

近世代数 (H) 笔记

林晓烁 2024 春

<https://xiaoshuo-lin.github.io>

目 录

导言	1
第一部分 课堂笔记	2
第一章 预备知识	4
1.1 集合与映射	4
第二章 环论	7
2.1 环的定义	7
2.2 理想与商环	10
2.3 分式域与商域	14
2.4 一元多项式环	18
2.5 Euclid 整环	25
2.6 Gauss 素数	29
2.7 唯一分解整环	35
2.8 中国剩余定理	43
第三章 域论	47
3.1 域扩张与单扩张	47
3.2 域的代数扩张	52
3.3 分裂域	55
3.4 有限域	61
3.5 分圆域	65
第四章 群论	69
4.1 群的定义	69
4.2 循环群	72
4.3 正规子群与商群	74

4.4	对称群	77
4.5	群作用	83
4.6	Sylow 定理	90
4.7	自由群与群的展示	92
4.8	有限生成 Abel 群	95
4.9	群的合成列	99
4.10	半直积	102
第五章 Galois 理论		103
5.1	Galois 扩张	103
5.2	Galois 对应	106
5.3	根式扩张	110
5.4	判别式	115
第二部分 往年真题		117
第六章 期中考试题目		119
6.1	2020 春期中考试	119
6.2	2022 春期中考试	120
6.3	2023 春期中考试	121
6.4	2024 春期中考试	125
第七章 期末考试题目		127
7.1	2020 春期末考试	127
7.2	2021 春期末考试	128
7.3	2023 春期末考试	128
7.4	2024 春期末考试	129

导言

简要说明

旨趣 这是 2024 年春季学期近世代数 (H) 课堂笔记, 课程由中国科学技术大学数学科学学院陈小伍教授讲授.

附记

(1) 相关资料:

- ◇ Évariste Galois 档案: <http://www.galois-group.net>
- ◇ <https://grothendieck.umontpellier.fr/archives-grothendieck/>

(2) 访问我的个人主页查看本文档最新版本: <https://xiaoshuo-lin.github.io>

致谢

这份笔记所用 \LaTeX 模板来自北京国际数学研究中心李文威教授, 在此表示谢意.

第一部分

课堂笔记

第一章

预备知识

1.1 集合与映射

例 1.1.1 (映射的例子) (1) 恒等映射 $\text{Id}_X : X \rightarrow X, x \mapsto x$.

(2) 设 $S \subset X$. 包含映射 $\text{inc} : S \rightarrow X, s \mapsto s$.

注记 1.1.2 根据映射相等的要求, 当 $S \subsetneq X$ 时, 上述 $\text{inc} \neq \text{Id}_X$.

约定 1.1.3 用 $X \xrightarrow{f} Y$ 表示单射, 用 $X \twoheadrightarrow Y$ 表示满射, 用 $X \xrightarrow{f} Y$ 表示双射.

例 1.1.4 有如下交换图表:

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ & \searrow \bar{f} & \nearrow \text{inc} \\ & \text{Im}(f) & \end{array}$$

即 $f = \text{inc} \circ \bar{f}$, 其中 $\bar{f} : X \rightarrow \text{Im}(f), x \mapsto f(x)$.

练习 1.1.5 (范畴意义下单满射的内蕴刻画) 设 $f : X \rightarrow Y$. 证明:

(1) f 是单射 $\iff f$ 满足左消去律: $\forall g, g' : W \rightarrow X, f \circ g = f \circ g' \implies g = g'$.

(2) f 是满射 $\iff f$ 满足右消去律: $\forall h, h' : Y \rightarrow Z, h \circ f = h' \circ f \implies h = h'$.

(3) f 是双射 $\iff \exists! g : Y \rightarrow X, \text{s.t. } g \circ f = \text{Id}_X, f \circ g = \text{Id}_Y$.

例 1.1.6

$$\begin{aligned} \text{Map}(X, \{0, 1\}) &\xrightarrow{\sim} \mathcal{P}(X) \\ f &\mapsto S_f := \{x \in X : f(x) = 1\}. \end{aligned}$$

其逆映射为

$$\mathcal{P}(X) \rightarrow \text{Map}(X, \{0, 1\})$$

$$S \mapsto \chi_S,$$

其中 χ_S 为 S 的特征函数.

定义 1.1.7 (无交并的集合论定义) 设 $(A_i : i \in I)$ 是以 I 为指标集的一族集合, 其无交并定义为

$$\bigsqcup_{i \in I} A_i = \bigcup_{i \in I} \{(x, i) : x \in A_i\}.$$

例 1.1.8 典范双射

$$\begin{aligned} \text{Map}(X \sqcup Y, Z) &\xrightarrow{\sim} \text{Map}(X, Z) \times \text{Map}(Y, Z) \\ f &\mapsto (f|_X, f|_Y). \end{aligned}$$

例 1.1.9 典范双射

$$\begin{aligned} \text{Map}(X, Y \times Z) &\xrightarrow{\sim} \text{Map}(X, Y) \times \text{Map}(X, Z) \\ g &\mapsto (g_1, g_2), \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} g : X &\rightarrow Y \times Z \\ x &\mapsto (g_1(x), g_2(x)). \end{aligned}$$

例 1.1.10 (伴随双射) 存在典范双射

$$\begin{aligned} \text{Map}(X \times Y, Z) &\xrightarrow{\sim} \text{Map}(X, \text{Map}(Y, Z)) \\ f &\mapsto (x \mapsto \phi_{f,x}), \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \phi_{f,x} : Y &\rightarrow Z \\ y &\mapsto f(x, y). \end{aligned}$$

注记 1.1.11 集合 X 上最小的等价关系即“等号”:

$$E = \{(x, x) : x \in X\}.$$

定义 1.1.12 给定 X 上的等价关系 \sim^R .

- (1) $\forall a \in X, a$ 的等价类 $[a] := \{x \in X : x \sim^R a\}$.
- (2) 关于 \sim^R 的商集 $X / \sim^R := \{\text{所有的等价类}\} \subset \mathcal{P}(X)$.
- (3) 商映射 $\pi_R : X \twoheadrightarrow X / \sim^R, a \mapsto [a]$.
- (4) 关于 \sim^R 的完全代表元系为 $S \subset X$, s. t. $\forall x \in X, \exists! s \in S, s \in [x]$.

练习 1.1.13 (完全代表元系的等价刻画) 设 \sim^R 是 X 上的等价关系, $S \subset X$. 证明: S 是完全代表元系当且仅当复合映射

$$S \xrightarrow{\text{inc}} X \xrightarrow{\pi_R} X / \sim^R$$

是双射.

定义 1.1.14 集合 X 的分拆为 $\mathcal{R} = \{X_i : i \in I\} \subset \mathcal{P}(X)$, 满足

- (1) $X_i \neq \emptyset, \forall i \in I$.
- (2) $X_i \cap X_j = \emptyset, \forall i \neq j$.
- (3) $X = \bigcup_{i \in I} X_i$.

性质 1.1.15 集合 X 上的等价关系与分拆有如下关系:

- (1) 若 R 是 X 上的等价关系, 则 X / \sim^R 是 X 的一个分拆.
- (2) 若 $\mathcal{R} = \{X_i : i \in I\}$ 是 X 的分拆, 定义关系 $\sim^T: x \sim^T y \iff \exists i \in I, \text{ s.t. } x, y \in X_i$, 则 \sim^T 是 X 上的等价关系, 且 $X / \sim^T = \mathcal{R}$.

定义 1.1.16 映射 $f: X \rightarrow Y$ 给出 X 上的等价关系 $\sim^f: x \sim^f x' \iff f(x) = f(x')$. 对任意 $y \in Y$, 记 $f^{-1}(y) := \{x \in X : f(x) = y\}$, 称为 f 在 y 上的原像集 (或纤维).

注记 1.1.17 $f^{-1}(y) \neq \emptyset \iff y \in \text{Im}(f)$.

练习 1.1.18 关于 \sim^f 的等价类 $[x] = f^{-1}(f(x))$.

定理 1.1.19 (映射基本定理) 设 $f: X \rightarrow Y$, 则 f 诱导双射

$$\begin{aligned} \tilde{f}: X / \sim^f &\xrightarrow{\sim} \text{Im}(f) \\ [x] &\longmapsto f(x). \end{aligned}$$

也即有如下交换图表:

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ \pi_f \downarrow & & \uparrow \text{inc} \\ X / \sim^f & \xrightarrow{\tilde{f}} & \text{Im}(f) \end{array}$$

练习 1.1.20 设集合 X 上的二元运算 \cdot 满足结合律: $(x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z), \forall x, y, z \in X$. 证明:

$$((x \cdot y) \cdot z) \cdot w = x \cdot (y \cdot (z \cdot w)), \quad \forall x, y, z, w \in X.$$

第二章 环论

2.1 环的定义

定义 2.1.1 (含幺) 环是三元组 $(R, +, \cdot)$, 其中 $R \neq \emptyset$, 加法 $+: R \times R \rightarrow R, (a, b) \mapsto a + b$ 与乘法 $\cdot: R \times R \rightarrow R, (a, b) \mapsto a \cdot b$ 满足以下八条公理:

(A1) 加法结合律: $(a + b) + c = a + (b + c), \forall a, b, c \in R$.

(A2) 加法交换律: $a + b = b + a, \forall a, b \in R$.

(A3) 加法有零元: $\exists 0_R \in R, \text{ s.t. } a + 0_R = a, \forall a \in R$.

(A4) 加法有负元: $\forall a \in R, \exists b \in R, \text{ s.t. } a + b = 0_R$.

(M1) 乘法结合律: $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c), \forall a, b, c \in R$.

(M2) 乘法有幺元: $\exists 1_R \in R, \text{ s.t. } a \cdot 1_R = a = 1_R \cdot a, \forall a \in R$.

(D1) 关于第一个分量的分配律: $(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c, \forall a, b, c \in R$.

(D2) 关于第二个分量的分配律: $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c, \forall a, b, c \in R$.

注记 2.1.2 (1) 由 (A2) 易得加法零元唯一.

(2) 由 (A1) 与 (A2) 易得加法负元唯一. 把 a 的加法负元记作 $-a$.

(3) 定义 R 上减法: $a - b := a + (-b), \forall a, b \in R$.

(4) 由定义易得乘法幺元唯一性.

例 2.1.3 (环的例子) (1) 整数环 $\mathbb{Z} = (\mathbb{Z}, +, \cdot)$.

(2) Gauss 整数环 $\mathbb{Z}[\sqrt{-1}] := \{m + n\sqrt{-1} : m, n \in \mathbb{Z}\}$.

(3) 一元有理系数多项式环 $\mathbb{Q}[x]$.

(4) 模 $n(n \geq 2)$ 同余类环 $\overline{0}, \overline{1}, \dots, \overline{n-1}$.

(5) n 阶复方阵 $M_n(\mathbb{C})$ 是非交换环的基本例子.

