

0.1 Sylow 子群

定义 0.1 (p 群)

设 p 是素数. 若群 G 的阶是 p 的方幂, 即 $|G| = [G : e] = p^k (k \in \mathbb{N})$, e 为 G 的幺元, 则称 G 是一个 p 群.

定理 0.1

设 p 群 G 作用在集合 X 上, $|X| = n$, $t = |\{x \in X \mid g(x) = x, \forall g \in G\}|$, 则有下列结论:

- (1) $t \equiv n \pmod{p}$. 也即 $n \equiv t \pmod{p}$.
- (2) 当 $(n, p) = 1$ 时, $t \geq 1$. 即 $\exists x \in X$, 使 $g(x) = x (\forall g \in G)$. 也即 $\exists x \in X$, 使 $O_x = \{x\}$. 亦即 X 中必有不动元素.
- (3) G 的中心 $C(G) \neq \{e\}$.

注 由(1)式知 $\{x \in X \mid g(x) = x, \forall g \in G\}$ 中的元素 x 的轨道都只包含其自身一个元素即 $O_x = \{x\}$, $|O_x| = 1$. 故 t 就是只包含一个元素的 X 的轨道的个数.

证明

- (1) 由定理????及 $|X| = n$, 可设 X 的轨道分解为

$$X = O_{x_1} \sqcup O_{x_2} \sqcup \cdots \sqcup O_{x_m},$$

其中 $O_{x_1}, O_{x_2}, \dots, O_{x_m} (m \leq n)$ 为 X 中所有不同的轨道. 注意到

$$\begin{aligned} x \in \{x \in X \mid g(x) = x, \forall g \in G\} &\iff g(x) = x (\forall g \in G) \\ &\iff O_x = \{g(x) \in X \mid g \in G\} = \{x\} \iff |O_x| = 1, \end{aligned}$$

故

$$\{x \in X \mid g(x) = x, \forall g \in G\} = \{x \in X \mid O_x = \{x\}\} = \{x \in X \mid |O_x| = 1\}. \quad (1)$$

从而对 $\forall x, y \in \{x \in X \mid g(x) = x, \forall g \in G\}$ 且 $x \neq y$, 有 $O_x = \{x\} \neq \{y\} = O_y$. 因此 $x, y \in \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$. 故 $\{x \in X \mid g(x) = x, \forall g \in G\} \subseteq \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$. 于是

$$\begin{aligned} n = |O_{x_1}| + \cdots + |O_{x_m}| &= \sum_{|O_{x_i}|=1} |O_{x_i}| + \sum_{|O_{x_i}| \neq 1} |O_{x_i}| \\ &= \sum_{x_i \in \{x \in X \mid g(x) = x, \forall g \in G\}} 1 + \sum_{|O_{x_i}| \neq 1} |O_{x_i}| = t + \sum_{|O_{x_i}| \neq 1} |O_{x_i}|. \end{aligned}$$

由推论??知 $|O_{x_i}| \mid |G|$. 由 G 为 p 群, $|O_{x_i}| > 1$, 故 $p \mid |O_{x_i}|$, 因而结论 (1) 成立.

- (2) $(n, p) = 1$, 由结论 (1) 知 $t \neq 0$, 故结论 (2) 成立.

- (3) 考虑 G 在 G 上的伴随作用. 由定理????知

$$C(G) = \{x \in G \mid \text{adx}(g) = \text{id}_G(g) = g, \forall g \in G\}.$$

自然 $e \in C(G)$, 故 $|C(G)| \geq 1$. 又 $p \mid |G|$, 由结论 (1)(取 $X = C(G)$) 知 $|G| \equiv |C(G)| \pmod{p}$, 故 $|C(G)| > 1$, 即 $C(G) \neq \{e\}$.

□

引理 0.1

设 p 是素数, $n = p^l m$, $(m, p) = 1$. 若 $k \in \mathbb{N}, k \leq l$, 则

$$p^{l-k} \parallel C_n^{p^k},$$

其中 \parallel 表示恰能整除, 即 $p^{l-k} \mid C_n^{p^k}$ 但 $p^{l-k+1} \nmid C_n^{p^k}$, $C_n^{p^k}$ 是组合数.

