$

那么称 V/L 是一个商空间. 不难验证商空间是一个线性空间.

我们记商空间上的同余等价类:

$$\boldsymbol{x} \equiv \boldsymbol{x}' \pmod{L} \leftrightarrow \boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}' \in L.$$

Theorem 5.8. 设 V 的子空间 U 和 W 互余, 那么

$$f: W \rightarrow V/U; \boldsymbol{w} \mapsto \boldsymbol{w} + U$$

见证了 W 和 V/U 的同构.

Proof. 映射 f 对线性结构的保持是平凡的.

设 $\boldsymbol{v} + U \in V/U$. 因为 $V \oplus U = W$, $\exists \boldsymbol{u} \in U, \exists \boldsymbol{w} \in W$ s.t. $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{u} + \boldsymbol{w}$. 从而

$$\boldsymbol{v} + U = (\boldsymbol{u} + \boldsymbol{w}) + U = (\boldsymbol{u} + U) + (\boldsymbol{w} + U) = U + (\boldsymbol{w} + U) = \boldsymbol{w} + U = f(\boldsymbol{w}),$$

所以 f 是满的. 满射 f 的单性由

$$\ker f = \{\boldsymbol{w} \in W \mid f(\boldsymbol{w}) = U\} = \{\boldsymbol{w} \in W \mid \boldsymbol{w} \in U\} = W \cap U = \{\mathbf{0}\}$$

保证. □

§6 对偶空间

Definition 6.1 (线性型). 设 V 是一个域 \mathbb{F} 上的线性空间. 同态 $f: V \rightarrow \mathbb{F}$ 被称为 V 上的一个线性型 (linear form). 在不同的情景, 它也可能被称作线性泛函 (linear functional), 线性函数等.

作为 n 维有限维空间的例子, 设有线性型 ℓ , 它作用于 $\boldsymbol{x} \in V$ 时, 设基底为 \hat{e} , 那么:

$$\ell: \boldsymbol{x} \mapsto \ell|_{\hat{e}} \boldsymbol{x}|_{\hat{e}},$$

其中 $\ell|_{\hat{e}}$ 是 $1 \times n$ 的行向量. 坐标变换到 \hat{f} 时, 设转换矩阵是 \boldsymbol{P} , 那么:

$$\ell|_{\hat{e}} \boldsymbol{x}|_{\hat{e}} = \ell|_{\hat{e}} \boldsymbol{P} \boldsymbol{x}|_{\hat{f}} = \ell|_{\hat{f}} \boldsymbol{x}|_{\hat{f}},$$

即:

$$\ell|_{\hat{f}} = \boldsymbol{P} \ell|_{\hat{e}}. \quad (6-1)$$

定义线性型的线性组合 $\alpha f + \beta g$ 为:

$$(\alpha f + \beta g)(\boldsymbol{x}) := \alpha f(\boldsymbol{x}) + \beta g(\boldsymbol{x}), \quad \forall \boldsymbol{x} \in V \forall \alpha, \beta \in \mathbb{F}.$$

如此我们注意到 V 上所有的线性型构成了一个线性空间, 其中零元是 $0_V: \boldsymbol{x} \mapsto 0$.

Definition 6.2 (对偶空间). 线性空间 V 上所有的线性型构成线性空间 V^* , 称为 V 的**对偶空间** (dual space), 线性组合和零元已定义如前. 通常对偶空间的元素可称为**余向量** (covector), 或**共变向量** (covariant vector, 与此同时, V 的元素对应地称为**反变向量**, contravariant vector).

为区别两种向量, 有用 x^i 表示反变向量而用 ℓ_i 表示共变向量, 并引入 Einstein 求和约定的, 见之后第 5 章.

我们继续以 n 维线性空间为例子. 设 V 中有基底 $\hat{e} = (\hat{e}_i)_{i \in n}$, 取 V^* 的基底 $\hat{e}^* := (\hat{e}_i^*)_{i \in n}$, 使得 $\hat{e}_i^*(\hat{e}_j) = \delta_{ij}$, 其中 δ_{ij} 是 Kronecker 符号, 当且仅当 $i = j$ 时取值为 1, 否则为 0.

不难证明它们是线性独立的, 而且能线性表示所有余向量. 这组基底称为**对偶基底**. 而且作为推论:

Theorem 6.1. 设 V 是有限维线性空间, 那么

$$\dim V^* = \dim V.$$

考虑到 $V^{**} := (V^*)^*$ 和 V 的维数也当相同, 它们之间应该存在同构关系. 这个同构有一个自然的构造:

Theorem 6.2 (自然同构). 设 V 是 n 维线性空间, 映射 $\varepsilon: V \rightarrow V^{**}$ 定义如下:

$$\mathbf{x} \mapsto \varepsilon_{\mathbf{x}}; \quad \varepsilon_{\mathbf{x}}: V^* \rightarrow \mathbb{F}; f \mapsto f(\mathbf{x}).$$

映射 ε 是一个同构.

Proof. 事实 $\varepsilon \in \mathcal{L}(V, V^{**})$ 的验证是枯燥的. 这里我们只证明它是个双射:

选取 V 的基底 $\hat{e} = (\hat{e}_i)_{i \in n}$, 就能立马得出结论 $\hat{\varepsilon} = (\varepsilon_{\hat{e}_i})_{i \in n}$ 是 V^{**} 的基底. \square

这个同构被称为**自然同构**, 这样得到的 $\hat{e}^* = (e_i^*)_{i \in n}$ 被称为 \hat{e} 的**对偶基底**.

Lemma 3. 设 L 是 n 维线性空间 V 的子空间, $\hat{f} := (f_i)_{i \in n}$ 是对偶空间 V^* 的一组基底. 倘若 $(f_i|_L)_{i \in n}$ 表示基底各自在 L 上的限制, 那么 $L^* = \langle f_i|_L \rangle_{i \in n}$.

Proof. 首先, 显然 $\langle f_i|_L \rangle_{i \in n} \subseteq L^*$. 设 $r := \dim L$, $\hat{e} := (\hat{e}_i)_{i \in r}$ 是 L 的基底. 由定理 5.4, 将其扩充至 V 的基底 $(\hat{e}_i)_{i \in n}$.