定义 2.1.4 $\forall a \in R, n \in \mathbb{Z}$, 定义 a 的 n 倍 na 如下: $0a := 0_R, 1a := a$, 对 $n > 0$,

$$na := \underbrace{a + \cdots + a}_{n\uparrow}, \quad (-n)a := \underbrace{(-a) + \cdots + (-a)}_{n\uparrow}.$$

练习 2.1.5 $\forall a \in R, \forall m, n \in \mathbb{Z}$, 总有 $(m+n)a = ma + na$. 提示 留心对 m, n 异号情形的讨论.

练习 2.1.6 $\forall a \in R, n \in \mathbb{Z}$, 总有 $na = (n1_R) \cdot a$. 特别地, 当 $n = 0$ 时, 可得 $0_R = 0_R \cdot a, \forall a \in R$.

练习 2.1.7 (广义分配律) $\left(\sum_{i=1}^m a_i\right)\left(\sum_{j=1}^n b_j\right) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_i b_j$. 提示 运用双重归纳.

练习 2.1.8 $\forall n \in \mathbb{Z}, a, b \in R, (na) \cdot b = n(a \cdot b) = a \cdot (nb)$.

例 2.1.9 (零环) 以下等价:

- (1) $0_R = 1_R$.
- (2) $R = \{0_R\}$.
- (3) R 仅含一个元素.

提示 (2) \implies (3) \implies (1) 是平凡的.

阅读提示

以下如不另作说明, 环皆指非零的含么环.

例 2.1.10 (二元环) 由例 2.1.9 可知二元环中 $0_R \neq 1_R$, 进而可定出加法表与乘法表. 易见二元环本质上即 \mathbb{Z}_2 .

阅读提示

以下总假定环 R 为含么交换环.

定义 2.1.11 (a 的 n 次幂)

$$\text{当 } n \geq 1 \text{ 时, } a^n := \underbrace{a \cdots a}_{n\uparrow}; \quad a^0 := 1_R.$$

性质 2.1.12 $a^n \cdot a^m = a^{n+m}$.

定理 2.1.13 (二项式定理) 设 $a, b \in R, n \geq 1$, 则

$$(a+b)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} a^i \cdot b^{n-i}.$$

定义 2.1.14 $a \in R$ 称为乘法可逆元 (或单位), 若存在 $b \in R$, 使得 $a \cdot b = 1_R$.

注记 2.1.15 若 a 可逆, 对应的 b 是唯一的, 记 $b = a^{-1}$, 称为 a 的逆. 易知 $(a^{-1})^{-1} = a$.

定义 2.1.16 (除法) 若 a 可逆, $c \div a := c \cdot a^{-1}$.

注记 2.1.17 (1) 由于 $0_R \neq 1_R, 0_R$ 一定不可逆.

(2) 若 a 可逆, 可对全体 $n \in \mathbb{Z}$ 定义 a^n .

(3) 对可逆元有乘法消去律.

定义 2.1.18 环 R 的可逆元子集 $U(R) := \{a \in R : a \text{ 可逆}\}$ 对 R 的乘法构成一个 Abel 群, 称为 R 的单位群.

例 2.1.19 (1) $U(\mathbb{Z}) = \{1, -1\}$.

(2) $U(\mathbb{Q}) = \mathbb{Q}^\times := \mathbb{Q} \setminus \{0\}$.

(3) $U(\mathbb{Z}_n) = \{[m] : (m, n) = 1\}$.

(4) $U(\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]) = \{\pm 1, \pm \sqrt{-1}\}$.

定义 2.1.20 非零环 R 称为整环, 若 $ab = 0_R$ 蕴含 $a = 0_R$ 或 $b = 0_R$.

定义 2.1.21 非零环 R 称为域, 若非零元均可逆.

注记 2.1.22 (1) 整环中满足乘法消去律: $ab = ac \implies a(b - c) = 0_R \xrightarrow{\text{若 } a \neq 0_R} b = c$.

(2) 域是整环.

例 2.1.23 $\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]$ 是整环, 但不是域.

命题 2.1.24 设 $n \geq 2$, 则以下等价:

(1) \mathbb{Z}_n 是整环.

(2) n 是素数.

(3) \mathbb{Z}_n 是域.

提示 $(3) \implies (1) \implies (2) \implies (3)$.

注记 2.1.25 若 \mathbb{Z}_p 是域, 记之为 \mathbb{F}_p .

练习 2.1.26 设 R 为有限环, 则 R 是整环 $\iff R$ 是域.

定义 2.1.27 设 R 为环. 子集 $S \subset R$ 称为子环, 若满足 $1_R \in S$, S 对加法、减法、乘法封闭.

阅读提示

我们强烈要求 $1_R \in S$.

定义 2.1.28 设 K 为域. 子环 $S \subset K$ 称为子域, 若满足 $0_R \neq a \in S$, 则 $a^{-1} \in S$, 即对除法也封闭.

注记 2.1.29 子环自然成为环; 子域自身作为环是域.

练习 2.1.30 \mathbb{Z} 与 \mathbb{Z}_n 均没有真子环.

练习 2.1.31 \mathbb{Q} 与 \mathbb{F}_p 均没有真子域.

练习 2.1.32 $\mathbb{Q}(\sqrt{-1}) := \{a + b\sqrt{-1} : a, b \in \mathbb{Q}\} \subset \mathbb{C}$ 是子域.

练习 2.1.33 若 $S \subset \mathbb{Q}(\sqrt{-1})$ 是子域, 则 $S = \mathbb{Q}$ 或 $S = \mathbb{Q}(\sqrt{-1})$.

练习 2.1.34 设 p 是素数, 则 $R(p) := \left\{ \frac{m}{p^a} : a \geq 0, m \in \mathbb{Z} \right\} \subset \mathbb{Q}$ 是子环.

2.2 理想与商环

设 $R = (R, +, \cdot), S = (S, +, \cdot)$ 为两环.

定义 2.2.1 映射 $\theta: R \rightarrow S$ 称为环同态, 若

$$(1) \theta(a + b) = \theta(a) + \theta(b), \theta(a \cdot b) = \theta(a) \cdot \theta(b), \forall a, b \in R.$$

$$(2) \theta(1_R) = 1_S.$$

双射的环同态称为环同构, 记为 $\theta: R \xrightarrow{\sim} S$.

性质 2.2.2 (1) $\theta(0_R) = 0_S, \theta(a - b) = \theta(a) - \theta(b), \forall a, b \in R$.

$$(2) \theta(a^m) = \theta(a)^m.$$

(3) 环同态的复合仍是环同态.

(4) 若 $\theta: R \rightarrow S$ 为环同构, 则 $\theta^{-1}: S \rightarrow R$ 亦为环同构.

例 2.2.3 不存在 $\mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{Z}_n$ 的环同态. 提示 考虑 $\frac{1}{n} \in \mathbb{Q}$.

引理 2.2.4 设 $\theta: R \rightarrow S$ 为环同态, 则 $a \in U(R) \implies \theta(a) \in U(S)$, 即 θ 诱导 $U(R) \rightarrow U(S)$ 群同态.

证明 若 $a \in U(R)$, 则 $\theta(a^{-1}) = \theta(a)^{-1}$. □

定义 2.2.5 $\text{Aut}(R) := \left\{ \theta: R \xrightarrow{\sim} R \text{ 环自同构} \right\}$ 称为环 R 的自同构群.

例 2.2.6 $\text{Aut}(\mathbb{Z}) = \{\text{Id}_{\mathbb{Z}}\}$.

例 2.2.7 $\text{Aut}(\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]) = \{\text{Id}_{\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]}, \sigma\}$, 其中 $\sigma: \mathbb{Z}[\sqrt{-1}] \rightarrow \mathbb{Z}[\sqrt{-1}], z \mapsto \bar{z}$.

提示 考虑 $\sqrt{-1}$ 在环同态下的像, 结合环同态保乘法的性质.

练习 2.2.8 $\text{Aut}(\mathbb{Q}) = \{\text{Id}_{\mathbb{Q}}\}$.

练习 2.2.9 $\text{Aut}(\mathbb{Q}(\sqrt{-1})) = \{\text{Id}_{\mathbb{Q}(\sqrt{-1})}, \sigma\}$, 其中 $\sigma: \mathbb{Q}(\sqrt{-1}) \rightarrow \mathbb{Q}(\sqrt{-1}), z \mapsto \bar{z}$.

注记 2.2.10 同构的环“本质一样”, 即具有相同的性质:

$$(1) \forall a \in R, a \text{ 可逆} \iff \theta(a) \in S \text{ 可逆}.$$

$$(2) \text{有群同构 } U(R) \xrightarrow{\sim} U(S).$$

$$(3) \text{有群同构 } \text{Aut}(R) \xrightarrow{\sim} \text{Aut}(S), \phi \mapsto \theta \circ \phi \circ \theta^{-1}.$$

$$(4) R \text{ 是整环} \iff S \text{ 是整环}.$$

$$(5) R \text{ 是域} \iff S \text{ 是域}.$$

例 2.2.11 (特征同态) 对于任何环 R , 存在唯一的环同态 $\mathbb{Z} \rightarrow R, n \mapsto n1_R$, 称为特征同态.

回顾定理 1.1.19, 考虑环同态 $\theta: R \rightarrow S$, 注意到:

◇ 像 $\text{Im } \theta \subset S$ 为子环.

◇ $a \overset{\theta}{\sim} b \iff \theta(a) = \theta(b) \iff a - b \in \theta^{-1}(0_S) =: \text{Ker } \theta$ (θ 的核).

◇ 相应的等价类 $[a] = \theta^{-1}(\theta(a)) = a + \text{Ker } \theta := \{a + r : r \in \text{Ker } \theta\}$ (核的“平移”).

◇ 商集 $R/\overset{\theta}{\sim}$ 等于 $\{\text{Ker } \theta \text{ 的平移}\}$.

观察到核 $\text{Ker } \theta$ 有以下特性:

◇ 核 $\text{Ker } \theta$ 完全确定了等价关系 $\overset{\theta}{\sim}$.

◇ $\text{Ker } \theta \subset R$ 对加法、减法、乘法封闭, 但不是子环 (R 非零环 $\implies 1_R \notin \text{Ker } \theta$).

◇ 对任意 $x \in \text{Ker } \theta, a \in R$, 均有 $ax \in \text{Ker } \theta$, 即核 $\text{Ker } \theta$ 对于 R 中求“倍元”封闭 (这远强于乘法封闭性).

定义 2.2.12 非空子集 $I \subset R$ 称为理想, 若 I 对加、减法以及倍元封闭, 即

$$(1) a + b \in I, \forall a, b \in I.$$

$$(2) a \cdot r \in I, \forall a \in I, r \in R.$$

记为 $I \triangleleft R$.

注记 2.2.13 (1) 虽然 $R \triangleleft R$, 但我们通常仅考虑真理想. 理想 I 是真理想当且仅当 $1_R \notin I$.

