

近世代数

计算机科学与技术学院
唐琳琳



内容

- 第一章 基本概念
- 第二章 群
- 第三章 正规子群和群的同态与同构
- 第四章 环与域
- 第五章 因子分解
- 第六章 域的扩张

第二章 群

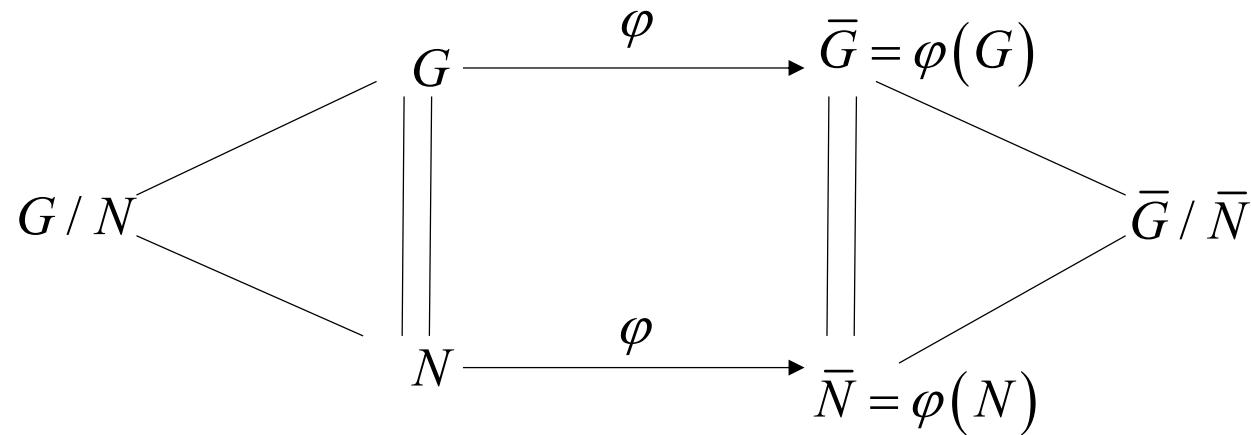
- 群同态与同构的简单性质
- 正规子群和商群
- 群同态基本定理
- 群的同构定理
- 群的自同构群
- *Sylow定理
- *有限交换群

群的同构定理

- 定理1（第一同构定理）：设 φ 是群 G 到群 \bar{G} 的一个同态满射，又 $Ker\varphi \subseteq N \trianglelefteq G$ ， $\bar{N} = \varphi(N)$ ，则

$$G / N \cong \bar{G} / \bar{N} \text{ 。}$$

证明：目标找到一个同构映射。首先给出一个结构图，体现几个群和正规子群、商群的关系。



群的同构定理

因为 $N \trianglelefteq G$ ， φ 是满同态，故 $\bar{N} = \varphi(N) \trianglelefteq \bar{G}$ 。现在令

$$\begin{aligned}\tau: \quad G/N &\rightarrow \bar{G}/\bar{N} \\ xN &\mapsto \varphi(x)\varphi(N) \quad (\forall x \in G)\end{aligned}$$

1) τ 是映射：设 $aN = bN (a, b \in G)$ ，则 $a^{-1}b \in N$ ，于是有

$$\varphi(a)^{-1}\varphi(b) = \varphi(a^{-1}b) \in \varphi(N) = \bar{N}$$

从而 $\varphi(a)\bar{N} = \varphi(b)\bar{N}$ ，故 τ 是 G/N 到 \bar{G}/\bar{N} 的映射。

2) τ 是满射：任取 $\bar{a}\bar{N} \in \bar{G}/\bar{N} (\bar{a} \in \bar{G})$ ，则因 φ 是满同态，故有 $a \in G$ ，使 $\varphi(a) = \bar{a}$