$\forall f \in L^*$, 取线性型 $\tilde{f} := \sum_{i \in n} \beta_i f_i \in V^*$ 满足 $\forall i' \leq r, \tilde{f}(\hat{e}_{i'}) = 0$. 显然 $f = \tilde{f}|_L = \sum_{i \in n} \beta_i f_i|_L$. \square

Lemma 4. 设线性空间 V 中有线性相关的向量组 $(\mathbf{x}_j)_{j \in m}$, 而 $\forall i \in m, f_i \in V^*$. 那么:

$$\det(f_i(\mathbf{x}_j))_{i,j \in m} = 0.$$

Proof. 根据定理 5.1, $\exists j_0 \in m$ 使得 \mathbf{x}_{j_0} 是其他 $(\mathbf{x}_j)_{j \in m; j \neq j_0}$ 的线性组合. 根据行列式的性质, 将 j_0 列减去其他各列 ($j \neq j_0$) 乘上线性组合的系数 λ_j , 不改变行列式的值, 但该行变成了

$$f_i(\mathbf{x}_{j_0}) - \sum_{j \in m; j \neq j_0} \alpha_j f_i(\mathbf{x}_j) = f_i \left(\mathbf{x}_{j_0} - \sum_{j \in m; j \neq j_0} \alpha_j \mathbf{x}_j \right) = f_i(\mathbf{0}) = 0.$$

这给出了 $\det(f_i(\mathbf{x}_j))_{i,j \in m} = 0$ 的证明. \square

Lemma 5. 设 V 是 n 维线性空间, 而 $\hat{f} := (f_i)_{i \in n}$ 是对偶空间 V^* 的一组基底. 向量组 $(\mathbf{x}_j)_{j \in n}$ 线性无关当且仅当

$$\det(f_i(\mathbf{x}_j))_{i,j \in n} \neq 0.$$

Proof. 由引理 4, 我们已经证明了行列式非零则线性无关. 反过来, 若线性无关, 取 $\hat{e} = \hat{f}^*$ 即 \hat{f} 的对偶基底. 考虑到 $\hat{x} = (\mathbf{x}_j)_{j \in n}$ 也是一组基底, 那么存在转换矩阵 P , 而且它的行列式恰是 $\det(f_i(\mathbf{x}_j))_{i,j \in n}$. 转换矩阵是可逆的, 它的行列式非零. \square

Theorem 6.3. 设 V 是 n 维线性空间, 而 $\hat{f} := (f_i)_{i \in n}$ 是对偶空间 V^* 的一组基底. 那么 V 的子空间 $\langle \mathbf{x}_j \rangle_{j \in m}$ 的维数 r 等于

$$(f_i(\mathbf{x}_j))_{i \in n, j \in m}$$

的最大非零子式的阶数.

Proof. 由引理 4, 阶数比 r 大的子式必为 0, 我们只需证明有 r 阶非零子式.

取 $(\mathbf{x}_j)_{j \in m}$ 中的一组线性无关组 $(\mathbf{x}_{j_k})_{k \in r}$, 再在 $\hat{f}|_{\langle \mathbf{x}_j \rangle_{j \in m}}$ 中取出线性无关组 $(\bar{f}_k)_{k \in r} := (f_{i_k}|_{\langle \mathbf{x}_j \rangle_{j \in m}})_{k \in r}$ (引理 3), 引理 5 告诉我们

$$\det(\bar{f}_i(\mathbf{x}_{j_k}))_{i,k \in r} \neq 0.$$

\square

Corollary 5. 设 V 是 n 维线性空间, 有基底 \hat{e} , 向量组 $(\mathbf{x}_j)_{j \in m}$ 的维数等于矩阵 $(\mathbf{x}_j|_{\hat{e}})_{j \in m}$ 的最大非零子式的阶数.

Proof. 在定理 6.3 中令 $\hat{f} = \hat{e}^*$ 即可. \square

§7 多重线性型

Definition 7.1 (多重线性型). 设 $V_0, V_1, \dots, V_{p-1}, U$ 是 \mathbb{F} 上的线性空间. 若映射

$$f: \prod_{i \in p} V_i \rightarrow U$$

满足 $\forall i \in p$,

$$\forall (\mathbf{a}_j)_{j \in p; j \neq i} \in \prod_{j \in p; j \neq i} V_j, \quad f_i: V_i \rightarrow U; \quad \mathbf{x} \mapsto f(\mathbf{a}_0, \dots, \mathbf{a}_{i-1}, \mathbf{x}, \mathbf{a}_{i+1}, \dots, \mathbf{a}_{p-1}) \in \mathcal{L}(V_i, U),$$

则称 f 是 V_0, \dots, V_{p-1} 上的**多重线性型**, 或 **p -线性型**. 这些多重线性型的集合记为 $\mathcal{L}(V_0, \dots, V_{p-1}; U)$.

如 $V_0 = V_1 = \dots = V_{p-1}$, 那么我们记 V^p 上的多重线性型的集合为 $\mathcal{L}_p(V; U)$. 当 $U = \mathbb{F}$ 时, 我们也可省略 \mathbb{F} 不写.

Definition 7.2 (对称与反对称). 若 V, U 是 \mathbb{F} 上的线性空间, $f \in \mathcal{L}_p(V, U)$. 如果 $\forall \pi \in S_p$, $\forall (\mathbf{x}_i)_{i \in p} \in V^p$,

$$f(\mathbf{x}_{\pi(i)})_{i \in p} = f(\mathbf{x}_i)_{i \in p},$$

那么我们称 f 为**对称的**. 如 $\forall \pi \in S_p$, $\forall (\mathbf{x}_i)_{i \in p} \in V^p$,

$$f(\mathbf{x}_{\pi(i)})_{i \in p} = \varepsilon_\pi f(\mathbf{x}_i)_{i \in p},$$

那么我们称 f 为**反对称的**.

我们可以给出行列式的公理化构造, 它在实数上的计算方法我们已经在线性代数课程中非常熟悉了:

Definition 7.3 (行列式). 设 \mathbb{F} 是一个域. 多重线性型 $\det \in \mathcal{L}_n(\mathbb{F})$ 若满足:

- 1) \det 是反对称的;
- 2) $\det \mathbf{I} = 1$, 其中 $\mathbf{I} = (\delta_{ij})_{i,j \in n}$,

记方阵 $\mathbf{X} := (\mathbf{x}_i)_{i \in n}$, 则称 $\det \mathbf{X}$ 是 \mathbf{X} 的**行列式**.

第三章 线性算子

§8 线性映射

Definition 8.1 (线性映射). 设 V, W 是域 \mathbb{F} 上的线性空间. 如映射 $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V, W)$, 即 \mathcal{A} 是 V 到 W 的一个同态, 那么我们称 \mathcal{A} 是 V 到 W 的一个**线性映射**, 并称其为**线性的**. 特别地, 如果它还是自同态, 我们称其为**线性变换**¹或**线性算子**.

Theorem 8.1. 设 $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V, W)$, 倘若 $(v_i)_{i \in s} \in V^s$,

$$f(\langle v_i \rangle_{i \in s}) = \langle f(v_i) \rangle_{i \in s}.$$

Corollary 6. 设 $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V, W)$, 而 U 是 V 的有限维子空间, 那么 $\dim f(U) \leq \dim U$.

我们将指出, 我们在这里所说的线性映射在某基底下可表为矩阵. 设 V, W 分别是 m, n 维线性空间, 给定各自的基底 \hat{e}, \hat{f} , 那么我们可以用矩阵

$$\mathcal{A}|_{\hat{e}, \hat{f}} := \mathbf{A} = (a_{ij})_{i \in n, j \in m} = \left(f(\hat{e}_j)|_{\hat{f}} \right)_{j \in m} \quad (8-1)$$

来表示 $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V, W)$.