(2) $\{0_R\}$ 与 R 是 R 的平凡理想.

(3) 任意元素 $a \in R$ 给出 a 生成的主理想 $(a) = aR := \{a \cdot r : r \in R\}$. 特别地, $(0_R) = \{0_R\}, (1_R) = R$.

(4) 环同态的核是真理想.

引理 2.2.14 环 R 为域当且仅当 R 仅有平凡理想.

例 2.2.15 \mathbb{Z} 的所有理想为 $\{n\mathbb{Z} : n \in \mathbb{N}_{\geq 0}\}$.

证明 设 $\{0\} \neq I \triangleleft \mathbb{Z}$, 则存在 $0 \neq n \in I$, 使得 $|n|$ 最小. 我们断言 $I = n\mathbb{Z}$. 注意到:

◇ $n\mathbb{Z} \subset I$.

◇ 对任意 $r \in I$, 作带余除法 $r = qn + r'$, 其中 $q \in \mathbb{Z}, 0 \leq r' < |n|$. 由 $r' = r - qn \in I$ 及 $r' < |n|$ 即知 $r' = 0$. 故 $n \mid r, \forall r \in I$. \square

约定 2.2.16 将 $a \overset{\theta}{\sim} b$ 记为 $a \equiv b \pmod{\text{Ker } \theta}$.

定义 2.2.17 给定 $I \triangleleft R$, 定义商环 R/I 如下:

(1) 同余等价关系 $a \equiv b \pmod{I} \iff a - b \in I$. 等价类 $\bar{a} = a + I$.

(2) 商集 R/\equiv 记为 R/I , 其上有自然运算 $\bar{a} + \bar{b} := \overline{a + b}, \bar{a} \cdot \bar{b} := \overline{a \cdot b}$. 故 R/I 自然成为环.

例 2.2.18 $n\mathbb{Z} \triangleleft \mathbb{Z}$ 且 $\mathbb{Z}_n = \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$.

考虑理想 $I \triangleleft R$, 典范同态 $\text{can} : R \twoheadrightarrow R/I, a \mapsto \bar{a}$, 则有 $\text{Ker}(\text{can}) = I$.

命题 2.2.19 (典范同态的泛性质) 设 $\theta: R \rightarrow S$ 为环同态, $I \triangleleft R$. 则 $I \subset \text{Ker } \theta$ 当且仅当 $\theta = \theta' \circ \text{can}$, 其中 $\theta': R/I \rightarrow S$ 为某个环同态. 此时, 由典范同态 can 为满射可知同态 θ' 是唯一的, 称其由 θ 诱导.

$$\begin{array}{ccc} R & \xrightarrow{\theta} & S \\ & \searrow \text{can} & \nearrow \exists! \theta' \text{ 环同态} \\ & R/I & \end{array}$$

证明 $(\Leftarrow) \text{Ker } \theta = \text{Ker}(\theta' \circ \text{can}) \supset \text{Ker}(\text{can}) = I$.

(\Rightarrow) 定义映射 $\theta': R/I \rightarrow S, [a] \mapsto \theta(a)$. 检验其良定性: 对任意 $a, b \in R$, 若 $[a] = [b]$, 则 $a - b \in I \subset \text{Ker } \theta$, 从而 $\theta(a) = \theta(b)$ 即 $\theta'([a]) = \theta'([b])$. 易见 θ' 为环同态. \square

定理 2.2.20 (环同态基本定理) 设 $\theta: R \rightarrow S$ 为环同态, 则唯一存在环同构

$$\bar{\theta}: R/\text{Ker } \theta \xrightarrow{\sim} \text{Im } \theta$$

使得下图交换:

$$\begin{array}{ccc} R & \xrightarrow{\theta} & S \\ \text{can} \downarrow & & \uparrow \text{inc} \\ R/\text{Ker } \theta & \xrightarrow{\bar{\theta}} & \text{Im } \theta \end{array}$$

提示 由定理 1.1.19, 只需验证 $\bar{\theta}$ 为环同态.

注记 2.2.21 (1) 设 $\theta: R \rightarrow S$ 是单的, 则 $\text{Ker } \theta = \{0_R\}$, 有环同构 $R \simeq \text{Im } \theta$, 可将 R “等同于” S 的子环. 单的环同态又称为环嵌入.

(2) 设 $\theta: R \rightarrow S$ 是满的, 则有环同构 $R/\text{Ker } \theta \simeq S$, 可将 S “等同于” R 的商环.

定义 2.2.22 由例 2.2.15 知特征同态 $\mathbb{Z} \rightarrow R$ 的核为 $n\mathbb{Z}$, 其中 $n = 0$ 或 $n \geq 2$. 记 $n = \text{char}(R)$, 称为环 R 的特征.

注记 2.2.23 由定理 2.2.20,

- ◇ 若 $\text{char}(R) = 0$, 则有环嵌入 $\mathbb{Z} \hookrightarrow R$.
- ◇ 若 $\text{char}(R) = n \geq 2$, 则有环嵌入 $\mathbb{Z}_n = \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \hookrightarrow R$.

推论 2.2.24 整环的特征为 0 或素数 p .

证明 设整环 R 的特征为 n , 则 $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ 同构于 R 的子环, 从而也是整环, 再利用命题 2.1.24 即可. \square

注记 2.2.25 特别地, 当 K 为域时, 若 $\text{char}(K) = 0$, 则 $\mathbb{Z} \hookrightarrow K$; 若 $\text{char}(K) = \text{素数 } p$, 则 $\mathbb{F}_p \hookrightarrow K$ 为子域. 对于特征 0 域 K 及其特征同态 ϕ , 我们进一步断言, 可将 ϕ 延拓为单同态

$$\begin{aligned} \tilde{\phi}: \mathbb{Q} &\hookrightarrow K \\ \frac{n}{m} &\mapsto \phi(n) \cdot \phi(m)^{-1}, \end{aligned}$$

其中 $n \in \mathbb{Z}, m \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$. 由 ϕ 是环同态可验证 $\tilde{\phi}$ 是良定的.

练习 2.2.26 验证注记 2.2.25 中的映射 $\tilde{\phi}$ 是单的环同态.

例 2.2.27 考虑环 R 的两个理想 $I \subset J$, 有典范同态

$$R/I \twoheadrightarrow R/J, \quad a + I \mapsto a + J.$$

其良定性可由 $I \subset J$ 得到, 亦可借助命题 2.2.19, 由 $I \subset J = \text{Ker}(\text{can}_J)$ 得到如下交换图表:

$$\begin{array}{ccc} R & \xrightarrow{\text{can}_J} & R/J \\ & \searrow \text{can}_I & \nearrow \exists! \text{ 环同态} \\ & R/I & \end{array}$$

◇ 此典范同态的核为 $\{a + I : a + J = 0_{R/J}\} = \{a + I : a \in J\} \triangleleft R/I$, 记为 J/I .

◇ 由定理 2.2.20, 此典范同态诱导环同构

$$(R/I)/(J/I) \xrightarrow{\sim} R/J, \quad (a + I) + J/I \mapsto a + J.$$

◇ **(对应定理)** 固定 $I \triangleleft R$, 则存在双射

$$\begin{aligned} \{J \triangleleft R : J \supset I\} &\xleftrightarrow{1:1} \{R/I \text{ 的理想}\} \\ J &\longmapsto J/I \\ \{a \in R : a + I \in \bar{J}\} &\xleftarrow{\psi} \bar{J}. \end{aligned}$$

练习 2.2.28 对例 2.2.27 中的映射 ψ , 验证以下断言:

- (1) $\psi(\bar{J}) \in \{J \triangleleft R : J \supset I\}, \forall \bar{J} \triangleleft R/I$.
- (2) $\psi(\bar{J})/I = \bar{J}, \forall \bar{J} \triangleleft R/I$.
- (3) $\psi(J/I) = J$.

例 2.2.29 (\mathbb{Z}_n 的理想) 由例 2.2.27 对应定理, $\{\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \text{ 的理想}\} \xleftrightarrow{1:1} \{J \triangleleft \mathbb{Z} : J \supset n\mathbb{Z}\}$. 再结合例 2.2.15, 有 $\{\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \text{ 的理想}\} \xleftrightarrow{1:1} \{d\mathbb{Z} : d \geq 1, d \mid n\}$. 换言之, 存在双射

$$\{d : d \geq 1, d \mid n\} \xrightarrow{\sim} \{\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \text{ 的理想}\}, \quad d \mapsto d\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}.$$

特别地, 当 p 为素数时, 域 \mathbb{F}_p 仅有平凡理想, 这回应了引理 2.2.14.

练习 2.2.30 (例 2.2.27 对应定理的子环版本) 固定 $I \triangleleft R$, 则存在双射

$$\{S \subset R \text{ 子环} : S \supset I\} \xrightarrow{\sim} \{R/I \text{ 的子环}\}, \quad S \mapsto S/I.$$

练习 2.2.31 设 R 为环, $S \subset R$ 为子环, $I \triangleleft R$ 为理想. 则

- (1) $S + I = \{a + x : a \in S, x \in I\}$ 为子环.
- (2) $S \cap I$ 为 S 的理想.
- (3) 存在环同构

$$S/(S \cap I) \xrightarrow{\sim} (S + I)/I, \quad a + (S \cap I) \mapsto a + I.$$

提示 考虑满射 $S \twoheadrightarrow (S+I)/I$.

练习 2.2.32 证明: 有限环的特征必然为正数.

练习 2.2.33 设 D 为整环, m 和 n 为互素的正整数, $a, b \in D$. 如果 $a^m = b^m, a^n = b^n$, 求证 $a = b$.

练习 2.2.34 对任意 $n \geq 0$, 记 $R_n = \{a + b\sqrt{-1} : a \in \mathbb{Z}, b \in n\mathbb{Z}\}$.

- (1) R_n 为 $\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]$ 的子环.
- (2) 对任意 $\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]$ 的子环 S , 存在唯一 $n \geq 0$ 使得 $S = R_n$.
- (3) 若 $n \neq m$, 则 $R_n \not\subset R_m$.

这样就分类了 $\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]$ 的子环.

证明 (3) 若存在环同态 $\theta : R_n \rightarrow R_m$, 则 $\theta|_{\mathbb{Z}} = \text{Id}_{\mathbb{Z}}$. 由 $\theta(n\sqrt{-1})^2 = \theta(-n^2) = -n^2$ 得 $\theta(n\sqrt{-1}) \in \text{Root}_{\mathbb{C}}(x^2 + n^2) = \{\pm n\sqrt{-1}\}$, 进而 $R_n \subset R_m$. 故若 $R_n \simeq R_m$, 则 $R_n = R_m$. \square

练习 2.2.35 对全体素数的子集 S , 记 $\mathbb{Z}_S = \{\frac{m}{n} : (m, n) = 1, n \text{ 的素因子} \in S\} \cup \{0\}$.