从而在 τ 之下 $\bar{a}\bar{N}$ 有逆象 aN ，即 τ 是满射。

3) τ 是单射：设 $\varphi(a)\bar{N} = \varphi(b)\bar{N}$ ，则

$$\varphi(a^{-1}b) = \varphi(a)^{-1}\varphi(b) \in \bar{N}$$

故有 $c \in N$ 使

$$\varphi(a^{-1}b) = \varphi(c) \text{ 或 } \varphi(c^{-1}a^{-1}b) = \bar{e}$$

其中 \bar{e} 是 \bar{G} 的单位元。于是有 $c^{-1}a^{-1}b \in \text{Ker } \varphi$ ，故 $c \cdot c^{-1}a^{-1}b \in N$ ，即得 $aN = bN$ 。

群的同构定理

也即 τ 为一单射。

故 τ 为一双射。

下证其保持运算。由于

$$aN \cdot bN = abN \rightarrow \varphi(ab)\bar{N} = \varphi(a)\varphi(b)\bar{N} = \varphi(a)\bar{N} \cdot \varphi(b)\bar{N}$$

故 τ 保持运算，它是 G / N 到 \bar{G} / \bar{N} 的同构映射。因此 $G / N \cong \bar{G} / \bar{N}$ 。

•注：1) 以上同构也可以写为 $G / N \cong \varphi(G) / \varphi(N)$ 。若形如定理1则 φ 必为满同态， N 必为 G 的包含同态核的正规子群。

2) 定理1的又一证法，利用上一节的“群同态基本定理”，考虑群 $G \sim \bar{G} / \bar{N}$ ，也即 $a \rightarrow \varphi(a)\bar{N}$ ，实际上此映射为同态满射，且同态核为 N 。

• 推论：设 H, N 是群 G 的两个正规子群，且 $N \subseteq H$ ，则

$$G / H \cong G / N / H / N$$

证明：由自然同态知道 $G \sim G / N$ ，同态核为 N ，从而根据定理1可得上结论成立。

群的同构定理

- 例1：设 H, K 是群 G 的两个正规子群。证明：

$$G / HK \cong G / H / HK / H$$

证明：因为 $H \trianglelefteq G, K \trianglelefteq G$ ，故 $HK \trianglelefteq G$ 。又显然 $H \trianglelefteq HK$ ，故直接由以上推论知上结论成立。

- 定理2（第二同构定理）：设 G 是群，又 $H \leq G, N \trianglelefteq G$ 。则 $H \cap N \trianglelefteq H$ ，且

$$HN / N \cong H / (H \cap N)$$

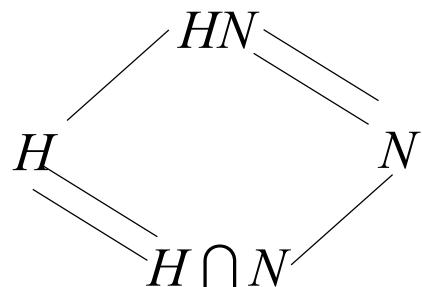
证明：首先 $HN \leq G$ ，且 $N \trianglelefteq HN$ ，易知

$$\varphi : x \rightarrow xN \quad (\forall x \in H) \quad \text{注: } (H \rightarrow HN / N)$$

为一态满射，且同态核为 $H \cap N$ ，由群同态基本定理知： $H \cap N \trianglelefteq H$ 且

$$HN / N \cong H / (H \cap N) \circ$$

如右下图示：



群的同构定理

- **例2：**设 S_3, S_4 分别为三、四元对称群, K_4 为Klein四元群。证明:

$$S_4 / K_4 \cong S_3$$

证明: 因为 $S_3 \leq S_4$ (把 S_3 中每个置换 τ 视为 $\tau(4)=4$) , 又 $K_4 \trianglelefteq S_4$, 故

$$K_4 \trianglelefteq S_3 K_4 \leq S_4$$

而 $S_3 \cap K_4 = \{(1)\}$ 。从而

$$|S_3 K_4| = \frac{|S_3| \cdot |K_4|}{|S_3 \cap K_4|} = \frac{6 \cdot 4}{1} = 24$$