Theorem 8.2. 由式 (8-1) 决定的线性映射和 \mathbb{F} 上的 $m \times n$ 矩阵是一一对应的, 且:

$$(\mathcal{B} \circ \mathcal{A})|_{\hat{e}, \hat{g}} = \mathbf{B}\mathbf{A}, \quad (8-2)$$

其中 $\mathcal{A}: V \rightarrow U, \mathcal{B}: U \rightarrow W, V, U$ 和 W 分别有基底 \hat{e}, \hat{f} 和 \hat{g} .

Proof. 由线性映射到矩阵的单性由式 (8-1) 易证 (意思是, 只需假定有两个线性映射共用矩阵, 它们将由 5.2 得出是同一个映射). 而满性只需验证由 $f(v)|_{\hat{f}} = \mathbf{A} v|_{\hat{e}}$ 决定的映射是 $\mathcal{L}(V, W)$ 的元素.

¹也有将线性映射统称为线性变换的.

同态的复合依然是同态是显然的 (可以进行枯燥的验证, 但没必要). 式 (8-2) 则由下式给出:

$$(\mathcal{B} \circ \mathcal{A})(v)|_{\hat{g}} = \mathcal{B}(\mathcal{A}(v))|_{\hat{g}} = B \mathcal{A}(v)|_{\hat{f}} = BA v|_{\hat{e}}.$$

□

Definition 8.2 (秩). 设 $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V, W)$, 记 $\text{rank } \mathcal{A} := \dim \mathcal{A}(V)$ 为线性映射 \mathcal{A} 的秩. 同时我们称 $\dim \ker \mathcal{A}$ 为其亏数或零化度 (nullity).

Theorem 8.3. 若 V, W 都是有限维向量空间. 任取它们分别的基底 \hat{e}, \hat{f} , 都有 $\text{rank } \mathcal{A} = \text{rank } A$, 其中 $A = \mathcal{A}|_{\hat{e}, \hat{f}}$.

Proof. 由定义式 (8-1), 矩阵的列向量组将张出 $\mathcal{A}(V)$. 由 5.3, 这就给出了我们的定理². □

Theorem 8.4. 设 V 是域 \mathbb{F} 上的有限维线性空间, W 是域 \mathbb{F} 上的线性空间, $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V, W)$, 那么

$$\dim \ker \mathcal{A} + \dim \mathcal{A}(V) = \dim V.$$

Proof. 记 $\dim V = n, \dim \mathcal{A} = r, \dim \ker \mathcal{A} = k$.

取 $\ker \mathcal{A}$ 的一组基底 $(\hat{e}_i)_{i \in k}$ (显然 $k \leq n$), 并将它扩充为 V 的基底 \hat{e} (我们又用了 Steintz 替换原则 5.4). 考虑到 $\mathcal{A}(V) = \langle \mathcal{A}(\hat{e}_i) \rangle_{i \in n}$. 但 $\langle \mathcal{A}(\hat{e}_i) \rangle_{i \in k} = \{0\}$. 利用 \mathcal{A} 的线性, 我们给出 $\forall (\lambda_i)_{i \in n} \in \mathbb{F}^n$:

$$\sum_{i \in n} \lambda_i \mathcal{A}(\hat{e}_i) = \sum_{i \in n \wedge i \notin k} \lambda_i \mathcal{A}(\hat{e}_i) + \mathcal{A} \left(\sum_{i \in k} \lambda_i \hat{e}_i \right) = \sum_{i \in n \wedge i \notin k} \lambda_i \mathcal{A}(\hat{e}_i).$$

即是: $(\mathcal{A}(\hat{e}_i))_{i \in n \wedge i \notin k}$ 将构成 $\mathcal{A}(V)$ 的一组基底. 从而:

$$r + k = n.$$

□

在 $\mathcal{L}(V, W)$ 上定义加法和数乘, 可以验证它是一个线性空间.

§9 线性算子代数

域 \mathbb{F} 上的线性空间 V 的自同态 $\mathcal{L}(V, V)$ 可记作 $\mathcal{L}(V)$ 或 $\text{End}(V)$. 如前已述, 它的元素唤作线性算子. 给定 n 维线性空间 V 的一组基底 \hat{e} (同时作为定义域和到达域的基底), $\mathcal{L}(V)$ 的

²矩阵的秩的最大非零子式定义和列向量组定义等价已由推论 5 保证.

元素可用 n 阶方阵表示. 其中恒等变换 id_V 对应的矩阵通常记作 \mathbf{I} , 即 n 阶单位阵. 零映射记为 $\mathcal{O}: \mathbf{x} \mapsto \mathbf{0}$.

习惯上记 $\mathcal{A}\mathbf{x} := \mathcal{A}(\mathbf{x})$, $\mathcal{A}\mathcal{B} := \mathcal{A} \circ \mathcal{B}$.

Definition 9.1 (逆算子). 设 $\mathcal{A}, \mathcal{B} \in \mathcal{L}(V)$. 若

$$\mathcal{A}\mathcal{B} = \mathcal{B}\mathcal{A} = \text{id}_V,$$

则称它们互为**逆算子**, 记 $\mathcal{A} = \mathcal{B}^{-1}$ 或 $\mathcal{B} = \mathcal{A}^{-1}$.

Theorem 9.1. 设 V 是有限维线性空间, $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V)$.

$$\exists \mathcal{B} \in \mathcal{L}(V) (\mathcal{A} = \mathcal{A}^{-1}) \leftrightarrow \text{rank } \mathcal{A} = \dim V \leftrightarrow \ker \mathcal{A} = \{\mathbf{0}\}.$$

Proof. 利用定理 8.4 立刻就能证明. □

Definition 9.2 (代数). 如果一个环 A 同时是域 \mathbb{F} 上的线性空间, 而且数乘满足:

$$\forall \lambda \in \mathbb{F} \forall \mathcal{A}, \mathcal{B} \in A (\lambda(\mathcal{A}\mathcal{B}) = (\lambda\mathcal{A})\mathcal{B} = \mathcal{A}(\lambda\mathcal{B})),$$

那么我们称 A 是 \mathbb{F} 上的一个**代数** (algebra)³. 若 A' 同时作为 A 的子环和子空间, 那么 A' 是 A 的一个子代数.

在这个意义上, $\mathcal{L}(V)$ 被称为**线性算子代数**.

多项式环 $\mathbb{F}[X]$ 即是 \mathbb{F} 上的无穷维代数的例子, 而它在 $X = \mathcal{A} \in \mathcal{L}(V)$ 时的取值, 即 $\mathbb{F}[\mathcal{A}]$ (我们记 $\mathcal{A}^0 := \text{id}_V$), 可以验证是 $\mathcal{L}(V)$ 的子代数.