- (1) \mathbb{Z}_S 为 \mathbb{Q} 的子环.
- (2) 对任意 \mathbb{Q} 的子环 R , 存在唯一素数集合 S 使得 $\mathbb{Z}_S = R$.
- (3) 若 $S \neq S'$ 为全体素数的两个子集, 则 $\mathbb{Z}_S \not\subset \mathbb{Z}_{S'}$.

这样就分类了 \mathbb{Q} 的子环.

证明 (3) 设存在环同态 $\theta : \mathbb{Z}_S \rightarrow \mathbb{Z}_{S'}$. 对任意 $p \in S$, 有 $\frac{1}{p} \in \mathbb{Z}_S$. 由于 $1 = \theta(1) = \theta(p) \cdot \theta(\frac{1}{p}) = p \cdot \theta(\frac{1}{p})$, 而 $x = \frac{1}{p}$ 是方程 $px = 1$ 在 \mathbb{Q} 上的唯一解, 因此 $\theta(\frac{1}{p}) = \frac{1}{p}$. 这说明 $p \in S'$, 因此 $S \subset S'$. 故若 $\mathbb{Z}_S \simeq \mathbb{Z}_{S'}$, 则 $S = S'$. \square

2.3 分式域与商域

设 R 为整环, 记 $R^\times := R \setminus \{0_R\}$. 考虑 $R \times R^\times$ 上的关系

$$(a, x) \simeq (b, y) \iff ay = bx.$$

练习 2.3.1 证明如上关系 \simeq 是 R 上的等价关系. **提示** 传递性需要用到整环的性质.

相应的等价类记为

$$\frac{a}{x} := \{(b, y) \in R \times R^\times : (b, y) \simeq (a, x)\},$$

称为分式. 分式的全体记为 $\text{Frac}(R) = R \times R^\times / \simeq$. 在 $\text{Frac}(R)$ 上自然定义加法和乘法

$$\frac{a}{x} + \frac{b}{y} = \frac{ay + bx}{xy}, \quad \frac{a}{x} \cdot \frac{b}{y} = \frac{ab}{xy}.$$

注意定义的合理性需要整环的性质: $x, y \neq 0_R \implies xy \neq 0_R$.

命题 2.3.2 $\text{Frac}(R)$ 是域, 称为 R 的分式域.

考虑典范同态 $\text{can}_R : R \hookrightarrow \text{Frac}(R), r \mapsto \frac{r}{1_R}$, 它是单的, 因而可将 R 视作域 $\text{Frac}(R)$ 的子环.

命题 2.3.3 can_R 是同构当且仅当 R 是域.

定理 2.3.4 (典范同态的泛性质) 设 R 为整环, K 为域, $\phi: R \hookrightarrow K$ 为环的单同态, 则存在唯一的域嵌入 $\tilde{\phi}: \text{Frac}(R) \hookrightarrow K$ 使得下图交换:

$$\begin{array}{ccc} R & \xrightarrow{\phi} & K \\ \text{can}_R \searrow & & \nearrow \exists! \tilde{\phi} \text{ 域嵌入} \\ & \text{Frac}(R) & \end{array}$$

进一步, $\tilde{\phi}$ 是同构当且仅当任意 $w \in K$ 均可表为 $w = \phi(a)\phi(x)^{-1}$, 其中 $a \in R, x \in R^\times$.

证明 (1) 先证明 $\tilde{\phi}$ 的至多唯一性. 对任意 $\frac{a}{x} \in \text{Frac}(R)$ (其中 $a \in R, x \in R^\times$),

$$\tilde{\phi}\left(\frac{a}{x}\right) = \tilde{\phi}\left(\frac{a}{1_R} \cdot \left(\frac{x}{1_R}\right)^{-1}\right) = \tilde{\phi}\left(\frac{a}{1_R}\right)\phi\left(\frac{x}{1_R}\right)^{-1} \stackrel{\tilde{\phi} \circ \text{can}_R = \phi}{=} \phi(a)\phi(x)^{-1}.$$

(2) 再验证如上 $\tilde{\phi}\left(\frac{a}{x}\right) = \phi(a)\phi(x)^{-1}$ 构造的良好性:

- ◇ 因为 ϕ 为单同态, 所以 $x \neq 0_R \implies \phi(x) \neq 0_K, \phi(x)$ 可逆.
- ◇ $\tilde{\phi}$ 不依赖于代表元的选取.

(3) 易验证 $\tilde{\phi}$ 是域同态, 再由练习 2.3.6 知 $\tilde{\phi}$ 是域嵌入.

(4) $\tilde{\phi}$ 是同构 $\iff \tilde{\phi}$ 是满射, 再由 (1) 中 $\tilde{\phi}$ 的构造即得定理最后的断言. □

注记 2.3.5 (1) 可认为 $\tilde{\phi}$ 延拓了 ϕ .

(2) 分式域 $\text{Frac}(R)$ 是包含 R 的最小域.

练习 2.3.6 设 $\theta: K \rightarrow L$ 为域之间的同态, 则 θ 是单同态.

例 2.3.7 $\mathbb{Z} \subset \mathbb{Q}$ 诱导了域同构 $\text{Frac}(\mathbb{Z}) \simeq \mathbb{Q}$.

练习 2.3.8 考虑练习 2.2.35 中的 \mathbb{Z}_S , 证明 $\text{Frac}(\mathbb{Z}_S) \simeq \mathbb{Q}$.

证明 由定理 2.3.4, 存在唯一的域嵌入 $\theta: \text{Frac}(\mathbb{Z}_S) \hookrightarrow \mathbb{Q}$ 使得下图交换:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{Z}_S & \xrightarrow{\text{inc}} & \mathbb{Q} \\ \text{can}_{\mathbb{Z}_S} \searrow & & \nearrow \exists! \theta \text{ 域嵌入} \\ & \text{Frac}(\mathbb{Z}_S) & \end{array}$$

由练习 2.1.31, \mathbb{Q} 没有真子域, 因此 $\text{Frac}(\mathbb{Z}_S) \simeq \mathbb{Q}$. □

练习 2.3.9 $\mathbb{Z}[\sqrt{-1}] \subset \mathbb{Q}(\sqrt{-1})$ 诱导了域同构 $\text{Frac}(\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]) \simeq \mathbb{Q}(\sqrt{-1})$. 提示 利用注记 2.3.5 (2).

阅读提示

一般来说, 很难确定等价关系 \simeq 的完全代表元系, 因而集合 $\text{Frac}(R)$ 难以捉摸. 但当整环 R 具有某些性质 (例如是唯一分解整环) 时, 我们对 $\text{Frac}(R)$ 能作进一步了解 (例如可定义既约分式). 例如, 由于有理数具有既约表达式, 我们对集合 $\text{Frac}(\mathbb{Z}) = \mathbb{Q}$ 的大小是有所了解的.

例 2.3.10 设 F 为域. 由注记 2.2.25,

◇ 若 $\text{char}(F) = 0$, 则 $\mathbb{Z} \hookrightarrow F$. 根据定理 2.3.4, 由 $\text{can}_{\mathbb{Z}}$ 的泛性质, 存在唯一的域嵌入

$$\begin{aligned}\theta: \mathbb{Q} &\hookrightarrow F \\ \frac{n}{m} &\mapsto (n1_F)(m1_F)^{-1}.\end{aligned}$$

因此 \mathbb{Q} 可视为 F 的子域, F 自然成为 \mathbb{Q} -线性空间, 其上的数乘运算. 定义为

$$\lambda \cdot v = \theta(\lambda)v, \quad \forall \lambda \in \mathbb{Q}, v \in F.$$

◇ 若 $\text{char}(F) = p > 0$, 则存在唯一的域嵌入

$$\begin{aligned}\theta: \mathbb{F}_p &\hookrightarrow F \\ \bar{n} &\mapsto n1_F.\end{aligned}$$

因此 F 自然成为 \mathbb{F}_p -线性空间, 其上的数乘运算. 定义为

$$\lambda \cdot v = \theta(\lambda)v, \quad \forall \lambda \in \mathbb{F}_p, v \in F.$$

定义 2.3.11 设 R 为环. 真理想 $\mathfrak{p} \subsetneq R$ 称为素理想, 若 $ab \in \mathfrak{p}$ 蕴含着 $a \in \mathfrak{p}$ 或 $b \in \mathfrak{p}$.

注记 2.3.12 (1) $\{0_R\}$ 为素理想 $\iff R$ 为整环.

(2) 设 $\mathfrak{p} \subsetneq R$, 则 \mathfrak{p} 为素理想 $\iff R/\mathfrak{p}$ 是整环.

例 2.3.13 设 $p \geq 1$, 则 $p\mathbb{Z} \subsetneq \mathbb{Z}$ 为素理想 $\iff p$ 为素数.

定义 2.3.14 记环 R 中素理想构成的集合为 $\text{Spec}(R)$, 称为 R 的素谱.

例 2.3.15 $\text{Spec}(\mathbb{Z}) = \{(0)\} \sqcup \{(p) : p \text{ 为素数}\}.$

注记 2.3.16 参阅 [Zariski topology](#) 与 [Spectrum of a ring](#) 词条, 以了解 $\text{Spec}(R)$ 如何在 Zariski 拓扑下成为一个拓扑空间. 例子: [Spec\(\$\mathbb{Z}\$ \)](#).

定义 2.3.17 设 R 为环. 真理想 $\mathfrak{m} \subsetneq R$ 称为极大理想, 若 $\mathfrak{m} \subset I \subsetneq R$ 蕴含 $I = \mathfrak{m}$ 或 $I = R$.

定义-命题 2.3.18 真理想 $\mathfrak{m} \subsetneq R$ 是极大理想当且仅当 R/\mathfrak{m} 是域. 此时, 称域 R/\mathfrak{m} 为商域. 特别地, 极大理想是素理想.

证明 由例 2.2.27 对应定理, 存在双射

$$\{R/\mathfrak{m} \text{ 的理想}\} \xrightarrow{1:1} \{I \subsetneq R : I \supset \mathfrak{m}\}.$$

因此 $\mathfrak{m} \subsetneq R$ 为极大理想 $\iff \{I \subsetneq R : I \supset \mathfrak{m}\} = \{\mathfrak{m}, R\} \iff \{R/\mathfrak{m} \text{ 的理想}\} = \{\{0_{\mathfrak{m}}\}, R/\mathfrak{m}\} \xrightarrow{\text{引理 2.2.14}} R/\mathfrak{m} \text{ 是域.}$ 由注记 2.3.12, 极大理想是素理想. \square

上面的证明堪称简洁, 而下面对 (\Rightarrow) 的另证则给出求 R/\mathfrak{m} 中非零元的逆的具体方法:

证明 (\Rightarrow) 设 $\bar{0} \neq \bar{a} \in R/\mathfrak{m}$, 其中 $a \in R$. 则 $a \notin \mathfrak{m}$, 进而两理想之和 $Ra + \mathfrak{m} \supsetneq \mathfrak{m}$. 由 \mathfrak{m} 是极大理想知 $Ra + \mathfrak{m} = R$. 因此有 “Bézout 等式”

$$1_R = ba + \omega, \quad b \in R, \omega \in \mathfrak{m}.$$

在 R/\mathfrak{m} 中, 上式变为

$$1_{R/\mathfrak{m}} = \bar{b} \cdot \bar{a}.$$

故 \bar{a} 可逆, 其逆为 \bar{b} . □

注记 2.3.19 考虑零理想 $\{0_R\} \trianglelefteq R$, 则 R 仅有平凡理想 $\iff \{0_R\}$ 是 R 的极大理想 $\iff R/\{0_R\}$ 是域 $\iff R$ 是域. 这回应了引理 2.2.14.