于是有 $S_3 K_4 = S_4$, 由第二同构定理可得

$$S_4 / K_4 = S_3 K_4 / K_4 \cong S_3 / (S_3 \cap K_4) \cong S_3$$

因此原结论成立: $S_4 / K_4 \cong S_3$ 。

群的同构定理

• 定理3（第三同构定理）：设 G 是群，又 $N \trianglelefteq G$ ， $\bar{H} \leq G / N$ 。则

- 1) 存在 G 得唯一子群 $H \supseteq N$ ，且 $\bar{H} = H / N$ ；
- 2) 又当 $\bar{H} \trianglelefteq G / N$ 时，有唯一的 $H \trianglelefteq G$ 使

$$\bar{H} = H / N \text{ 且 } G / H \cong G / N / H / N$$

证明：1) 考虑自然同态

$$\tau : G \sim G / N$$

设 \bar{H} 在同态映射 τ 下的逆象为 H 。则 $N \subseteq H = \tau^{-1}(\bar{H}) \leq G$ ，且由于 τ 为一同态满射，故有

$$\tau(H) = \tau[\tau^{-1}(\bar{H})] = \bar{H}$$

而 $\tau(H) = H / N$ ，故可得原求证结论成立 $\bar{H} = H / N$ 。再分析，由于上节定理4可知 G 中包含 N 的不同的子群对应的像也是不同的，故 H 的存在是唯一的。

群的同构定理

2) 继续考虑自然同态不难知道, 当 \bar{H} 为 G / N 的正规子群时, G 有唯一的正规子群 $H \supseteq N$, 使得 $\bar{H} = H / N$ 。还是考虑自然同态, 利用第一同构定理不难得 到

$$G / H \cong G / N / H / N$$

原结论成立。

•注: 该定理表明, 商群 G/N 的子群仍为商群, 且形如 H/N , 其中 H 为包含 N 的 G 的子群; H 是 G 的正规子群当且仅当 H/N 为 G/N 的正规子群。

以下关于群同态基本定理和群的同构定理叙述正确的是 ()

- A 任一群在同构的意义下只能与自己的商群同态。
- B 由群同态基本定理知道循环群的商群是循环群。
- C 群的第一同构定理中的两群同态可以换成他们之间有一个同态映射，原结论仍成立。
- D 由第二同构定理不难知道 $S_4 / K_4 \cong S_3$ 。

提交

群的自同构群

- **定理1：**设M是有一个代数运算（叫做乘法）的代数系统，则M的全体自同构关于变换的乘法作成一个群，称为M的自同构群。

证明：封闭性：设 σ, τ 是M的任意两个自同构，则对M中的任二元素 a, b 有

$$\begin{aligned}\sigma\tau(ab) &= \sigma[\tau(ab)] \\ &= \sigma[\tau(a)\tau(b)] = \sigma\tau(a) \cdot \sigma\tau(b)\end{aligned}$$

即 $\sigma\tau$ 也是M的一个自同构。

逆元存在性：又因为对M的任意元素 x 有

$$\sigma\sigma^{-1}(x) = \sigma^{-1}\sigma(x) = x$$

考虑 σ^{-1} 的保持运算性质，对于任意M中二元素如上 a, b 有

$$\begin{aligned}\sigma^{-1}(ab) &= \sigma^{-1}[\sigma\sigma^{-1}(ab)] \\ &= \sigma^{-1}[\sigma\sigma^{-1}(a) \cdot \sigma\sigma^{-1}(b)] \\ &= \sigma^{-1}[\sigma(\sigma^{-1}(a) \cdot \sigma^{-1}(b))] \\ &= \sigma^{-1}(a) \cdot \sigma^{-1}(b)\end{aligned}$$

群的自同构群

即 σ^{-1} 也是 M 的自同构。因此， M 的自同构关于变换乘法作成群，也是 $S(M)$ 的一个子群。

•推论1：群 G 的全体自同构关于变换乘法作成一个群。这个群称为群 G 的自同构群，记为 $\text{Aut}G$ 。

•例1：求 Klein 四元群

$$K_4 = \{(1), (12)(34), (13)(24), (14)(23)\}$$

的自同构群。

解：分析：首先自同构把原群中的单位元映射为单位元，其他元素可能对应的情况数目成了自同构可能有的个数。

故， S_3 即对应所有 K_4 的自同构，即 $\text{Aut}K_4 = S_3$ 。

$$\begin{pmatrix} e & a & b & c \\ e & x & y & z \end{pmatrix}$$

群的自同构群

- **定理2：**无限循环群的自同构群是一个2阶循环群； n 阶循环群的自同构群是一个 $\varphi(n)$ 阶群，其中 $\varphi(n)$ 为Euler函数。