考虑到 \mathbb{F} 是交换的, $\mathbb{F}[\mathcal{A}]$ 也是交换的.

Definition 9.3 (极小多项式). 设 V 是域 \mathbb{F} 上的线性空间, $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V)$, $P(X) \in \mathbb{F}[X]$. 如果 $P(\mathcal{A}) = \mathcal{O}$, 那么称多项式 $P(X)$ **零化** 线性算子 \mathcal{A} . 首项系数为 1 的零化 \mathcal{A} 的多项式称为其**极小多项式**, 可记为 $\mu_{\mathcal{A}}(X)$.

Theorem 9.2 (极小多项式存在). 设 V 是域 \mathbb{F} 上的 n 维线性空间. $\forall \mathcal{A} \in \mathcal{L}(V)$, 都存在极小多项式 $\mu_{\mathcal{A}}(X)$, 且 $\deg \mu_{\mathcal{A}}(X) = \dim \mathbb{F}[\mathcal{A}]$.

Proof. 考虑到 $\mathbb{F}[\mathcal{A}]$ 是 $\mathcal{L}(V)$ 的子代数, $\dim \mathbb{F}[\mathcal{A}] \leq \dim \mathcal{L}(V)$.

如果次数 $< n^2 + 1$ 的非零多项式 $P(X)$ 都不能零化 \mathcal{A} , 我们即可说: $\text{id}_V, \mathcal{A}, \dots, \mathcal{A}^{n^2+1}$ 的任意非平凡线性组合都不为 0, 我们在维数小于 n^2 维的线性空间里找到了 $n^2 + 1$ 个线性无关的向量, 这显然是不可能的. □

³实际上这里是结合的, 有单位元的代数. 出于简单在本部分我们还是径直称其为代数.

Theorem 9.3 (极小多项式唯一). 设 V 是域 \mathbb{F} 上的线性空间, $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V)$. 若 $P(X) = X^n + \sum_{i \in n} p_i X^i$, $Q(X) = X^n + \sum_{i \in n} q_i X^i$ 都是 \mathcal{A} 的极小多项式, 那么 $(p_i)_{i \in n} = (q_i)_{i \in n}$.

Proof. 因为 $\mathbb{F}[\mathcal{A}]$ 是一个代数, $P(\mathcal{A}) - Q(\mathcal{A}) = \sum_{i \in n} (p_i - q_i) \mathcal{A}^i = \mathcal{O}$. 我们得到了一个能零化 \mathcal{A} 次数小于 n 的多项式. 如果它不是零多项式, 记 $m = \deg(P(X) - Q(X))$, 那么 $\frac{1}{p_m - q_m} \sum_{i \in n} (p_i - q_i) X^i = \mathcal{O}$ 将是一个首项为 1 的零化 \mathcal{A} 但其次数小于极小多项式的次数, 这是违背极小多项式的定义的. \square

Theorem 9.4 (可逆算子与极小多项式的常数项). 设 V 是域 \mathbb{F} 上的 n 维线性空间, $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V)$, 其极小多项式是 $\mu_{\mathcal{A}}(X)$. 算子 \mathcal{A} 可逆当且仅当 $\mu_{\mathcal{A}}$ 的常数项非零.

Proof. 如果极小多项式常数项为 0, 即 $\mu_{\mathcal{A}}(X) = \sum_{i \in n - \{0\}} p_i X^i$, 那么由线性空间的分配律与方幂的分解,

$$\mathcal{A} \left(\sum_{i \in n - \{0\}} p_i \mathcal{A}^{i-1} \right) = \mathcal{O}.$$

由极小多项式的定义, $\sum_{i \in n - \{0\}} p_i \mathcal{A}^{i-1} \neq \mathcal{O}$. 那么, $\exists \mathbf{x} \in V$, $\sum_{i \in n - \{0\}} p_i \mathcal{A}^{i-1} \mathbf{x} \in \ker \mathcal{A} - \{\mathbf{0}\}$, 这表明 $\text{rank } \mathcal{A} < n$, 即不可逆.

如果极小多项式常数项不为 0,

$$\mathcal{A} \frac{1}{-p_0} \left(\sum_{i \in n - \{0\}} p_i \mathcal{A}^{i-1} \right) = \text{id}_V,$$

给出了 \mathcal{A} 的逆. \square

Theorem 9.5 (化零算子的多项式是极小多项式的倍式). 设 V 是域 \mathbb{F} 上的线性空间. 能零化 $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V)$ 的多项式 $P(X) \in \mathbb{F}[X]$ 一定是 $\mu_{\mathcal{A}}(X)$ 的倍式.

Proof. 作带余除法 $P(X) = Q(X)\mu_{\mathcal{A}}(X) + R(X)$, 其中 $\deg R(X) < \deg \mu_{\mathcal{A}}(X)$. 如果 $R(X) \neq 0$, 那么 $R(\mathcal{A}) = P(\mathcal{A}) - Q(\mathcal{A})\mu_{\mathcal{A}}(X) = \mathcal{O}$ 说明 $R(X)$ 是次数比 $\mu_{\mathcal{A}}(X)$ 还小的能化零 \mathcal{A} 的多项式, 这与极小多项式的定义是矛盾的. \square

Definition 9.4 (幂零算子). 设 V 是域 \mathbb{F} 上的线性空间. 线性算子 $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V)$ 如果满足 $\exists m \in \mathbb{N}_+$ 使得 $\mathcal{A}^m = \mathcal{O}$, 那么称其是一个**幂零算子** (nilpotent operator). 数 $d := \min\{m \in \mathbb{N}_+ \mid \mathcal{A}^m = \mathcal{O}\}$ 则被称为幂零算子的**幂零指数**.

由域作为零环的性质, 我们很容易验证 (只需要显式设出极小多项式):

Theorem 9.6 (幂零算子的极小多项式). 设 V 是域 \mathbb{F} 上的线性空间. 若 $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V)$ 的幂零指数为 d , 那么其极小多项式就是 X^d .

通过枯燥的运算可以得出:

Theorem 9.7 (线性算子在不同基底下的矩阵). 设 V 是域 \mathbb{F} 上的 n 维线性空间. 若 \mathbf{A} 和 \mathbf{A}' 分别是 $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V)$ 在基底 \hat{e} 和 \hat{e}' 下的矩阵, 那么:

$$\mathbf{A}' = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{P},$$

其中 \mathbf{P} 是 \hat{e} 到 \hat{e}' 的转换矩阵.

也就是说: 相似矩阵是同一线性算子在不同基底下的坐标表示. 借相似关系, 行列式和迹的性质:

Theorem 9.8 (不变量). 设 $\mathbf{A}, \mathbf{A}' \in M_n(\mathbb{F})$. 设 V 是域 \mathbb{F} 上的 n 维线性空间. 若 \mathbf{A} 和 \mathbf{A}' 分别是 $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(V)$ 在基底 \hat{e} 和 \hat{e}' 下的矩阵, 那么:

$$\det \mathbf{A} = \det \mathbf{A}', \quad \operatorname{tr} \mathbf{A} = \operatorname{tr} \mathbf{A}'.$$

如此我们可以径直称 $\det \mathcal{A} := \det \mathbf{A}$ 为线性算子的**行列式** (determinant), 而不必指出基底; 而 $\operatorname{tr} \mathcal{A} := \operatorname{tr} \mathbf{A}$ 为线性算子的**迹** (trace).

