


0.1 群的生成组

定义 0.1

设 S 是群 G 的非空子集, 以 $\langle S \rangle$ 表示 G 的包含 S 的最小子群, 即 S 生成的子群. 显然, $\langle S \rangle$ 是 G 中所有包含 S 的子群之交, 即 $S = \bigcap_{S \subseteq H} H$.

 **笔记** 由命题 0.1.1 知 $S = \bigcap_{S \subseteq H} H$ 是一个群, 故上述定义是良定义的.

定理 0.1

设 S 是群 G 的非空子集, 则

$$\langle S \rangle = \{x_1 x_2 \cdots x_m \mid x_i \in S \cup S^{-1}, 1 \leq i \leq m, m \in \mathbf{N}\}.$$

证明 令 $\bar{S} = \{x_1 x_2 \cdots x_m \mid x_i \in S \cup S^{-1}, 1 \leq i \leq m, m \in \mathbf{N}\}$. 由 $\langle S \rangle$ 为子群且 $S \subseteq \langle S \rangle$ 知 $S^{-1} \subseteq \langle S \rangle$, 因而 $S \subseteq \bar{S} \subseteq \langle S \rangle$. 又 $\langle S \rangle$ 是含 S 的最小子群, 故只需证明 \bar{S} 为子群, 则 $\bar{S} \supseteq \langle S \rangle$.

设 $x_1 x_2 \cdots x_m \in \bar{S}, y_1 y_2 \cdots y_n \in \bar{S}$, 于是 $y_i^{-1} \in S \cup S^{-1} (1 \leq i \leq n)$, 则有

$$(x_1 x_2 \cdots x_m)(y_1 y_2 \cdots y_n)^{-1} = x_1 x_2 \cdots x_m y_n^{-1} y_{n-1}^{-1} \cdots y_2^{-1} y_1^{-1} \in \bar{S},$$

因而 \bar{S} 为 G 的子群, 故 $\bar{S} = \langle S \rangle$. □

定义 0.2

若 S 为群 G 的子集且 $G = \langle S \rangle$, 则称 S 为 G 的生成组. 若 G 有一个含有限个元素的生成组, 则称 G 是有限生成的.

若 $G = \langle a \rangle$ 为循环群, 则 a 本身就是生成组, 这时称 a 为 G 的生成元.

例题 0.1 设 $G = S_3$, 又 $a = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$, 则 $S_3 = \langle \{a, b\} \rangle$.

证明 事实上, 设 $G_1 = \langle a \rangle$, 注意到

$$a^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}, a^2 = (a^{-1})^2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix},$$

故由定理 0.1 知 $G_1 = \{a, a^{-1}\}$. 从而 G_1 为 S_3 的 2 阶子群且 $b \notin G_1$, 于是 $G_1 \subset \langle \{a, b\} \rangle$. 设 $\langle \{a, b\} \rangle$ 的阶为 n , 则由 Lagrange 定理知 $2 \mid n$ 且 $2 < n$. 又因为 $\langle \{a, b\} \rangle$ 是 G 的子群, 所以由 Lagrange 定理知 $n \mid 6$. 因而有 $n = 6$, 由此知 $S_3 = \langle \{a, b\} \rangle$. □

定义 0.3

设集合 $\{i_1, i_2, \dots, i_r\}$ 为集合 $\{1, 2, \dots, n\}$ 的子集. 若 $\sigma \in S_n$ 满足

$$\sigma(i_j) = i_{j+1}, \quad 1 \leq j \leq r-1,$$

$$\sigma(i_r) = i_1,$$

$$\sigma(k) = k, \quad k \notin \{i_1, i_2, \dots, i_r\},$$

则称 σ 为一个长为 r 的轮换或 r 轮换, 这时记 $\sigma = (i_1 i_2 \cdots i_r)$. 特别地, 将 2 轮换 (ij) 称为对换.

若 $\sigma = (i_1 i_2 \cdots i_r)$ 与 $\tau = (j_1 j_2 \cdots j_s)$ 是两个轮换且

$$\{i_1, i_2, \dots, i_r\} \cap \{j_1, j_2, \dots, j_s\} = \emptyset,$$

则称 σ 与 τ 为不相交的轮换.

显然, 一个 r 轮换 $(i_1 i_2 \cdots i_r)$ 有 r 种不同的表示,

$$(i_1 i_2 \cdots i_r) = (i_2 i_3 \cdots i_r i_1) = \cdots = (i_r i_1 \cdots i_{r-1}).$$

定理 0.2

设 $a \in S_n$ 且 $a = \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_k$, 其中, σ_i 为 r_i 轮换: 当 $i \neq j$ 时, σ_i 与 σ_j 不相交, $1 \leq i, j \leq k$, 则 a 的阶为 r_1, r_2, \cdots, r_k 的最小公倍数 $[r_1, r_2, \cdots, r_k]$. 进而 σ_i 的阶为 r_i .