证明：首先，无限循环群有两个生成元，生成元的个数即是可能的自同构的个数。故结论成立。

其次，因 n 阶有限循环群共有 $\varphi(n)$ 个生成元，故其自同构群为 $\varphi(n)$ 阶群。

- **推论2：**无限循环群的自同构群与3阶循环群的自同构群同构。

证明：无限群的自同构群为2阶循环群，3阶群的自同构群为2阶群，所有的2阶群阶为循环群且同构。故原结论成立。

群的自同构群

• 定理3：设 G 是一个群, $a \in G$ 。则

- 1) $\tau_a : x \rightarrow axa^{-1}$ ($\forall x \in G$) 是 G 的一个自同构, 称为 G 的一个内自同构;
- 2) G 的全体内自同构作成一个群, 称为 G 的内自同构群, 记为 $InnG$;
- 3) $InnG \trianglelefteq AutG$ 。

证明：1) τ_a 是双射变换, 考虑其保运算性质。对任二元素 $x, y \in G$

$$\tau_a(xy) = a(xy)a^{-1} = a(xa^{-1}ay)a^{-1} = (axa^{-1})(aya^{-1})$$

即 $\tau_a(xy) = \tau_a(x) \cdot \tau_a(y)$, 故 τ_a 为 G 的一个自同构。

2) 设 τ_a, τ_b 为 G 的任二内自同构, 则对 G 中的任意元素 x 有

$$\tau_a \tau_b(x) = \tau_a(bxb^{-1}) = abxb^{-1}a^{-1} = \tau_{ab}(x)$$

故 $\tau_a \tau_b$ 仍为一内自同构。再考虑逆元存在性。易知 $\tau_a^{-1} = \tau_{a^{-1}}$ 也是 G 的一个内自同构。故 G 的内自同构作成一个群, 且有 $InnG \leq AutG$ 。

群的自同构群

3) 设 σ 为群G的任意一个自同构, τ_a 为G的任意一个内自同构, 取 $x \in G$, 令
 $\sigma^{-1}(x) = y, \sigma(y) = x$, 则

$$\begin{aligned}\sigma\tau_a\sigma^{-1}(x) &= \sigma\tau_a(y) = \sigma(aya^{-1}) \\ &= \sigma(a)\sigma(y)\sigma(a^{-1}) \\ &= \tau_{\sigma(a)}(x)\end{aligned}$$

即 $\sigma\tau_a\sigma^{-1}$ 仍为G的一个内自同构, 故 $InnG \trianglelefteq AutG$ 。

•注: 对于群G的正规子群来说, 总有 $aNa^{-1} \subseteq N$ 或 $\tau_a(N) \subseteq N$, 其中

$\forall a \in G, \forall \tau_a \in InnG$, 也就是说正规子群N是关于G的所有内自同构不变的子群, 因此正规子群又常被称为不变子群。

群的自同构群

- 定义1：对群G的所有自同构都不变的子群，亦即对G的任何自同构 σ ，都有

$$\sigma(N) \subseteq N$$

的子群N，叫做G的一个特征子群。

•注：

- 1) 群G和 $\{e\}$ 都是群G的特征子群。
- 2) 特征子群一定是正规子群，即特征子群一定是不变子群；反之不成立。例如， $N = \{(1), (12)(34)\} \trianglelefteq K_4$ ，但对于包含此非单位元位置的任意一个对换 σ ，都会使得 $\sigma(N) \not\subseteq N$ ，故N虽然是不变子群但却不是特征子群。