第四章 内积空间

第五章 张量

附录 A 置换

§1 置换群

置换群 S_n 的定义已在正文的 §2 中给出, 我们在此重复一遍: 有限集 $n \in \mathbb{N}_+$ 上的置换群 S_n 定义为 n^n 中的双射的集合, 乘法定义为函数的复合, 单位元是 id_n .

不难证明 $\text{card } S_n = P_n^n = n!$.

设 $\pi \in S_n$. 元素 $i, j \in n$ 如果满足 $\exists k \in \mathbb{N}, \pi^k(i) = j$, 那么我们称 i 和 j 是 π -等价的. 不难证明这是等价关系, 而且把 n 分成等价类 $\{n_k\}_{k \in p}, p \in \mathbb{N}_+$. 每个等价类 n_k 称为置换 π 的轨道, 其元素个数 $\ell_k := \text{card } n_k$ 称为轨道 n_k 的长度.

为方便, 我们定义 π_k 为:

$$\pi_k(i) = \begin{cases} \pi(i) & i \in n_k \\ \text{id}_n & i \notin n_k \end{cases},$$

我们得到了 $\pi = \prod_{k \in p} \pi_k$, 这是轨道间不相交的结论.

若置换 π 至多只有一个轨道的长度大于 1 i.e. $\exists k_0 \in p \forall k \in p (k \neq k_0 \rightarrow \ell_k = 1)$, 我们称这个置换为**轮换**或**循环**, 并径直称 ℓ_{k_0} 为这个轮换的**长度**. 轮换 π 可记为 $(\pi^k(i))_{k \in \ell_{k_0}}$ 其中 $i \in n_{k_0}$. 不难验证 i 在 n_{k_0} 中的选择无关紧要. 我们记 $\text{id}_n = (0)$. 当 $\ell_{k_0} = 2$ 时, 我们也称轮换 π 为对换.

我们称两个轮换**不相交**, 如果它们的长度 ≤ 2 , 且最长轨道不相交.

以上的叙述可以总结为:

Theorem 1.1. 置换群 S_n 中的每一个置换, 要么是 id_n , 要么存在唯一的不相交长度 ≤ 2 的轮换的集合 $\{\pi_k\}_{k \in p}$, 使得 $\pi = \prod_{k \in p} \pi_k$.

Theorem 1.2. 置换群 S_n 中的每一个置换 π 都可写为对换 $(\sigma_k)_{k \in q}$ 的乘积, 即 $\pi = \prod_{k \in q} \sigma_k$ ¹.

而且, 倘若存在 $(\sigma'_k)_{k \in q'}$ 也满足 $\pi = \prod_{k \in q'} \sigma'_k$, 那么 $q \equiv q' \pmod{2}$.

¹注意, 这时不可对调 σ_k 间的位置.

Proof. 因为每个长为 r 的轮换都可写成:

$$(\pi^k(i))_{k \in r} = \prod_{k \in r} (i, \pi^{r-k}(i)),$$

则由定理 1.1, 每一个置换都可以写成对换的乘积.

我们先证明, 若 $\text{id}_n = \prod_{k \in q} \sigma_k$, 其中 $\forall k \in q, \sigma_k$ 是对换, 那么 $q \equiv 0 \pmod{2}$.

我们用递归的方法证明这点. 设 $\sigma_{q-1} = (S, T)$, $S, T \in n$. 为方便, 我们记 $p := \max\{k \mid \sigma_k = (S, t), t \in n\}$. 令 $(\sigma'_k)_{k \in q} := (\sigma_k)_{k \in q}$, $\sigma'_p := (S, t)$.

除非出现以下情况:

- a) $p = 0$.
- b) $p \neq 0$ 但 $\sigma'_{p-1} = (S, t)$.

否则, 不断重复下列过程:

- 1) 如果 $\sigma_{p-1} = (S, r)$, 其中 $r \neq t$: 由于

$$(S, r)(S, t) = (S, t, r) = (t, r, S) = (t, S)(t, r) = (S, t)(t, r),$$

那么重新令

$$\sigma'_{p-1} = (S, t), \sigma'_p = (t, r) \text{ 其他不变,}$$

将仍然满足 $\text{id}_n = \prod_{k \in q} \sigma'_k$. 执行 4).

- 2) 如果 $\sigma_{p-1} = (t, r)$: 由于

$$(t, r)(S, t) = (t, S, r) = (r, t, S) = (r, S)(r, t) = (S, r)(r, t),$$

那么重新令

$$\sigma'_{p-1} = (S, r), \sigma'_p = (r, t) \text{ 其他不变,}$$

将仍然满足 $\text{id}_n = \prod_{k \in q} \sigma'_k$. 执行 4).

- 3) 如果 $\sigma_{p-1} = (r, u)$, 其中 $\{r, u\} \cap \{S, t\} = \emptyset$: 由于

$$(r, u)(S, t) = (S, t)(r, u),$$

那么重新令

$$\sigma'_{p-1} = (S, t), \sigma'_p = (r, u) \text{ 其他不变,}$$

将仍然满足 $\text{id}_n = \prod_{k \in q} \sigma'_k$. 执行 4).

- 4) 重新令 $p := \max\{k \mid \sigma'_k = (S, t), t \in n\}$ 以及 $\sigma'_p = (S, t)$.

直到满足 a) 或 b) 为止. 这个循环将总是能在有限次结束, 因为每次 p 都减小了 1.

当过程到结束时, 如果满足 a), 那么 $\prod_{k \in q} \sigma'_k(S) = (S, t) \prod_{k \in q, k \neq 0} \sigma'_k(S) = (S, t)(S) = t \neq S$, 与 $\text{id}_n(S) = S$ 矛盾; 那么, 只可能是满足 b), 此时因 $(S, t)(S, t) = \text{id}_n$, 将它们消去, 我们得到了 id_n 的 $q' = q - 2$ 个对换的分解.

重复这样的过程直到 $q' = 0$ 或 $q' = 1$ 为止, 而后者是不可能的, 因为 id_n 永远不可能等于对换. 所以: $q \equiv 0 \pmod{2}$.