♡

证明 当 $1 \leq i \leq p^k - 1$ 时, i 都有分解 $i = j_i p^t$, 其中, $(j_i, p) = 1$, 于是有 $t < k \leq l$, 而此时

$$\begin{aligned} n - i &= p^l m - p^t j_i = p^t (p^{l-t} m - j_i), \\ p^k - i &= p^t (p^{k-t} - j_i), \end{aligned}$$

因而 $p^t \mid (n - i), p^t \mid (p^k - i)$. 又

$$\begin{aligned} C_n^{p^k} &= \frac{n}{p^k} \frac{n-1}{p^k-1} \cdots \frac{n-(p^k-1)}{p^k-(p^k-1)} = \frac{n}{p^k} \cdot \prod_{i=1}^{p^k-1} \frac{n-i}{p^k-i} \\ &= \frac{p^l m}{p^k} \cdot \prod_{i=1}^{p^k-1} \frac{p^t (p^{l-t} m - j_i)}{p^t (p^{k-t} - j_i)} = p^{l-k} \cdot m \prod_{i=1}^{p^k-1} \frac{p^{l-t} m - j_i}{p^{k-t} - j_i}. \end{aligned}$$

注意到 $(m \prod_{i=1}^{p^k-1} \frac{p^{l-t} m - j_i}{p^{k-t} - j_i}, p) = 1$, 故由此知 $p^{l-k} \mid C_n^{p^k}$.

□

定理 0.2 (Sylow 第一定理)

设 G 是一个阶为 $p^l m$ 的群, 其中, p 为素数, $l \geq 1, (p, m) = 1$, 则对任何 $1 \leq k \leq l$, G 中一定有 p^k 阶子群.

♥

证明 令 X 是 G 中所有含 p^k 个元素的子集的集合, 即

$$X = \{A \subseteq G \mid |A| = p^k\}.$$

显然 $|X| = C_n^{p^k}$, 其中 $n = p^l m$.

$G \times X$ 到 X 上的映射

$$f(g, A) = gA = \{ga \mid a \in A\}$$

定义了 G 在 X 上的作用. 于是由定理 0.1 知 X 有轨道分解

$$X = \bigsqcup O_A, \quad |X| = \sum |O_A|.$$

由引理 0.1 知 $p^{l-k} \mid C_n^{p^k}$, 即 $p^{l-k} \mid |X|$. 因而 $\exists A \in X$, 使 $p^{l-k} \mid |O_A|, p^{l-k+1} \nmid |O_A|$. 从而存在 t , 使 $(p, t) = 1$ 且 $|O_A| = p^{l-k} t$. 设 F_A 是 A 的迷向子群, 于是由推论 0.1 及 Lagrange 定理可得

$$\begin{aligned} |O_A| &= [G : F_A] = \frac{p^l m}{|F_A|} = \frac{p^l m}{|F_A|} \implies |O_A| \cdot |F_A| = p^l m \\ &\implies p^{l-k} t \cdot |F_A| = p^l m \implies |F_A| t = p^k. \end{aligned}$$

又 $(p, t) = 1$, 故 $p^k \mid |F_A|$. 若 $p^{k+1} \mid |F_A|$, 则存在 c , 使 $|F_A| = p^{k+1} c$, 从而由上式知

$$p^l m = |O_A| \cdot |F_A| = p^{l-k} t \cdot p^{k+1} c = p^{l+1} t c \implies m = p t c,$$

这与 $(p, m) = 1$ 矛盾! 故 $p^{k+1} \nmid |F_A|$, 因此 $p^k \parallel |F_A|$.

另一方面, 对 $g \in F_A$ 有 $gA = A$, 即 $g(a) = ga \in A (\forall a \in A)$. 于是 $F_A \cdot a \subseteq A$, 故再由定理 0.1 知

$$|F_A \cdot a| = |F_A| \leq |A| = p^k.$$

由此知 $|F_A| = p^k$, 即 F_A 是一个 p^k 阶子群.

□

定义 0.2 (Sylow p 子群)

设群 G 的阶为 $p^l m$, p 为素数且 $(p, m) = 1$, 则 G 的 p^l 阶子群称为 G 的 Sylow p 子群.

♣

注 Sylow 第一定理肯定了 Sylow p 子群的存在性, 故上述定义是良定义的.