群的自同构群

- **定义2：**设 H 群 G 的一个子群。如果 H 对 G 的每个自同态映射都不变，即对 G 的每个自同态映射 φ 都有

$$\varphi(H) \subseteq H,$$

则称 H 为群 G 的一个全特征子群。

- **注：**

- 1) G 与 $\{e\}$ 是群 G 的全特征子群。
- 2) 是全特征子群一定是特征子群，但反之不成立。

- **例2：**群 G 的中心 C 是群 G 的一个特征子群。

证明：任取 $c \in C, x \in G, \sigma \in \text{Aut } G$ ，则

$$\begin{aligned}\sigma(c)x &= \sigma(c) \cdot \sigma[\sigma^{-1}(x)] \\ &= \sigma[c \cdot \sigma^{-1}(x)] = \sigma[\sigma^{-1}(x) \cdot c] \\ &= \sigma[\sigma^{-1}(x)] \cdot \sigma(c) \\ &= x\sigma(c)\end{aligned}$$

群的自同构群

即 $\sigma(c) \in C, \sigma(C) \subseteq C$, 故群G的中心C为群G的一个特征子群。

•注：但群的中心并不一定是群的全特征子群。

•例3：有理数域Q上的2阶线性群 $G = GL_2(Q)$ 的中心（Q上所有2阶纯量矩阵）不是全特征群。

证明：任取 $A \in G$ ，即A为有理数域上2阶满秩方阵，则行列式 $|A|$ 为一个有理数，故可令

$$|A| = \frac{b}{a} 2^{n(A)},$$

其中a, b为奇数, $n(A)$ 是与A有关的整数。

由于 $|AB| = |A| \cdot |B|$ ，故有

$$n(AB) = n(A) + n(B)$$

于是易知

$$\varphi: A \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & n(A) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

是G到自身的一个映射，又由于

群的自同构群

$$\varphi(AB) = \begin{pmatrix} 1 & n(AB) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & n(A)+n(B) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & n(A) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & n(B) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \varphi(A)\varphi(B)$$

故 φ 是群 G 的一个自同态映射。但是， φ 把 G 的中心元素 $\begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ 变成了非中心元素 $\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ，因此， G 的中心不是全特征子群。

- 例4：求证：循环群 $G = \langle a \rangle$ 的子群都是全特征子群。

证明：设 $H = \langle a^s \rangle \leq G$ ，任取 G 的一个自同态 φ ，则 $\varphi(a) = a^t$ ，于是

$$\varphi(a^s) = a^{st} \in H$$

从而 $\varphi(H) \subseteq H$ ，即 H 是群 G 的全特征子群。

- 注：全特征子群、特征子群、正规子群之间的关系如下：

$$\text{全特征子群} \subseteq \text{特征子群} \subseteq \text{正规子群}$$

群的自同构群

- 定理4：设C是群G的中心，则

$$InnG \cong G / C$$

证明：设

$$\varphi: \quad a \rightarrow \tau_a \quad (\forall a \in G)$$

则易知 φ 为 G 到 $InnG$ 的一个同态满射，故 $G \sim InnG$ 。

若 τ_a 为 G 的恒等自同构，即对 G 中任意的元素 x 都有 $\tau_a(x) = x$ ，即

$$axa^{-1} = x, ax = xa$$

于是可知 $a \in C$ 。

反之，任取 $c \in C$ ，显然 τ_c 是 G 的恒等自同构，故 $C = Ker\varphi$ 。于是由群同态基本定理可得

$$InnG \cong G / C$$

证毕。

群的自同构群

- 注：

- 1) 求群G的内自同构群，可通过找其中心
- 2) 自同构没那么好发现，原因是群的自身性质有时并不能转移到其自同构群上
- 3) 不同结构的群其自同构群可能同构
- 4) 无中心群的自同构群也必为无中心群，从而当 $n \geq 3$ 时 $AutS_n$ 是无中心群。

作业

- P101. 2、设 G 是群，又 $K \leq H \trianglelefteq G$ ， $K \triangleleft G$ 。证明：若 G/K 是交换群，则 G/H 也是交换群。

P107. 1、证明：阶数 ≤ 7 的循环群的自同构群都是循环群。