最后, 我们断言, 任意置换和它的逆分解成的对换数目之和是偶数. 即, 考虑 π 的两种分解, $\pi = \prod_{k \in q} \sigma_k = \prod_{k \in q'} \sigma'_k$, 那么 $\text{id}_n = \pi \pi^{-1} = \prod_{k \in q} \sigma_k^{-1} \prod_{k \in q'} \sigma'_k = \prod_{k \in q} \sigma_k \prod_{k \in q'} \sigma'_k$, 由前 $q + q' \equiv 0 \pmod{2}$. \square

据此我们把置换群的元素分为**奇置换** (分解得到奇数个对换) 和**偶置换** (分解得到偶数个对换), 并引入置换的**符号或奇偶性** ε_π , 其值对于偶置换是 1, 奇置换是 0.

所有偶置换的集合 A_n 是 S_n 的子群.

附录 B 矩阵和行列式

以下只是一些定义的罗列, 与一些术语的规定, 矩阵与行列式的性质则散见于正文中. 如果读者感到陌生, 可参阅任意一本初等线性代数教材, 如 [1].

§2 矩阵

Definition 2.1 (矩阵). 设 \mathbb{F} 是一个域. 将 $\{a_{ij}\}_{i \in m, j \in n} \in 2^{\mathbb{F}}$ ($n, m \in \mathbb{N}_+$) 排成一个长方形的表:

$$\mathbf{A} := (a_{ij})_{i \in m, j \in n} = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & \cdots & a_{0,n-1} \\ a_{10} & a_{11} & \cdots & a_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m-1,0} & a_{m-1,1} & \cdots & a_{m-1,n-1} \end{pmatrix}. \quad (2-1)$$

式 (2-1) 定义的 \mathbf{A} 被称为 \mathbb{F} 上的 $m \times n$ 的**矩阵**, $m \times n$ 被称为它的尺寸或大小, $\{a_{ij}\}_{i \in m, j \in n}$ 是它的**元素**. 所有 \mathbb{F} 上的 $m \times n$ 矩阵的集合记为 $M_{m \times n}(\mathbb{F})$.

元素全为 0 的矩阵记为 \mathbf{O} , 有时为了强调它的尺寸, 将之写在右下角 i.e. $\mathbf{O}_{m \times n}$.

通常, 我们称 $1 \times n$ 或 $n \times 1$ 的矩阵为 n 维**向量**, 前者是**行向量**, 后者是**列向量**. 列向量的集合也可记为 \mathbb{F}^n , 即认为它是 \mathbb{F} 的 n 次 Cartesian 幂的元素. 但是, 当上下文明确时, 我们不特意在术语上区分行向量和列向量.

我们也常把矩阵写成列向量组的形式, 即

$$\mathbf{A} := (\mathbf{x}_j)_{j \in n}, \quad \forall j \in n (\mathbf{x}_j \in \mathbb{F}_n). \quad (2-2)$$

设矩阵 \mathbf{A} 的尺寸为 $n \times n$, 我们称其为 n 维**方阵**, 其集合记为 $M_n(\mathbb{F})$.

Definition 2.2 (对角矩阵). 若方阵 \mathbf{A} 的元素只有对角线上的元素非零 i.e. $a_{ij} \neq 0 \leftrightarrow i = j$, 称其为**对角矩阵**, 记为 $\text{diag}(a_{ii})_{i \in n}$. 特别地 $\mathbf{I} := \text{diag}(1)_{i \in n}$ 称为 n 维**单位阵**.

Definition 2.3 (转置). 设 $A = (a_{ij})_{i \in m, j \in n} \in M_{m \times n}(\mathbb{F})$. 我们称 $(a_{ji})_{j \in n, i \in m} \in M_{n \times m}(\mathbb{F})$ 为矩阵 A 的转置, 记为 A^T .

Definition 2.4 (和). 在 $M_{m \times n}$ 上定义和:

$$A + B = (a_{ij})_{i \in m, j \in n} + (b_{ij})_{i \in m, j \in n} = (a_{ij} + b_{ij})_{i \in m, j \in n}.$$

不难验证, $(M_{m \times n}, +, O_{m \times n})$ 构成了一个 Abelian 群.

Definition 2.5 (积). 在 $M_{m \times \ell}(\mathbb{F})$ 和 $M_{\ell \times n}(\mathbb{F})$ 间定义积 $(\cdot: M_{m \times \ell}(\mathbb{F}) \times M_{\ell \times n}(\mathbb{F}) \rightarrow M_{m \times n}(\mathbb{F}))$:

$$AB = (a_{ij})_{i \in m, j \in \ell} (b_{ij})_{i \in \ell, j \in n} = \left(\sum_{k \in \ell} a_{ik} b_{kj} \right)_{i \in m, j \in n}.$$

由域的性质, 我们能验证矩阵的乘法运算是结合的, 而且满足对和的分配律.

Definition 2.6 (逆). 设方阵 $A \in M_n(\mathbb{F})$. 若 $\exists B \in M_n(\mathbb{F})$, s.t. $BA = AB = I$ 则称其为 A 的逆, 并记为 A^{-1} , 同时称 A 是可逆的.

Definition 2.7 (相似). 设 $A, A' \in M_n(\mathbb{F})$. 如果 $\exists B \in M_n(\mathbb{F})$ s.t. B 可逆且有 $A' = B^{-1}AB$, 那么我们称 A 和 A' 相似, 记为 $A \sim A'$.

不难看出, 相似关系是一个等价关系.

Definition 2.8 (迹). 设 $A = (a_{ij})_{i, j \in n} \in M_n(\mathbb{F})$. 方阵 A 的迹定义为 $\text{tr } A := \sum_{i \in n} a_{ii}$.

Theorem 2.1 (迹的交换性). 设 $A, B \in M_n(\mathbb{F})$. $\text{tr}(AB) = \text{tr}(BA)$.

Proof.

$$AB = \left(\sum_{k \in n} a_{ik} b_{kj} \right), \quad BA = \left(\sum_{k \in n} b_{ki} a_{ik} \right).$$

从而

$$\text{tr}(AB) = \sum_{i \in n} \sum_{k \in n} a_{ik} b_{ki} = \sum_{k \in n} \sum_{i \in n} b_{ki} a_{ik} = \text{tr}(BA).$$

□

§3 行列式

行列式的公理化构造我们在定义 7.3 中已经给出了. 我们这里做出一个递归的定义, 并给出它的一些性质.