命题 0.1

设 P 为群 G 的一个 Sylow p 子群, 则对 $\forall a \in P$, 都存在 $k \in \mathbb{N}$, 使得 $\text{ord } a = p^k$.

注 这个命题表明: Sylow p 子群的元素的阶都是 p 的方幂.

证明 设 $|P| = p^l$, 则由定理??知 $\text{ord } a \mid |P|$, 故存在 $k \in \mathbb{N}$, 使得 $\text{ord } a = p^k$.

□

定理 0.3 (Sylow 第二定理)

设群 G 的阶为 $p^l m$, p 为素数, $(p, m) = 1$. 又 P 是 G 的一个 Sylow p 子群, H 是 G 的一个 p^k 阶子群, 则 $\exists g \in G$, 使 $H \subseteq gPg^{-1}$. 特别地, G 的 Sylow p 子群是相互共轭的.

♡

证明 将 G 在 G/P 上的左平移作用限制在 H 上, 于是得到 H 在 G/P 上的左平移作用

$$h(gP) = hgP, \quad \forall h \in H, g \in G.$$

由 Lagrange 定理知

$$[G : e] = [G : P][P : e] \iff |G| = |G/P||P| \iff p^l m = |G/P| p^l \iff |G/P| = m.$$

又 $|H| = p^k$, $(p, m) = 1$, 故由定理 0.1(2)知 G/P 中含有元素 gP , 其轨道仅含 gP , 即 $hgP = gP (\forall h \in H)$, 故存在 p_1, p_2 , 使 $hgp_1 = gp_2$, 从而 $h = gp_2p_1^{-1}g^{-1} \in gPg^{-1}$. 因此 $H \subseteq gPg^{-1}$.

特别地, 若 H 也是 G 的一个 Sylow p 子群, 则 $|H| = p^l$, 再由定理????知 $|H| = p^l = |P| = |gPg^{-1}|$. 又由之前证明知 $H \subseteq gPg^{-1}$, 从而 $H = gPg^{-1}$. 由定理??知 H, P 相互共轭.

□

推论 0.1

设群 G 的阶为 $p^l m$, p 为素数, $(p, m) = 1$. 又 P 是 G 的一个 Sylow p 子群, 则

- (1) 群 G 中 Sylow p 子群的集合是 $X = \{gPg^{-1} | g \in G\}$, 即 P 的共轭子群构成的集合.
- (2) $G \times X$ 到 X 的映射

$$f(g, P_1) = g(P_1) = gP_1g^{-1}, \quad \forall g \in G, P_1 \in X.$$

是群 G 在 X 上的作用. 并且 G 在 X 上的作用 f 是可递的.

♡

证明

- (1) 任取 $g \in G$, 对 $\forall p_1, p_2 \in P$, 有 $(gp_1g^{-1})(gp_2g^{-1})^{-1} = gp_1p_2^{-1}g^{-1} \in gPg^{-1}$, 因此 gPg^{-1} 是 G 的子群. 又由定理????知 $|P| = |gPg^{-1}| = p^l$, 故 gPg^{-1} 也是 G 的 Sylow p 子群.

又若 P_1 是 G 的另一 Sylow p 子群. 由 Sylow 第二定理知 $\exists g_1 \in G$, 使得 $g_1Pg_1^{-1} = P_1$, 因而 $X = \{gPg^{-1} | g \in G\}$ 是 G 中 Sylow p 子群的集合.

- (2) 根据群作用的定义容易验证 f 是群 G 在 X 上的一个作用. 对 $\forall P_1, P_2 \in \{X\}$, 由 Sylow 第二定理知 P_1, P_2 共轭, 即存在 $g \in G$, 使

$$P_1 = gP_2g^{-1} = g(P_1) = f(g, P_1).$$

故 G 在 X 上的作用 f 是可递的.

□

定理 0.4 (Sylow 第三定理)

设群 G 的阶为 $p^l m$, p 为素数, $(p, m) = 1$. 又设 G 中 Sylow p 子群的个数为 k , 则 k 也是 G 中任意一个 Sylow p 子群的共轭子群的个数. 并且有

- (1) 当且仅当 $k = 1$ 时, G 的 Sylow p 子群 $P \triangleleft G$;
- (2) $k \mid m, k \equiv 1 \pmod{p}$.