证明 对因子个数 k 用数学归纳法证明. 当 $k=1$ 时, $a = (i_1 i_2 \cdots i_{r_1})$ 是一个轮换. 对任何 $s (1 \leq s \leq r_1)$ 有

$$a^s(j) = j, \quad j \neq i_1, i_2, \cdots, i_{r_1},$$

而

$$a^s(i_j) = \begin{cases} i_{s+j}, & j+s \leq r_1, \\ i_{s+j-r_1}, & j+s > r_1, \end{cases}$$

于是当 $s < r_1$ 时, $a^s \neq \text{id}$, 而当 $s = r_1$ 时, $a^{r_1} = \text{id}$, 故 a 的阶为 r_1 . 由此可知 σ_i 的阶为 r_i .

设 $k-1 (k \geq 2)$ 时定理成立. 设 $a = \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_k$, 令

$$a_1 = \sigma_2 \sigma_3 \cdots \sigma_k,$$

于是由归纳假设知 a_1 的阶为 $[r_2, r_3, \cdots, r_k]$. 因为 σ_1 与 $\sigma_j (j=2, \cdots, k)$ 不相交, 所以可设 $\sigma_2, \sigma_3, \cdots, \sigma_k$ 中包含的文字 (作用的对象) 为 $\{i_{r_1+1}, i_{r_1+2}, \cdots, i_t\}$, σ_1 中的文字 (作用的对象) 为 $\{i_1, i_2, \cdots, i_{r_1}\}$.

若 $j \neq i_l (1 \leq l \leq t)$, 则 $\sigma_1(j) = a_1(j) = j$, 故 $\sigma_1 a_1(j) = a_1 \sigma_1(j) = j$.

若 $j = i_l$ 且 $1 \leq l \leq r_1$, 则 $a_1(j) = j, \sigma_1(j) = i_{l'}, l' \leq r_1$, 因而 $a_1 \sigma_1(j) = i_{l'} = \sigma_1 a_1(j)$.

若 $j = i_l$ 且 $t \geq l \geq r_1 + 1$, 则 $\sigma_1(i_l) = i_l, a_1(i_l) = i_{l'} (t \geq l' \geq r_1 + 1)$, 故有 $a_1 \sigma_1(j) = i_{l'} = \sigma_1 a_1(j)$.

总之有 $a_1 \sigma_1 = \sigma_1 a_1$.

又设 $\beta \in \langle \sigma_1 \rangle \cap \langle a_1 \rangle$. 由定理 0.1 知 $\beta = f_1 f_2 \cdots f_m$, 其中 $f_i \in \{\sigma_1, \sigma_1^{-1}\} \cap \{a_1, a_1^{-1}\}$, $m \in \mathbb{N}$.

若 $j \neq i_l (1 \leq l \leq t)$, 则 $\beta(j) = j$.

若 $j = i_l (1 \leq l \leq r_1)$, 由 $\beta \in \langle a_1 \rangle$, 则 $\beta(j) = j$. 若 $j = i_l (t \geq l \geq r_1 + 1)$, 由 $\beta \in \langle \sigma_1 \rangle$, 则 $\beta(j) = j$.

故 $\beta = \text{id}$, 即有 $\langle \sigma_1 \rangle \cap \langle a_1 \rangle = \{\text{id}\}$.

设 m 为 $a = a_1 \sigma_1$ 的阶, 则再由 $a_1 \sigma_1 = \sigma_1 a_1$ 可得

$$a^m = a_1^m \sigma_1^m = \sigma_1^m a_1^m = \text{id}.$$

因此 $\sigma_1^m = a_1^{-m} \in \langle \sigma_1 \rangle \cap \langle a_1 \rangle$. 又由 $\langle \sigma_1 \rangle \cap \langle a_1 \rangle = \{\text{id}\}$ 知 $\sigma_1^m = a_1^{-m} = \text{id}$, 从而 m 是 σ_1, a_1 的阶的公倍数, 即 $m \mid r_1, m \mid [r_2, \cdots, r_k]$. 再设 n 也是 $r_1, [r_2, \cdots, r_k]$ 的公倍数, 则

$$\sigma_1^n = a_1^n = \text{id} \implies a^n = \sigma_1^n a_1^n = \text{id}.$$

故 $m \mid n$. 因而 $a = a_1 \sigma_1$ 的阶为 $[r_1, [r_2, \cdots, r_k]] = [r_1, r_2, \cdots, r_k]$.