Definition 3.1 (行列式). 方阵 $\mathbf{A} \in M_n(\mathbb{F})$ 的行列式 $\det \mathbf{A} := |a_{ij}|_{i,j \in n}$ 递归地定义如下:

- i. 当 $\mathbf{A} \in M_1(\mathbb{F})$ 时, $\det \mathbf{A} = a_{00}$;
- ii. 当 $\mathbf{A} \in M_n(\mathbb{F})$ 时, 若记 $M_{ij} := |a_{k\ell}|_{k,\ell \in n; k \neq i, \ell \neq j}$ (这称为余子式), 那么

$$\det \mathbf{A} = \sum_{j \in n} (-1)^j a_{0j} M_{0j}.$$

附录 C 多项式

§4 多项式环

Definition 4.1 (多项式环). 设 R 是一个交换环, $\langle X \rangle := \{X^n \mid n \in \mathbb{N}\}$ 是 X 生成的幺半群, 记 $I := X^0$. 若形如 $P(X) := \sum_{i \in \mathbb{N}} p_i X^i$ 的形式 (称为**多项式**, 其中只有有限个 p_i 非零) 的集合¹:

$$R[X] := \left\{ \sum_{i \in \mathbb{N}} p_i X^i \mid (p_i)_{i \in \mathbb{N}} \in R^{<\mathbb{N}} \right\}$$

上定义了加法:

$$P(X) + Q(X) := \sum_{i \in \mathbb{N}} p_i X^i + \sum_{i \in \mathbb{N}} q_i X^i = \sum_{i \in \mathbb{N}} (p_i + q_i) X^i$$

和乘法:

$$P(X)Q(X) := \left(\sum_{i \in \mathbb{N}} p_i X^i \right) \left(\sum_{i \in \mathbb{N}} q_i X^i \right) = \sum_{\ell \in \mathbb{N}} \sum_{i+j=\ell} p_i q_j X^\ell,$$

那么, 我们称 $R[X]$ 是 R 上变元 X 的**多项式环**. 在变元是明确的时候, 多项式 $P(X)$ 也简记为 P .

记 $\deg P(X) := \max\{n \mid p_n \neq 0\}$ 为多项式 $P(X)$ 的**次数**. 而 $(p_n)_{n \in \deg P(X)+1}$ 是多项式的**系数**, 其中 p_0 是**常数项**, 而 $p_{\deg P(X)}$ 是**最高次项系数**或**首项系数**.

所有系数都为 0 的多项式被称为**零多项式**, 次数为 1 的多项式被称为**线性多项式**.

不难验证, $R[X]$ 的单位元和零元分别是 R 的单位元和零元.

以下给出一些不难证明的定理, 如果读者感到困难, 请翻阅参考资料 [1]:

Theorem 4.1. $\forall P(X), Q(X) \in A[A], \deg(P(X) + Q(X)) \leq \max\{\deg P(X), \deg Q(X)\},$
 $\deg(P(X)Q(X)) \leq \deg P(X) + \deg Q(X).$

Theorem 4.2. 如果 A 是整环, $A[X]$ 也是整环².

¹ $R^{<\mathbb{N}} := \bigcup_{n \in \mathbb{N}} R^n$

² 考虑到 A 是 $A[X]$ 的子环, 逆命题也成立.

Theorem 4.3 (多项式环的泛性). 设 R 是一个交换环, A 是 R 的子环. $\forall t \in R, \exists! \Pi_t \in \text{Hom}(A[X], R)$, s.t. $\Pi_t(X) = t \wedge \forall a \in A (\Pi_t(a) = a)$.

Proof. 不难验证

$$\Pi_t: \sum_{n \in \mathbb{N}} p_n X^n \mapsto \sum_{n \in \mathbb{N}} p_n t^n$$

即所求. □

我们把这样的 $\Pi_t(P) =: P(t)$ 称为 P 在 $X = t$ 时的取值, 或者说用 t 替换 X . 当两个多项式不相等时, 它们的值却可能相等.

Definition 4.2 (代数元和超越元). 若 $t \in R$ 满足 $\exists P \in A[X]$ s.t. $\exists n \in \mathbb{N} (p_n \neq 0) \wedge P(t) = 0$, 那么 t 是 A 上的一个**代数元**. 若 $t \in R$ 满足 Π_t 是单的, 那么我们称其为 A 上的一个**超越元**.

对于 $A = \mathbb{Q}, R = \mathbb{C}$ 的情况, 代数元和超越元又被称为**代数数**和**超越数**.

类似于整数的带余除法, 我们可以建立整的多项式环上的带余除法理论.

Theorem 4.4 (多项式的带余除法). 设 A 是整环, $F(X) \in A[X]$, 其首项系数在 A 中可逆. $\forall G(X) \in A[X], \exists! Q(X), R(X) \in A[X]$ s.t.

$$F(X) = Q(X)G(X) + R(X) \wedge \deg R(X) < \deg G(X).$$

Proof. 设 $F(X) = \sum_{i \in \mathbb{N}} f_i X^i, G(X) = \sum_{j \in \mathbb{N}} g_j X^j$, 其中 $n = \deg F(X), m = \deg G(X)$.³

我们采取归纳法证明这样的 $Q(X), R(X)$ 的存在性: $n = 0$ 时, 倘 $m > 0$, 则令 $Q(X) = 0, R(X) = F(X)$; 倘 $m = 0$, 则令 $R(X) = 0, Q(X) = f_0 g_0^{-1}$.

若 $n > 0$, 倘 $m > n$, 则令 $Q(X) = 0, R(X) = F(X)$ 即可; 倘 $m \leq n$, 记

$$\bar{F}(X) := F(X) - f_0 g_0^{-1} X^{n-m} G(X).$$

因 $\deg \bar{F}(X) < \deg F(X)$, 如若 $\bar{F}(X)$ 满足可找到 $\bar{Q}(X)$ 和 $R(X)$ s.t. $\bar{F}(X) = \bar{Q}(X)G(X) + R(X)$, 则令 $Q(X) = f_0 g_0^{-1} X^{n-m} + \bar{Q}(X)$. 这里的 $Q(X), R(X)$ 即所要找的.

综上, $\forall n \in \mathbb{N}$ 都成立.

现在我们需要证明唯一性.

倘若 $F(X) = Q(X)G(X) + R(X) = Q'(X)G(X) + R'(X)$, 那么

$$[Q(X) - Q'(X)]G(X) = R(X) - R'(X) \tag{4-1}$$

由定理 4.1, 再考虑到 A 是一个整环, 假设 $Q(X) \neq Q'(X), R(X) \neq R'(X)$ 我们能得到

$$\deg(R(X) - R'(X)) = \deg(Q(X) - Q'(X)) + \deg G(X).$$

³这里排除了零多项式, 事实上, 它的情况是非常简单的, 只需让 $Q(X) = R(X) = 0$ 即可.

从而我们得到 $\max\{\deg R(X), \deg R'(X)\} \geq \deg(R(X) - R'(X)) \geq \deg G(X)$, 这和 $\deg R(X) < \deg G(X)$ 矛盾. 从而, 要么 $Q(X) = Q'(X)$, 要么 $R(X) = R'(X)$, 而这两者因式 4-1 能互相推出. \square

在整的多项式环中, 由首项可逆的 $G(X)$ 和 $F(X)$ 得到 $F(X) = Q(X)G(X) + R(X)$ 的运算称为**多项式的带余除法** (polynomial long division). 这里 $F(X)$ 被称为**被除式** (dividend), $G(X)$ 称为**除式** (divisor); 得到的 $Q(X)$ 称为**商** (quotient) 而 $R(X)$ 称为**余式** (remainder).