定义 2.3.20 记环 R 中极大理想构成的集合为 $\text{MaxSpec}(R)$, 称为 R 的极大理想谱.

注记 2.3.21 $\emptyset \neq \text{MaxSpec}(R) \subset \text{Spec}(R)$.

例 2.3.22 $\text{MaxSpec}(\mathbb{Z}) = \{(p) : p \text{ 为素数}\}.$

注记 2.3.23 Hilbert's Nullstellensatz 联系代数与几何:

$$\text{MaxSpec}(\mathbb{C}[x_1, \dots, x_n]) \xrightarrow{1:1} \mathbb{C}^n.$$

定义 2.3.24 设 R 为整环, $a \neq 0_R$. a 在 R 中整除 b (记为 $a \mid b$) $\iff b \in (a)$.

定义 2.3.25 设 R 为整环. 非零元 $a \in R$ 称为素元, 若 (a) 为素理想.

注记 2.3.26 (1) 设 a 非零非单位, 则 a 为素元 $\iff a \mid xy$ 蕴含 $a \mid x$ 或 $a \mid y$.

(2) 若 a 为素元, 则 $(a) \neq R$, 因此 $a \notin U(R)$.

(3) 域上无素元.

定义 2.3.27 设 R 为整环. 非零元 $a \in R$ 称为不可约元, 若 $a \notin U(R)$, 且 $a = bc$ 蕴含 $b \in U(R)$ 或 $c \in U(R)$.

注记 2.3.28 任意 $u \in U(R)$ 给出 a 的平凡分解 $a = u \cdot (u^{-1}a) = (u^{-1}a) \cdot u$, 因此不可约元可理解为“只有平凡分解的元素”.

例 2.3.29 在 \mathbb{Z} 中, 素元 = 不可约元 = $\pm p$, p 为素数.

命题 2.3.30 素元总不可约.

证明 设 $a \in R$ 是素元, 则 $a \notin U(R)$. 设 $a = bc$, 则 $a \mid bc$, 进而 $a \mid b$ 或 $a \mid c$. 不妨设 $a \mid b$, 则存在 $c' \in R$ 使得 $b = ac'$. 于是 $a = bc = ac'c$, 即 $a(1_R - c'c) = 0_R$. 因为 R 是整环, $a \neq 0_R$, 所以 $c'c = 1_R$, $c \in U(R)$. □

例 2.3.31 令 $\mathbb{Z}[\sqrt{-3}] := \{m + n\sqrt{-3} : m, n \in \mathbb{Z}\}$, 则 $\mathbb{Z}[\sqrt{-3}]$ 是 \mathbb{C} 的子环, 进而是整环. 断言: 在 $\mathbb{Z}[\sqrt{-3}]$ 中, 2 不可约, 但非素.

证明 (2 不可约) 设 $2 = (m + n\sqrt{-3})(m' + n'\sqrt{-3})$, 其中 $m, n, m', n' \in \mathbb{Z}$. 两边取模再平方即得

$$4 = (m^2 + 3n^2)((m')^2 + 3(n')^2).$$

由于 $4 \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ 只有 $4 = 1 \cdot 4 = 2 \cdot 2$ 两种分解, 而 $m^2 + 3n^2$ 不可能为 2, 所以 $m^2 + 3n^2 = 1$ 或 4. 不妨设 $m^2 + 3n^2 = 1$, 则 $m = \pm 1, n = 0, m + n\sqrt{-3} = \pm 1$ 可逆. 故 2 在 $\mathbb{Z}[\sqrt{-3}]$ 中不可约.

(2 非素) 注意到 $2 \mid 4 = (1 + \sqrt{-3})(1 - \sqrt{-3})$, 但 $2 \nmid (1 + \sqrt{-3}), 2 \nmid (1 - \sqrt{-3})$. □

练习 2.3.32 令 $\omega := \frac{-1+\sqrt{-3}}{2}$, 定义 Eisenstein 整数环 $\mathbb{Z}[\omega] := \{m + n\omega : m, n \in \mathbb{Z}\}$.

(1) 验证 $\mathbb{Z}[\omega]$ 是 \mathbb{C} 的子环, 进而是整环.

(2) 证明 2 是 $\mathbb{Z}[\omega]$ 中的素元.

证明 (2) 定义范数映射

$$N: \mathbb{Z}[\omega] \rightarrow \mathbb{Z}_{\geq 0} \\ a + b\omega \mapsto a^2 - ab + b^2.$$

由于 $a^2 - ab + b^2 = \frac{1}{4}[(2a-b)^2 + 3b^2]$, $N(x) = 0 \iff x = 0$. 容易验证, $N(a + b\omega)$ 为偶数 $\iff a, b$ 均为偶数. 设 $2 \mid xy$, 其中 $x, y \in \mathbb{Z}[\omega]$. 则 $4 \mid N(x)N(y)$, 进而 $N(x), N(y)$ 至少有一个为偶数, 因此 $2 \mid x$ 或 $2 \mid y$. 故 2 是 $\mathbb{Z}[\omega]$ 中的素元. \square

注记 2.3.33 从例 2.3.31 和练习 2.3.32 看到, 2 在 $\mathbb{Z}[\sqrt{-3}]$ 中非素, 但在 $\mathbb{Z}[\omega]$ 中是素元.

练习 2.3.34 证明: 含么交换有限环的素理想必是极大理想. 提示 利用练习 2.1.26.

练习 2.3.35 设 $f: R \rightarrow S$ 是环的满同态, $K = \text{Ker } f$. 求证:

- (1) 若 P 是 R 的素理想并且 $P \supset K$, 则 $f(P)$ 也是 S 的素理想.
- (2) 若 Q 是 S 的素理想, 则 $f^{-1}(Q) = \{a \in R: f(a) \in Q\}$ 也是 R 的素理想.
- (3) S 中素理想和 R 中包含 K 的素理想是一一对应的. 将“素理想”换成“极大理想”则此论断也成立.

2.4 一元多项式环

定义 2.4.1 设 x 为字母 (形式符号). 环 R 上关于 x 的 (形式) 多项式

$$f(x) = a_n x^n + \cdots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0,$$

系数 $a_i \in R$, 其中的 $a_i x^i$ 为单项式. 约定 $x^0 := 1_R$, 则可记 $f(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i$. 若 $a_n \neq 0_R$, 则称 $a_n x^n$ 为首项, a_n 为首项系数, 定义次数 $\deg(f) = n$. 称 a_0 为常数项.

注记 2.4.2 零多项式 0_R 不定义其次数. 其他常值多项式 a 的次数为 0.

约定 2.4.3 $0_R x^i$ 可以略去, $1_R x^i$ 简记为 x^i .

定义 2.4.4 多项式 $f(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i$ 称为首一的, 若 $a_n = 1_R$.

定义 2.4.5 称两多项式相等, 若它们对应系数相等.

命题 2.4.6 记 R 上多项式全体为 $R[x]$, 则 $R[x]$ 自然成为环, 称为 R 上的一元多项式环.

◇ 加法: 对应系数相加.

◇ 乘法: 若 $f(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i, g(x) = \sum_{j=0}^m b_j x^j$, 定义 $f(x)g(x) = \sum_{l=0}^{m+n} c_l x^l$, 其中 $c_l = \sum_{i=0}^l a_i b_{l-i}$ (若下标超出范围则取为 0).

练习 2.4.7 验证多项式环中的乘法运算满足结合律.

注记 2.4.8 有典范环嵌入 $R \hookrightarrow R[x], a \mapsto a$ 常值多项式.

命题 2.4.9 提示 考虑首项系数. 若 R 为整环, 则 $R[x]$ 亦为整环. 特别地, 若 k 为域, 则 $k[x]$ 为整环.

性质 2.4.10 设 R 是整环, $f(x), g(x) \neq 0_R$, 则 $\deg(f(x)g(x)) = \deg(f(x)) + \deg(g(x))$.

推论 2.4.11 $R[x]$ 绝不是域, 因为 $U(R[x]) \simeq U(R)$.

练习 2.4.12 ($R[x]$ 的等价定义) 考虑

$$\bar{R} := \{\underline{a} = (a_0, a_1, \dots) : a_i \in R, \text{ 当 } i \text{ 充分大时 } a_i = 0_R\}.$$

定义加法和乘法如下:

$$\begin{aligned}\underline{a} + \underline{b} &= (a_0 + b_0, a_1 + b_1, \dots), \\ \underline{a} \cdot \underline{b} &= (c_0, c_1, \dots),\end{aligned}$$

其中 $c_0 = \sum_{i=0}^l a_i b_{l-i}$. 证明:

- (1) \bar{R} 是环.
- (2) 存在环同构

$$R[x] \xrightarrow{\sim} \bar{R}, \quad f(x) = \sum_{i \geq 0} a_i x^i \mapsto \underline{a} = (a_0, a_1, \dots).$$

命题 2.4.13 (典范环嵌入的泛性质) 设 R 为环. 对于任给的环同态 $\psi : R \rightarrow S$ 以及 $s \in S$, 唯一存在环同态

$$\tilde{\psi} : R[x] \rightarrow S$$

使得 $\tilde{\psi}|_R = \psi$ 且 $\tilde{\psi}(x) = s$.

证明 (1) 先证明 $\tilde{\psi}$ 的至多唯一性:

$$\tilde{\psi}(a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0) = \psi(a_n) s^n + \dots + \psi(a_1) s + \psi(a_0).$$

- (2) 再验证如上 $\tilde{\psi}$ 是环同态 (留作练习).

□

例 2.4.14 考虑 Id_R 以及 $a \in R$, 则 a 处的赋值同态

$$\text{ev}_a : R[x] \rightarrow R$$

使得 $f(x) \mapsto f(a)$, 称为多项式 $f(x)$ 在 a 处的取值.

练习 2.4.15 对任意集合 X , $\text{Map}(X, R)$ 为环 (加法、乘法由 R 中运算诱导).