♡

证明 设 P 是 G 的一 Sylow p 子群. 则由推论 0.1(1) 知 $X = \{gPg^{-1} | g \in G\}$ 是 G 中 Sylow p 子群的集合. 从而 k 也是 G 中任意一个 Sylow p 子群的共轭子群的个数.

(1) 若 $|X| = 1$, 即 $gPg^{-1} = P(\forall g \in G)$, 故由正规子群定义知 $P \triangleleft G$. 反之, 若 $P \triangleleft G$, 则 $gPg^{-1} = P(\forall g \in G)$, 故 $|X| = 1$. 这样就证明了结论 (1).

(2) 由推论 0.1(1) 知 $X = \{gPg^{-1} | g \in G\}$ 是 G 中 Sylow p 子群的集合. 现设 $|X| = k$, 由推论 0.1(2) 知 $G \times X$ 到 X 的映射

$$f(g, P_1) = gP_1g^{-1}, \quad \forall g \in G, P_1 \in X.$$

定义了 G 在 X 上的作用. 设 F_P 为 P 的迷向子群, 即

$$F_P = \{g \in G, |gPg^{-1} = P\}.$$

显然, $P \triangleleft F_P$, 故由 Lagrange 定理知 $|P| \mid |F_P|$, 即 $p^l \mid |F_P|$, 因而存在 t , 使得

$$|F_P| = p^l t. \quad (2)$$

于是由 Lagrange 定理知

$$|G| = [G : F_P]|F_P| \iff p^l m = [G : F_P]p^l t \iff m = [G : F_P]t \implies [G : F_P] \mid m, t \mid m. \quad (3)$$

又注意到 G 在 X 上的作用下 P 的轨道为 $O_P = X$, 故由推论 ?? 知

$$k = |X| = [G : F_P].$$

因此再结合 (3) 式得 $k \mid m$.

将上面 G 在 X 上的作用限制为 P 在 X 上的作用, 显然 $P \in X$, P 在 X 上的作用下 P 的轨道 $O'_P = \{P\}$. 若另有 $P_1 \in X$, 在 P 作用下的轨道 $O'_{P_1} = \{P_1\}$, 即有 $gP_1g^{-1} = P_1(\forall g \in P)$. 由 Sylow 第二定理, $\exists h \in G$, 使得 $P_1 = hPh^{-1}$, 因而

$$g(hPh^{-1})g^{-1} = hPh^{-1}(\forall g \in P) \iff (h^{-1}gh)P(h^{-1}gh)^{-1} = P(\forall g \in P).$$

故 $h^{-1}gh \in F_P(\forall g \in P)$, 从而 $hPh^{-1} \subseteq F_P$. 因此 $h^{-1}Ph, P$ 均为 F_P 的子群. 由 (3) 式知 $t \mid m$, 又因为 $(p, m) = 1$, 所以 $(p, t) = 1$. 而由 (2) 知 $|F_P| = p^l t$, $|P| = p^l$, 再由定理 ???? 知 $|h^{-1}Ph| = |P| = p^l$, 故 $h^{-1}Ph, P$ 均为 F_P 的 Sylow p 子群. 又 $P \triangleleft F_P$, 故由结论 (1) 知 $h^{-1}Ph = P$, 故 $P = P_1$. 这就说明包含一个元素的 X 的轨道仅有一个. 注意到

$$P' \in \{P' \in X \mid g(P') = gP'g^{-1} = P', \forall g \in P\} \iff O_{P'} = \{g(P') = gP'g^{-1} = P' \mid g \in P\} = \{P'\},$$

故

$$\{P' \in X \mid g(P') = gP'g^{-1} = P', \forall g \in P\} = \{P' \in X \mid O_{P'} = \{P'\}\} = \{P\}.$$

即 $|\{P' \in X \mid g(P') = gP'g^{-1} = P', \forall g \in P\}| = 1$. 故由定理 0.1(1) 知 $k \equiv 1 \pmod{p}$.

□

定义 0.3 (单群)

一个群如果没有非平凡的正规子群就称为单群.

♣

命题 0.2

阶数大于 2 的循环群都不是单群

♠

证明 因为循环群都是 Abel 群, 所以其子群都是正规子群. 又有阶数大于 2, 故一定有非平凡的正规子群.