倘若余式 $R(X) = 0$, 则称 $G(X)$ **整除** $F(X)$, 或 $F(X)$ 被 $G(X)$ 整除, 此时 $G(X)$ 被称为 $F(X)$ 的一个**因式** (factor), 而 $F(X)$ 则是 $G(X)$ 的一个**倍式** (multiple).

§5 多项式的根

参考文献

- [1] A.I. Kostrikin. *Introduction to Algebra*. Universitext - Springer-Verlag. Springer-Verlag, 1982. ISBN: 9783540907114. URL: <https://www.springer.com/gp/book/9780387907116>.
- [2] 柯斯特利金 (俄罗斯). 代数学引论 (第 2 卷). 线性代数. 3rd ed. 俄罗斯教材选译. 高等教育出版社, 1991. ISBN: 9787040214918. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=aed6abf2e5b956fd92baf7bd6298dec6>.

符号列表

这里列出了笔记中出现的重要符号.

\mathbf{A}^{-1} , 31	$\text{Inn}(G)$, 5
$(a_{ij})_{i \in m, j \in n}$, 30	$[k]_n$, 8
$ a_{ij} _{i, j \in n}$, 32	$\ker f$, 6
A_n , 29	$\mathcal{L}_p(V; U)$, 19
\mathbf{A}^T , 31	$\mathcal{L}(V)$, 21
$\text{Aut}(G)$, 5	$\mathcal{L}(V_0, \dots, V_{p-1}; U)$, 19
$\text{char}(F)$, 10	$\mathcal{L}(V, U)$, 14
$\text{Cl}(g)$, 6	$M_{m \times n}(\mathbb{F})$, 30
$\deg P(X)$, 33	$M_n(\mathbb{F})$, 30
\det , 19	$N \triangleleft G$, 6
$\text{diag}(a_{ii})_{i \in n}$, 30	\mathcal{O} , 30
$\text{End}(V)$, 21	\mathcal{O} , 22
ε_π , 29	$\mathcal{O}_{m \times n}$, 30
\mathbb{F}_p , 9	$P(X)$, 33
$\langle g_0 \rangle$, 4	$R \cong R'$, 7
$g * S$, 6	$R[X]$, 33
G/N , 7	$\langle S \rangle$, 4
$G \simeq G'$, 5	$S * g$, 6
I , 30	

S_n , 3, 27 $S(X)$, 3 tr , 31 $U(R)$, 8 V^* , 17 $(X, *)$, 2 $(X, *, e)$, 2 $(\boldsymbol{x}_j)_{j \in n}$, 30 $\boldsymbol{x} + L$, 15 \mathbb{Z}_n , 8 \mathbb{Z}_p^* , 9

索引

- Abelian 群, 3
- Cayley 定理, 5
- domain, 8
- Fermat 小定理, 9
- Grassmann 恒等式, 15
- n 维向量, 30
- n 阶元, 4
- p -线性型, 19
- π -等价, 27
- Steintz 替换, 13
- 不相交, 27
- 二元运算, 2
- 亏数, 21
- 互补, 15
- 交换环, 7
- 交换的, 2
- 代数, 22
- 代数元, 34
- 代数数, 34
- 代数系统, 2
- 代数结构, 2
- 余向量, 17
- 余子式, 32
- 余式, 35
- 倍式, 35
- 偶置换, 29
- 元素, 30
- 共变向量, 17
- 共轭, 5
- 共轭映射, 5
- 共轭类, 6
- 内自同构群, 5
- 函数环, 8
- 分配律, 7
- 列向量, 30
- 剩余类环, 8
- 半群, 2
- 单位元, 2
- 单位阵, 30
- 单同态, 7
- 单态射, 6
- 反变向量, 17
- 反对称域, 8
- 反对称的, 19

- 变换群, 3
- 可逆的, 3
- 右可逆, 3
- 右陪集, 6
- 右零因子, 8
- 同态, 6, 7, 14
- 同构, 5, 7, 14
- 同构映射, 5
- 向量, 11, 30
- 向量空间, 11
- 向量组, 11
- 和, 2, 14
- 商, 35
- 商空间, 15
- 商群, 7
- 因式, 35
- 坐标, 12
- 域, 9
- 基底, 12
- 多重线性型, 19
- 多项式, 33
- 多项式环, 33
- 多项式的带余除法, 35
- 奇偶性, 29
- 奇置换, 29
- 子半群, 3
- 子域, 9
- 子么半群, 3
- 子环, 7
- 子空间, 12
- 子群, 3
- 对偶基底, 17
- 对偶空间, 17
- 对称的, 19
- 对角矩阵, 30
- 左可逆, 3
- 左正规, 3
- 左陪集, 6
- 常数项, 33
- 幂零指数, 23
- 幂零算子, 23
- 平凡群, 3
- 平凡零因子, 8
- 么半群, 2
- 张出, 12
- 循环, 27
- 循环群, 4
- 态射, 6, 7
- 扩域, 9
- 整数环, 7
- 整环, 8
- 整除, 35
- 斜域, 8
- 方阵, 30
- 无穷维线性空间, 12
- 最大线性无关组, 13
- 最高次项系数, 33
- 有限么半群, 2
- 极小多项式, 22
- 核, 6, 7
- 模 n 的剩余类的导出集, 8
- 模 n 的剩余类环, 8
- 次数, 33
- 正规子群, 6
- 满同态, 7
- 满态射, 6
- 特征, 10

- 环, 7
- 生成, 12
- 生成元, 4
- 直和, 14
- 相似, 31
- 真子群, 3
- 矩阵, 30
- 矩阵的和, 31
- 矩阵的积, 31
- 秩, 13, 21
- 积, 2
- 符号, 29
- 类函数, 6
- 类数, 6
- 系数, 33
- 素域, 9
- 纯量, 11
- 线性函数, 16
- 线性包络, 11
- 线性变换, 20
- 线性型, 16
- 线性多项式, 33
- 线性无关, 12
- 线性映射, 20
- 线性泛函, 16
- 线性独立, 12
- 线性的, 20
- 线性相关, 12
- 线性空间, 11
- 线性算子, 20
- 线性算子代数, 22
- 线性组合, 11
- 结合的, 2
- 维数, 12
- 置换幺半群, 2
- 置换群, 3, 27
- 群, 3
- 自同态, 6
- 自同构, 5
- 自同构群, 5
- 自然同构, 17
- 行列式, 19, 24
- 行向量, 30
- 被除式, 35
- 超越元, 34
- 超越数, 34
- 轨道, 27
- 轨道长度, 27
- 转换矩阵, 14
- 转置, 31
- 轮换, 27
- 轮换长度, 27
- 迹, 24
- 逆, 3, 31
- 逆元, 3
- 逆算子, 22
- 酉性, 11
- 阶, 2
- 阶数, 4
- 除式, 35
- 除环, 8
- 陪集, 6
- 零元, 2
- 零化, 22
- 零化度, 21
- 零因子, 8
- 零多项式, 33

非结合环, 7

首项系数, 33