□

定理 0.3

(1) 任何轮换 $(i_1 i_2 \cdots i_r)$ 可写成如下对换之积

$$(i_1 i_2 \cdots i_r) = (i_1 i_r)(i_1 i_{r-1}) \cdots (i_1 i_2).$$

(2) 若把 S_n 中的元 id 记为长为 1 的轮换, 即 $\text{id} = (i)$, 则 $\forall a \in S_n$, 一定可写成互不相交的轮换之积.

(3) 令 $S = \{(1i) \mid 2 \leq i \leq n\}$, 则 $S_n = \langle S \rangle$. 即任何置换都可写成对换之积.

♡

证明

(1) 利用数学归纳法证明任何轮换 $(i_1 i_2 \cdots i_r)$ 可写成如下对换之积

$$(i_1 i_2 \cdots i_r) = (i_1 i_r)(i_1 i_{r-1}) \cdots (i_1 i_2). \quad (1)$$

当 $r = 2$ 时, (1) 式显然成立. 假设定理对 $r - 1 (r \geq 3)$ 成立, 并记 $a = (i_1 i_2 \cdots i_r)$, 于是有

$$(i_1 i_r)(i_1 i_{r-1}) \cdots (i_1 i_3)(i_1 i_2) = (i_1 i_3 \cdots i_r)(i_1 i_2) = a'.$$

当 $j \neq i_k$ 时, $a'(j) = j = a(j)$;

当 $j = i_k (k \geq 3)$ 时, $a'(j) = (i_1 i_3 \cdots i_r)(j) = a(j)$;

当 $j = i_1$ 时, $a'(i_1) = (i_1 i_3 \cdots i_r)(i_2) = i_2 = a(i_1)$;

当 $j = i_2$ 时, $a'(i_2) = (i_1 i_3 \cdots i_r)(i_1) = i_3 = a(i_2)$.

综上知 $a = a'$. 故知式(1)成立, 故任何轮换可写成 S 中元素之积.

(2) 设 $a \in S_n$, 令 $\bar{F}_a = \{j \mid a(j) \neq j\}$. 显然有

$$\bar{F}_{\text{id}} = \emptyset. \quad (2)$$

当 $a \neq \text{id}$ 时,

$$|\bar{F}_a| \geq 2 \quad (3)$$

当且仅当 a 为对换时, 式(3)中等号成立. 下面不妨设 $a \neq \text{id}$. 证明存在轮换 σ_1 满足

$$\begin{cases} \bar{F}_a = \bar{F}_{\sigma_1} \cup \bar{F}_{\sigma_1^{-1}a}, \\ \bar{F}_{\sigma_1} \cap \bar{F}_{\sigma_1^{-1}a} = \emptyset. \end{cases} \quad (4)$$

因 $a \neq \text{id}$, 故由式(3)知有 $i_1 \in \bar{F}_a$. 令

$$i_2 = a(i_1), \quad i_3 = a(i_2), \quad \cdots, \quad i_k = a(i_{k-1}),$$

则 $i_1 \neq i_2$. 由于 \bar{F}_a 是有限集, 故存在 $r \geq 3$, 使得 $i_1, i_2, \cdots, i_{r-1}$ 互不相同, 而 $i_r = i_t (1 \leq t \leq r-1)$. 现证 $t = 1$. 若不然, 则有

$$a(i_{t-1}) = i_t = i_r = a(i_{r-1}).$$

于是

$$i_{t-1} = i_{r-1},$$

即有 $t = r$, 矛盾, 故 $t = 1$. 令 $\sigma_1 = (i_1 i_2 \cdots i_{r-1})$, 显然

$$\sigma_1(i_k) = a(i_k), \quad 1 \leq k \leq r-1, \quad \bar{F}_{\sigma_1} = \{i_1, i_2, \cdots, i_{r-1}\} \subseteq \bar{F}_a.$$

再令 $a_1 = \sigma_1^{-1}a$, 若 $l \notin \bar{F}_a$, 则 $l \notin \bar{F}_{\sigma_1^{-1}}$, 故 $a_1(l) = l (l \notin \bar{F}_{a_1})$, 因而 $\bar{F}_{a_1} \subseteq \bar{F}_a$. 于是 $\bar{F}_{a_1} \cup \bar{F}_{\sigma_1} \subseteq \bar{F}_a$. 反之, 若 $l \notin \bar{F}_{a_1} \cup \bar{F}_{\sigma_1}$, 则有 $a_1(l) = \sigma_1(l) = l$, 故 $a(l) = a_1 \sigma_1^{-1}(l) = l$, 即 $l \notin \bar{F}_a$. 于是式(4)中第一个等式成立.