例 2.4.16 固定 $f(x) \in R[x]$, 则有多项式函数

$$f : R \rightarrow R, \quad a \mapsto f(a),$$

即 $f \in \text{Map}(R, R)$. 定义函数环 $\text{Map}(R, R)$ 以及赋值同态

$$\text{ev} : R[x] \rightarrow \text{Map}(R, R), \quad f(x) \mapsto f.$$

该映射一般不是单射.

例 2.4.17 固定 $a \in R$, 则有投影同态

$$p_a : \text{Map}(R, R) \rightarrow R, \quad \theta \mapsto \theta(a).$$

并且 $\text{ev}_a = p_a \circ \text{ev}$, 其中 ev_a 来自例 2.4.14, ev 来自例 2.4.16.

设 k 为域, 则 k 中非零元均可逆, 进而可对多项式作首一化: $f(x) = a \cdot \bar{f}(x)$, 其中 a 为 f 的首项系数, $\bar{f}(x)$ 为首一多项式. 由于 $a_n \in U(k[x])$, $f(x)$ 与 $\bar{f}(x)$ 本质一样.

定理 2.4.18 ($k[x]$ 中的带余除法) 给定 $f(x) \in k[x]$, $0_k \neq h(x) \in k[x]$, 则存在 $q(x), r(x) \in k[x]$, 使得

$$f(x) = q(x) \cdot h(x) + r(x),$$

且 $r(x) = 0$ 或 $\deg(r) < \deg(h)$. 这样的 $q(x)$ 与 $r(x)$ 是唯一的, 分别称为商式与余式.

定理 2.4.19 (余数定理) 给定多项式 $f(x)$ 以及 $a \in k$, 则唯一存在多项式 $q(x) \in k[x]$ 使得

$$f(x) = q(x) \cdot (x - a) + f(a).$$

特别地, $(x - a) \mid f(x)$ 当且仅当 $f(a) = 0_k$.

注记 2.4.20 解集 $\text{Root}_k(f) := \{a \in k : f(a) = 0_k\} \xrightarrow{1:1} \{a \in k : (x - a) \mid f(x)\}$.

定义 2.4.21 整环 R 称为主理想整环 (PID), 若其任何理想均为主理想.

注记 2.4.22 按定义, 域为 PID, 但我们仅考虑非域的 PID.

命题 2.4.23 \mathbb{Z} 与 $k[x]$ (k 是域) 均为 PID. 提示 利用带余除法, 数的绝对值 \rightsquigarrow 多项式的次数.

定义 2.4.24 设 R 为整环, 非零元 a, b 的最大公因子 $d = \gcd(a, b)$ 满足:

$$\diamond d \mid a \text{ 且 } d \mid b.$$

$$\diamond \text{若 } d' \mid a \text{ 且 } d' \mid b, \text{ 则 } d' \mid d.$$

注记 2.4.25 (1) 最大公因子不一定存在.

(2) 若 $\gcd(a, b)$ 存在, 则它在相伴意义下唯一, 即若 d 和 e 都是 a, b 的最大公因子, 则存在 $u \in U(R)$, 使得 $e = ud$ (这等价于 $(e) = (d)$).

练习 2.4.26 在整环 R 中, $d = \gcd(a, b) \iff (d) \supset (a) + (b)$ 是包含 $(a) + (b)$ 的最小主理想.

命题 2.4.27 若 R 是 PID, 则对任意非零元 $a, b \in R$, $\gcd(a, b)$ 存在.

证明 由于 R 是 PID, R 中任何理想都有生成元. 特别地, 存在 $d \in R$ 使得 $(a) + (b) = (d)$. 由练习 2.4.26 的 (\Leftarrow) 即知 $d = \gcd(a, b)$. □

推论 2.4.28 若 R 是 PID, 则 R 上存在 Bézout 等式: 对任意非零元 $a, b \in R$, 存在 $u, v \in R$, 使得

$$\gcd(a, b) = u \cdot a + v \cdot b.$$

例 2.4.29 (最大公因子不一定存在) 在 $\mathbb{Z}[\sqrt{-3}]$ 中, 4 与 $(1 - \sqrt{-3})^2$ 无最大公因子.

证明 定义范数映射

$$N : \mathbb{Z}[\sqrt{-3}] \rightarrow \mathbb{Z}_{\geq 0}$$

$$m + n\sqrt{-3} \mapsto m^2 + 3n^2.$$

假设 $d = \gcd_{\mathbb{Z}[\sqrt{-3}]}(4, (1 - \sqrt{-3})^2)$ 存在, 则存在 $a, b \in \mathbb{Z}$, 使得

$$d \cdot (a + b\sqrt{-3}) = 4,$$

从而

$$N(d) \cdot (a^2 + 3b^2) = 16.$$

观察到 $1 \pm \sqrt{-3}$ 均是 4 与 $(1 - \sqrt{-3})^2$ 的公因子, $N(1 + \sqrt{-3}) = N(1 - \sqrt{-3}) = 4$, 因此 $4 \mid N(d)$. 又 $U(\mathbb{Z}[\sqrt{-3}]) = \{1, -1\}$, $1 \pm \sqrt{-3}$ 非相伴元, $N(d) > 4$. 而显然 $N(d) \neq 8$, 故 $N(d) = 16$, 这意味着 $a = \pm 1, b = 0, d = \pm 4$, 但 $d = \pm 4$ 不是 $(1 - \sqrt{-3})^2$ 的因子. \square

命题 2.4.30 若 R 是 PID, 则 R 中素元 = 不可约元.

证明 由命题 2.3.30, 只需证 R 中不可约元是素元. 设 $a \in R$ 不可约, $a \mid bc$. 假设 $a \nmid b$, 下证 $a \mid c$. 由 a 不可约可知 $\gcd(a, b)$ 相伴于 1_R , 由 Bézout 等式, 存在 $u, v \in R$ 使得

$$1_R = u \cdot a + v \cdot b.$$

两边同乘 c 得

$$c = (uc) \cdot a + v \cdot (bc) \in (a).$$

\square

命题 2.4.31 设 R 是非域的 PID, $\{0_R\} \neq \mathfrak{p} \in \text{Spec}(R)$, 则 $\mathfrak{p} \in \text{MaxSpec}(R)$. 故 R 的任何非零素理想均极大, $\text{Spec}(R) = \{0_R\} \sqcup \text{MaxSpec}(R)$.

证明 由于 R 是 PID, 存在素元 $a \in R$ 使得 $\mathfrak{p} = (a)$. 假设 \mathfrak{p} 不是极大理想, 则存在 $I \subsetneq R$, 使得

$$\mathfrak{p} \subsetneq I \subsetneq R.$$

设 $I = (b)$, 则由 $(b) \supset (a)$ 知 $b \mid a$. 由 a 是素元, $b \in U(R)$ 或 b 与 a 相伴. 若 $b \in U(R)$, 则 $(b) = R$, 矛盾; 若 b 与 a 相伴, 则 $(b) = (a)$, 也矛盾. 故 \mathfrak{p} 是极大理想. \square

推论 2.4.32 设 R 是非域的 PID, $\{0_R\} \neq \mathfrak{p} \in \text{Spec}(R)$, 则 R/\mathfrak{p} 是域.

在 $k[x]$ 中可以约定仅考虑首一多项式. 例如:

◇ 多项式 $f(x), g(x) \in k[x]$ 的最大公因式是指首一多项式 $h(x)$ 满足: $h(x) \mid f(x), h(x) \mid g(x)$, 且若 $a(x) \mid f(x), a(x) \mid g(x)$, 总有 $a(x) \mid h(x)$.

◇ $k[x]$ 中不可约元称为域 k 上的不可约多项式, 故

$$\text{MaxSpec}(k[x]) \xrightarrow{1:1} \{k \text{ 上首一不可约多项式}\}.$$

特别地, $k \hookrightarrow \text{MaxSpec}(k[x]), \lambda \mapsto x - \lambda$.

练习 2.4.33 设 $f(x)$ 是域 k 上的不可约非零多项式, $\deg(f(x)) \leq 3$, 则 $f(x)$ 在 k 上不可约 $\iff \text{Root}_k(f) = \emptyset$.

命题 2.4.34 $|\text{Root}_k(f)| \leq \deg(f(x))$. 提示 利用定理 2.4.19 归纳可证, 若 $\alpha_1, \dots, \alpha_m \in k$ 是 $f(x)$ 不同的零点, 则 $(x - \alpha_1) \cdots (x - \alpha_m) \mid f(x)$.

域扩张 设有域的包含关系 $k \subset K$, 则 $f(x) \in k[x]$ 可视为 $K[x]$ 中的元素, 且

- ◇ $\text{Root}_k(f) \subset \text{Root}_K(f)$.
- ◇ $f(x) \in k[x]$ 不可约 $\not\Rightarrow f(x) \in K[x]$ 不可约.
- ◇ 设 $f(x), g(x) \in k[x]$. 总有 $\gcd_{k[x]}(f(x), g(x)) = \gcd_{K[x]}(f(x), g(x))$.

上面最后一条断言可由辗转相除法不随域扩张而改变直接得到, 也可如下证明:

证明 记 $d_1(x) = \gcd_{k[x]}(f(x), g(x))$, $d_2(x) = \gcd_{K[x]}(f(x), g(x))$, 则 $d_1(x) \mid d_2(x)$. 由 $k[x]$ 上的 Bézout 等式, 存在 $u(x), v(x) \in k[x]$ 使得

$$d_1(x) = u(x)f(x) + v(x)g(x),$$

在 $K[x]$ 中, $d_2(x) \mid f(x), d_2(x) \mid g(x)$, 由上式即得 $d_2(x) \mid d_1(x)$. 又 $d_1(x), d_2(x)$ 均为首一多项式, 故 $d_1(x) = d_2(x)$. \square

通常情况并不如上文中域的包含关系这么理想. 考虑域同态 $\theta: k \hookrightarrow K$ (由练习 2.3.6, 域同态一定是单的, 因此 $k \simeq \text{Im } \theta$), 则自然地有环嵌入 (仍用 θ 标识)

$$\begin{aligned} \theta: k[x] &\hookrightarrow K[x] \\ f(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i &\mapsto \theta(f(x)) = \sum_{i=0}^n \theta(a_i) x^i. \end{aligned}$$

并且

- ◇ $\theta(\text{Root}_k(f)) \subset \text{Root}_K(\theta(f))$.
- ◇ $f(x) \in k[x]$ 不可约 $\not\Rightarrow \theta(f(x)) \in K[x]$ 不可约.
- ◇ 设 $f(x), g(x) \in k[x]$. 总有 $\theta(\gcd_{k[x]}(f(x), g(x))) = \gcd_{K[x]}(\theta(f(x)), \theta(g(x)))$.

练习 2.4.35 证明以上第 1 条和第 3 条断言.