□

例题 0.1 设群 G 的阶为 72, 则 G 不是单群.

注 Sylow 定理在群论中有许多应用, 其一就是判断某些有限群不是单群.

解 $72 = 2^3 \cdot 3^2$. 设 G 中 Sylow 3 子群的个数为 k , 于是由 Sylow 第三定理知有 t , 使得 $k = 3t + 1, k \mid 8$, 因而 $t = 0$ 或 $t = 1$.

若 $t = 0$, 则 $k = 1$. 此时再由 Sylow 第三定理知 Sylow 3 子群为 G 的正规子群, 故 G 不是单群.

若 $t = 1$, 则 $k = 4$. 设 $X = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}$ 为 G 的 Sylow 3 子群的集合, 由推论 0.1(2) 知有 G 在 X 上的作用

$$g(P_1) = gP_1g^{-1}, \quad \forall g \in G, P_1 \in X.$$

并且这个 G 在 X 上的作用是可递的. 由定理?? 知有 G 到 $S_X = S_4$ 中的同态 σ 满足

$$\sigma(g) = \sigma_g, \quad \forall g \in G,$$

其中 $\sigma_g : X \rightarrow X, P \mapsto g(P) = gPg^{-1}$. 于是由群的同态基本定理知 $\ker \sigma \triangleleft G$ 且 $G/\ker \sigma$ 与 S_4 的一个子群 $\sigma(G)$ 同构, 而 $|S_4| = 24 < 72$, 于是

$$[G : \ker \sigma] = |\sigma(G)| \leq |S_4| = 24 < 72 = |G|.$$

再利用 Lagrange 定理可得

$$|G| = [G : \ker \sigma] |\ker \sigma| \implies |\ker \sigma| = \frac{|G|}{[G : \ker \sigma]} \geq \frac{72}{24} > 1.$$

因此 $\ker \sigma \neq \{e\}$.

注意到

$$\ker \sigma = \{g \in G \mid \sigma(g) = \text{id}_G\} = \{g \in G \mid gPg^{-1} = P, \forall P \in X\},$$

又由 G 在 X 上的作用可递知对 $P_1, P_2 \in X$, 存在 $g_1 \in G$, 使 $P_2 = g(P_1) = g_1P_1g_1^{-1}$. 若 $\ker \sigma = G$, 则 $g_1 \in \ker \sigma$, 从而

$$P_2 = g_1P_1g_1^{-1} = P_1,$$

这与 $P_1 \neq P_2$ 矛盾! 因此 $\ker \sigma \neq G$. 故 $\ker \sigma$ 是 G 的非平凡正规子群, 因而 G 不是单群. □

命题 0.3

设 p, q 都是素数, $p < q, p \nmid (q-1)$. 证明 pq 阶群一定是循环群. ♠

证明 设 P, Q 分别为 pq 阶群 G 的 p, q 阶子群. 于是由 Sylow 第三定理 (2), 可设 P, Q 共轭子群的个数分别为 $sp+1, tq+1 (s, t \in \mathbb{N})$. 由推论 0.1(1) 知, P 的共轭子群都是 G 的 Sylow p 子群, Q 的共轭子群都是 G 的 Sylow q 子群. 因此

$$sp+1 = q, \quad tq+1 = p.$$

由 $p < q$, 于是 $t = 0$, 因而 Q 是 G 的唯一的 q 阶子群. 若 $s \neq 0$, 则 $sp+1 = q$, 这与 $p \nmid (q-1)$ 矛盾. 于是 $s = 0$, 因而 P 是 G 的唯一的 p 阶子群.

因为 p, q 都是素数且 $p < q$, 所以 $|P \cup Q| \leq p+q < pq = |G|$, 因此 $G \neq Q \cup P$. 对 $\forall a \in G \setminus (P \cup Q)$, 则 $\langle a \rangle \neq P, Q$, 从而由 P, Q 分别是 G 的唯一 p, q 阶子群知 $\langle a \rangle$ 的阶既不是 p 也不是 q . 又由 Lagrange 定理知 $|\langle a \rangle| \mid pq$, 于是 $|\langle a \rangle| = pq$, 因此 $G = \langle a \rangle$ 为循环群. □