设 $i_k \in \bar{F}_{\sigma_1}$, 则有 $a_1(i_k) = \sigma_1^{-1}a(i_k) = \sigma_1^{-1}\sigma_1(i_k) = i_k$, 即 $i_k \notin \bar{F}_{a_1} = \bar{F}_{\sigma_1^{-1}a}$. 故(4)式中第二个等式也成立.

若 $a \neq \sigma_1$, 则 $\bar{F}_{\sigma_1^{-1}a} \neq \bar{F}_{\text{id}} = \emptyset$. 从而 $\bar{F}_{\sigma_1^{-1}a} \neq \bar{F}_a$, 否则由(4)式知 $\bar{F}_{\sigma_1} = \emptyset$, 即 $\sigma_1 = \text{id}$, 这与 $i_1, i_2, \cdots, i_{r-1}$ 互不相同矛盾! 再对 $\sigma_1^{-1}a$ 用上述方法同理可得另一轮换 $\sigma_2 = (j_1 j_2 \cdots j_{l-1})$, 使得

$$\bar{F}_{\sigma_2} = \{j_1, j_2, \cdots, j_{l-1}\} \subseteq \bar{F}_{\sigma_1^{-1}a}, \quad (5)$$

并且

$$\begin{cases} \bar{F}_{\sigma_1^{-1}a} = \bar{F}_{\sigma_2} \cup \bar{F}_{\sigma_2^{-1}\sigma_1^{-1}a}, \\ \bar{F}_{\sigma_2} \cap \bar{F}_{\sigma_2^{-1}\sigma_1^{-1}a} = \emptyset. \end{cases}$$

若 $a \neq \sigma_1 \sigma_2$, 则同理有 $\bar{F}_{\sigma_2^{-1}\sigma_1^{-1}a} \neq \bar{F}_{\sigma_1^{-1}a}$. 从而 $\bar{F}_{\sigma_2^{-1}\sigma_1^{-1}a} \subset \bar{F}_{\sigma_1^{-1}a} \subset \bar{F}_a$. 由(4)式和(5)式知

$$\{i_1, i_2, \cdots, i_{r-1}\} \cap \{j_1, j_2, \cdots, j_{l-1}\} = \bar{F}_{\sigma_1} \cap \bar{F}_{\sigma_2} = \emptyset,$$

故 σ_1 与 σ_2 为不相交的轮换. 继续做下去. 由于 \bar{F}_a 是有限的, 最后有 n , 使得互不相交的轮换 $\sigma_1, \sigma_2, \cdots, \sigma_n$

满足

$$\bar{F}_{\sigma_n^{-1}\sigma_{n-1}^{-1}\cdots\sigma_1^{-1}a} = \emptyset,$$

即 $\sigma_n^{-1}\sigma_{n-1}^{-1}\cdots\sigma_1^{-1}a = \text{id}$, 因而

$$a = \sigma_1\sigma_2\cdots\sigma_n,$$

即 S_n 中任何元素可表为互不相交的轮换之积, 故定理成立.

(3) 事实上,

$$(ij) = (1i)(1j)(1i). \quad (6)$$

由结论 (2) 知 $\forall a \in S_n$ 一定可写成轮换之积, 从而由结论 (1) 知 a 可写成对换之积. 再利用 (6) 式知 a 可写成 S 中元素之积, 再由定理 0.1 可知 $a \in \langle S \rangle$, 即 $\langle S \rangle \supseteq S_n$. 又显然有 $\langle S \rangle \subseteq S_n$, 故 $\langle S \rangle = S_n$. □

推论 0.1

对换都是奇置换, 并且奇置换可表示为奇数个对换之积, 偶置换可表示为偶数个对换之积. ♥

证明 由定理??中奇置换定义知对换显然都是奇置换. 设 $\sigma \in S_n$, 则由定理 0.3(3) 知 $\sigma = \tau_1\tau_2\cdots\tau_k$, 其中 τ_i 都是对换. 又注意到对换 $\tau_i = (ij)$ 都是奇置换, 故 $\text{sgn}\tau_i = -1$. 由定理??知 sgn 是 S_n 的自同态, 因此

$$\text{sgn}\sigma = \text{sgn}(\tau_1\tau_2\cdots\tau_k) = (\text{sgn}\tau_1)(\text{sgn}\tau_2)\cdots(\text{sgn}\tau_k) = (-1)^k.$$

若 σ 是奇置换, 则 $\text{sgn}\sigma = (-1)^k = -1$, 即 k 为奇数.

若 σ 是偶置换, 则 $\text{sgn}\sigma = (-1)^k = 1$, 即 k 为偶数. □