Kronecker 添根构造 设 k 为域, $f(x) \in k[x]$ 为首一不可约多项式. 考虑典范同态

$$\begin{aligned} \theta: \quad k &\xrightarrow{\text{can}} k[x] \xrightarrow{\text{can}} k[x]/(f(x)) = K \\ \lambda &\longmapsto \lambda \longmapsto \bar{\lambda} = \lambda + (f(x)). \end{aligned}$$

练习 2.4.36 设 $a \in k$, 则存在域同构

$$k \xrightarrow{\sim} k[x]/(x - a).$$

提示 用带余除法.

注记 2.4.37 当 $f(x)$ 为一次首一多项式时, 由 $k[x]/(f(x))$ 得不到新的域. 因此以下设 $\deg(f(x)) = n \geq 2$. 此时 $\text{Root}_k(f) = \emptyset$.

记 $u = x + (f(x)) \in K$. 对任意 $\overline{g(x)} \in K$, 由 $k[x]$ 上的带余除法, 有

$$g(x) = q(x)f(x) + r(x),$$

其中 $r(x) = 0$ 或 $\deg(r(x)) < n$. 故 $\overline{g(x)} = \overline{r(x)}$, 进而有双射

$$\begin{array}{ccc} K & \xleftarrow{1:1} & \{r(x) \in k[x] : r(x) = 0 \text{ 或 } \deg(r(x)) < n\} \\ \overline{r(x)} & \xleftarrow{\quad\quad\quad} & r(x) \\ \theta(c_{n-1})u^{n-1} + \cdots + \theta(c_1)u + \theta(c_0) & \xleftarrow{\quad\quad\quad} & c_{n-1}x^{n-1} + \cdots + c_1x + c_0. \end{array}$$

例 2.4.38 (四元域) 记 $\mathbb{F}_2 = \{\bar{0}, \bar{1}\}$. 考虑不可约多项式 $x^2 + x + \bar{1} \in \mathbb{F}_2[x]$, 有双射

$$\begin{aligned} \{a + bx : a, b \in \mathbb{F}_2\} &\xrightarrow{1:1} \mathbb{F}_4 := \mathbb{F}_2[x]/(x^2 + x + \bar{1}) \\ a + bx &\mapsto \theta(a) + \theta(b)u. \end{aligned}$$

因此 $\mathbb{F}_4 = \{\theta(\bar{0}), \theta(\bar{1}), u, u + \theta(\bar{1})\}$.

在以上尝试中, 我们自然希望将 k 等同于 K 的子域, 以便摆脱繁琐的 θ .

练习 2.4.39 设 k, L 为域. 考虑域同态 $\theta : k \hookrightarrow L$ (由练习 2.3.6, 域同态一定是单的), 则 L 自然成为 k -线性空间. 其上的加法即域 L 上加法, 而数乘运算定义为:

$$\lambda \cdot a := \theta(\lambda) \cdot a, \quad \forall \lambda \in k, a \in L.$$

注记 2.4.40 L 作为 k -线性空间与域同态 θ 有关.

有了练习 2.4.39, 我们可以将 K 视为 k -线性空间, 于是

$$\theta(c_{n-1})u^{n-1} + \cdots + \theta(c_1)u + \theta(c_0) = c_{n-1} \cdot u^{n-1} + \cdots + c_1 \cdot u + c_0 \cdot 1_k,$$

上式右边是 k -线性组合, $\{1_k, u, \dots, u^{n-1}\}$ 是 K 的 k -线性基, $\dim_k K = n = \deg(f)$.

约定 2.4.41 由于 $\theta(\lambda) = \lambda \cdot 1_k$, 下面仍记 $\theta(\lambda) = \lambda + (f(x))$ 为 λ . 例如, 在这种约定下, 练习 2.4.39 中 $\mathbb{F}_4 = \{\bar{0}, \bar{1}, u, u + \bar{1}\}$.

练习 2.4.42 \mathbb{F}_4 的加法表与乘法表.

解答 见表 2.1.

表 2.1: $\mathbb{F}_4 = \mathbb{F}_2[x]/(x^2 + x + \bar{1})$ 的加法表与乘法表

+	$\bar{0}$	$\bar{1}$	u	$u + \bar{1}$	\times	$\bar{0}$	$\bar{1}$	u	$u + \bar{1}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	u	$u + \bar{1}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$
$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{0}$	$u + \bar{1}$	u	$\bar{1}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	u	$u + \bar{1}$
u	u	$u + \bar{1}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	u	$\bar{0}$	u	$u + \bar{1}$	$\bar{1}$
$u + \bar{1}$	$u + \bar{1}$	u	$\bar{1}$	$\bar{0}$	$u + \bar{1}$	$\bar{0}$	$u + \bar{1}$	$\bar{1}$	u

练习 2.4.43 (1) 不存在 $\mathbb{F}_4 \rightarrow \mathbb{Z}_4$ 的同态.

(2) 存在唯一的 $\mathbb{Z}_4 \rightarrow \mathbb{F}_4$ 的同态.

在约定 2.4.41 下, 可将 $k[x]$ 中多项式 $f(x) = x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a_0$ 等同于 $K[x]$ 中多项式 $x^n + \theta(a_{n-1})x^{n-1} + \cdots + \theta(a_1)x + \theta(a_0)$. 有如下重要观察:

命题 2.4.44 $u \in \text{Root}_K(f)$, 即 $f(u) = u^n + \theta(a_{n-1})u^{n-1} + \cdots + \theta(a_1)u + \theta(a_0) = 0_K$.

例 2.4.45 考虑不可约多项式 $x^2 + 1 \in \mathbb{R}[x]$ 以及域嵌入

$$\begin{aligned}\theta: \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R}[x]/(x^2 + 1) = K \\ a &\mapsto \theta(a) = a + (x^2 + 1) \text{ (仍记为 } a\text{)}.\end{aligned}$$

记 $u = x + (x^2 + 1) \in K$, 则 K 作为 \mathbb{R} -线性空间有 \mathbb{R} -基 $\{1, u\}$, K 中元素为 $a + bu$, 其中 $a, b \in \mathbb{R}$. 有同构

$$K \xrightarrow{\sim} \mathbb{C}, \quad a + bu \mapsto a + b\sqrt{-1}.$$

但 K 未必就是 \mathbb{C} , 因为另有同构

$$K \xrightarrow{\sim} \mathbb{C}, \quad a + bu \mapsto a - b\sqrt{-1}.$$

又 $u \in \text{Root}_K(x^2 + 1)$, 由定理 2.4.19 可得 $x^2 + 1$ 在 $K[x]$ 中的分解 (运用 Vieta 定理):

$$x^2 + 1 = (x - u)(x + u).$$

例 2.4.46 由于 $u \in \text{Root}_{\mathbb{F}_4}(x^2 + x + \bar{1})$, \mathbb{F}_2 上不可约多项式 $x^2 + x + \bar{1}$ 在 \mathbb{F}_4 上有分解 (运用 Vieta 定理及表 2.1)

$$x^2 + x + \bar{1} = (x + u)(x + u + \bar{1}).$$

定理 2.4.47 (θ 的泛性质) 考虑 $K = k[x]/(f(x))$, $u = x + (f(x))$, 域同态 $\delta: k \rightarrow F$, 以及 $\alpha \in \text{Root}_F(\delta(f))$. 则唯一存在域同态 $\delta': K \rightarrow F$ 使得 $\delta = \delta' \circ \theta$ 且 $\delta'(u) = \alpha$.

$$\begin{array}{ccccc} k & \xrightarrow{\theta} & K & \ni & u \\ & \searrow \delta & \swarrow \exists! \delta' \text{ 域同态} & & \\ & & F & & \\ & & \downarrow \Psi & & \\ & & \alpha & \xleftarrow{\quad} & \end{array}$$

证明 (1) 先证明 δ' 的至多唯一性: $\{1_k, u, \dots, u^{n-1}\}$ 是 K 的 k -线性基, 且

$$\delta'(\theta(c_{n-1})u^{n-1} + \cdots + \theta(c_1)u + \theta(c_0)) = \delta(c_{n-1})\alpha^{n-1} + \cdots + \delta(c_1)\alpha + \delta(c_0).$$

(2) 再给出 δ' 的构造. 由命题 2.4.13, 唯一存在环同态 $\tilde{\delta}: k[x] \rightarrow F$, 使得 $\tilde{\delta}|_k = \delta$ 且 $\tilde{\delta}(x) = \alpha$, 进而 $\tilde{\delta}(f(x)) = \delta(f)(\alpha) = 0_F$. 于是 $(f(x)) \subset \text{Ker } \tilde{\delta}$. 由命题 2.2.19, $\tilde{\delta}$ 诱导环同态

$$\begin{aligned}\delta': K = k[x]/(f(x)) &\rightarrow F \\ \overline{g(x)} &\mapsto \tilde{\delta}(g(x)).\end{aligned}$$

δ' 使得 $\delta = \delta' \circ \theta$ 且 $\delta'(u) = \tilde{\delta}(x) = \alpha$. □

注记 2.4.48 等式 $\delta = \delta' \circ \theta$ 意味着 δ' 延拓 δ .

练习 2.4.49 (九元域) 记 $\mathbb{F}_3 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}\}$. 考虑不可约多项式 $x^2 + \bar{1} \in \mathbb{F}_3[x]$, 以及域同态

$$\mathbb{F}_3 \hookrightarrow \mathbb{F}_3[x]/(x^2 + \bar{1}) =: \mathbb{F}_9.$$

记 $v = x + (x^2 + \bar{1}) \in \mathbb{F}_9$.

(1) \mathbb{F}_9 的加法表与乘法表.

(2) 在 $\mathbb{F}_9[x]$ 中分解 $x^2 + \bar{1}$.

解答 (2) $x^2 + \bar{1} = (x - u)(x - \bar{2}u)$. □

练习 2.4.50 记 $K = \mathbb{R}[x]/(x^2 + 2)$, $v = x + (x^2 + 2) \in K$. 证明 $K \simeq \mathbb{C}$.

练习 2.4.51 如果 D 为整环但不是域, 求证 $D[x]$ 不是 PID.

例 2.4.52 在 \mathbb{F}_9 中求 $(\bar{2}u + \bar{1})^{-1}$.

解答 由于 $\gcd_{\mathbb{F}_3[x]}(\bar{2}x + \bar{1}, x^2 + \bar{1}) = \bar{1}$, 通过带余除法可得 Bézout 等式:

$$x^2 + \bar{1} = (\bar{2}x + \bar{2})(\bar{2}x + \bar{1}) + \bar{2}.$$

因此在 \mathbb{F}_9 中

$$\bar{0} = (\bar{2}u + \bar{2})(\bar{2}u + \bar{1}) + \bar{2} \iff \bar{1} = (\bar{2}u + \bar{2})(\bar{2}u + \bar{1}),$$

即 $(\bar{2}u + \bar{1})^{-1} = \bar{2}u + \bar{2}$. □

2.5 Euclid 整环

定义 2.5.1 整环 R 称为 Euclid 整环 (ED), 若存在 Euclid 函数

$$\phi: R^\times = R \setminus \{0_R\} \rightarrow \mathbb{Z}_{\geq 0},$$

使得任给 $a, b \in R^\times$, 存在 $q, r \in R$ 满足

$$a = qb + r,$$

其中 $r = 0_R$ 或 $\phi(r) < \phi(b)$.

例 2.5.2 整数环 \mathbb{Z} 是 ED. 此时 Euclid 函数 $\phi = |\cdot|$, 而表达式不唯一, 如

$$33 = 3 \cdot 9 + 6 = 4 \cdot 9 - 3.$$

第二个表达式更好, 因为 $\phi(-3) = |-3|$ 更小.

例 2.5.3 域上的一元多项式环 $k[x]$ 是 ED. 此时 Euclid 函数 $\phi = \deg(\cdot)$.

定理 2.5.4 ED 是 PID.

证明 设 R 是 ED. 对任意非零理想 $I \triangleleft R$, 取非零元 $b \in I$ 使 $\phi(b)$ 最小. 断言: $I = (b)$. 对任意 $a \in I$, 由 R 是 ED 有

$$a = qb + r,$$

其中 $r = 0_R$ 或 $\phi(r) < \phi(b)$. 由于 $r = a - qb \in I$, 由 b 的最小性知 $r = 0_R$. 故 $b \mid a$. □

命题 2.5.5 $\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]$ 是 ED, 从而是 PID.

证明 范数映射

$$N : \mathbb{Q}(\sqrt{-1})^\times \rightarrow \mathbb{Q}_+ \\ z \mapsto z \cdot \bar{z}$$

是积性函数 (因复共轭 $\sigma \in \text{Aut}(\mathbb{C})$):

$$N(z \cdot w) = N(z) \cdot N(w), \quad \forall z, w \in \mathbb{Q}(\sqrt{-1})^\times.$$

N 限制在 $\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]^\times \subset \mathbb{Q}(\sqrt{-1})^\times$ 为 Euclid 函数. 对任意 $x, y \in \mathbb{Z}[\sqrt{-1}]^\times$, 记

$$\frac{x}{y} = \frac{x \cdot \bar{y}}{N(y)} = \alpha + \beta\sqrt{-1} \in \mathbb{Q}(\sqrt{-1})^\times, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{Q}.$$

取 $m, n \in \mathbb{Z}$ 使得

$$|\alpha - m| \leq \frac{1}{2}, \quad |\beta - n| \leq \frac{1}{2}.$$

则由

$$\frac{x}{y} = (m + n\sqrt{-1}) + [(\alpha - m) + (\beta - n)\sqrt{-1}]$$

可得

$$x = qy + r,$$

其中 $q = m + n\sqrt{-1}, r = [(\alpha - m) + (\beta - n)\sqrt{-1}] \cdot y \in \mathbb{Z}[\sqrt{-1}]$. 若 $r \neq 0$, 则

$$N(r) = [(\alpha - m)^2 + (\beta - n)^2] \cdot N(y) \leq \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right) N(y) < N(y).$$

故 $\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]$ 是 ED. □

练习 2.5.6 利用范数映射证明例 2.1.19 (4).

练习 2.5.7 记 $i = \sqrt{-1}$. 在 $\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]$ 上计算 $\gcd(4 + 7i, 3 + 4i)$.

解答 由辗转相除法:

$$\diamond \frac{4 + 7i}{3 + 4i} = \frac{8}{5} + \frac{1}{5}i = 2 + \left(-\frac{2}{5} + \frac{1}{5}i\right) \implies 4 + 7i = 2 \cdot (3 + 4i) - (2 + i).$$

$$\diamond \frac{3 + 4i}{2 + i} = 2 + i \implies \gcd(4 + 7i, 3 + 4i) = \gcd(3 + 4i, 2 + i) = 2 + i. \quad \square$$

命题 2.5.8 $\mathbb{Z}[\sqrt{-2}]$ 是 ED, 从而是 PID. 提示 $\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot 2 < 1$.

练习 2.5.9 利用范数映射证明 $U(\mathbb{Z}[\sqrt{-2}]) = \{\pm 1\}$.

命题 2.5.10 由例 2.3.31 与命题 2.4.30 知, $\mathbb{Z}[\sqrt{-3}]$ 不是 PID, 因此也不是 ED.

注记 2.5.11 由于 $\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot 3 = 1$, 命题 2.5.5 的证明方法在此处失效.

命题 2.5.12 Eisenstein 整数环 $\mathbb{Z}[\omega]$ 是 ED, 从而是 PID.

证明 ω 满足方程 $\omega^2 + \omega + 1 = 0$. 范数映射

$$N : \mathbb{Q}(\omega)^\times \rightarrow \mathbb{Q}_+ \\ a + b\omega \mapsto a^2 - ab + b^2$$

限制在 $\mathbb{Z}[\omega]^\times \subset \mathbb{Q}(\omega)^\times$ 为 Euclid 函数. 对任意 $x, y \in \mathbb{Z}[\omega]^\times$, 记

$$\frac{x}{y} = \frac{x \cdot \bar{y}}{N(y)} = \alpha + \beta\omega \in \mathbb{Q}(\omega)^\times, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{Q}.$$

取 $m, n \in \mathbb{Z}$ 使得

$$|\alpha - m| \leq \frac{1}{2}, \quad |\beta - n| \leq \frac{1}{2}.$$

则由

$$\frac{x}{y} = (m + n\omega) + [(\alpha - m) + (\beta - n)\omega]$$

可得

$$x = qy + r,$$

其中 $q = m + n\omega, r = [(\alpha - m) + (\beta - n)\omega] \cdot y \in \mathbb{Z}[\omega]$. 若 $r \neq 0$, 则

$$\begin{aligned} N(r) &= [(\alpha - m)^2 + (\beta - n)^2 - (\alpha - m)(\beta - n)] \cdot N(y) \\ &\leq \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right) N(y) < N(y). \end{aligned}$$

故 $\mathbb{Z}[\omega]$ 是 ED. □

练习 2.5.13 利用范数映射证明 $U(\mathbb{Z}[\omega]) = \{\pm 1, \pm\omega, \pm\omega^2\}$.

代数整数环 考虑 $\mathbb{Z} \subset R \subset F = \text{Frac}(R)$ 使得 $\dim_{\mathbb{Q}} F < \infty$. 这里 $\mathbb{Z} \subset R$ 应理解为 $\text{char}(R) = 0$ (参考注记 2.2.23).

定义 2.5.14 $\alpha \in F$ 称为代数整数, 若 α 满足首一的整系数方程:

$$\alpha^m + b_{m-1}\alpha^{m-1} + \cdots + b_1\alpha + b_0 = 0_F, \quad b_i \in \mathbb{Z}, m \geq 1.$$

记 F 中代数整数全体为 \mathcal{O}_F .

有如下重要事实 (可参阅 James S. Mline 的 [A Primer of Commutative Algebra](#) 中定理 6.5):

性质 2.5.15 \mathcal{O}_F 是 F 的子环, 且 $\text{Frac}(\mathcal{O}_F) \simeq F$.

命题 2.5.16 假设 $R \subset \mathcal{O}_F$. 若 R 是 PID (或更弱点, 为 UFD), 则 $R = \mathcal{O}_F$.

注记 2.5.17 为对以上“若”字之前的诸条件加深理解, 可参考以下实例:

$$\begin{array}{ccccc} \mathbb{Z} & \subset & R & \subset & F = \text{Frac}(R) \\ & & \parallel & & \parallel \\ & & \mathbb{Z}[\sqrt{-3}] & & \mathbb{Q}(\sqrt{-3}) \end{array}$$

此时 $\dim_{\mathbb{Q}} F = 2$. 由 $(x - m)^2 + 3n^2$ 零化 $m + n\sqrt{-3} \in \mathbb{Z}[\sqrt{-3}]$ 可知 $\mathbb{Z}[\sqrt{-3}] \subset \mathcal{O}_F$. 由于 ω 满足 $\omega^2 + \omega + 1 = 0, \omega \in \mathcal{O}_F \setminus \mathbb{Z}[\sqrt{-3}]$ (也可由命题 2.5.24, $-3 \equiv 1 \pmod{4}$, 因此 $\mathcal{O}_{\mathbb{Q}(\sqrt{-3})} = \mathbb{Z}[\omega] \not\supset \mathbb{Z}[\sqrt{-3}]$),

由命题 2.5.16 即知 $\mathbb{Z}[\sqrt{-3}]$ 不是 PID. 而 Eisenstein 整数环 $\mathbb{Z}[\omega]$ 是 PID, 由命题 2.5.16, $\mathbb{Z}[\omega] = \mathcal{O}_{\mathbb{Q}(\sqrt{-3})}$.

练习 2.5.18 考虑映射

$$\begin{aligned}\sigma : \mathbb{Q}(\sqrt{2}) &\rightarrow \mathbb{Q}(\sqrt{2}) \\ a + b\sqrt{2} &\mapsto a - b\sqrt{2}.\end{aligned}$$

证明:

- (1) $\sigma \in \text{Aut}(\mathbb{Q}(\sqrt{2}))$.
- (2) $\text{Aut}(\mathbb{Q}(\sqrt{2})) = \{\text{Id}_{\mathbb{Q}(\sqrt{2})}, \sigma\}$.
- (3) σ 不能延拓为 \mathbb{R} 的自同构, 即不存在 $\delta \in \text{Aut}(\mathbb{R})$, 使得 $\delta|_{\mathbb{Q}(\sqrt{2})} = \sigma$.

证明 (2) 设 $f \in \text{Aut}(\mathbb{Q}(\sqrt{2}))$, 则 $f|_{\mathbb{Z}} = \text{Id}_{\mathbb{Z}}$. 对任意 $q = \frac{n}{m}, n, m \in \mathbb{Z}$, 由 q 是方程 $f(m) \cdot q = f(n)$ 的唯一解可知 $f(q) = q$, 故 $f|_{\mathbb{Q}} = \text{Id}_{\mathbb{Q}}$. 只需确定 $f(\sqrt{2})$ 即可确定 f . 由 $f(\sqrt{2})^2 = f(\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}) = 2$ 可知 $f(\sqrt{2}) = \pm\sqrt{2}$.

◇ 若 $f(\sqrt{2}) = \sqrt{2}$, 则 $f = \text{Id}_{\mathbb{Q}(\sqrt{2})}$.

◇ 若 $f(\sqrt{2}) = -\sqrt{2}$, 则 $f = \sigma$.

- (3) 若 $\delta \in \text{Aut}(\mathbb{R})$, 则对任意 $x = y^2 \in \mathbb{R}_+$, $\delta(x) = \delta(y)^2 > 0$. □

命题 2.5.19 $\mathbb{Z}[\sqrt{2}]$ 是 ED, 从而是 PID.

证明 定义范数映射

$$\begin{aligned}N : \mathbb{Q}(\sqrt{2})^\times &\rightarrow \mathbb{Q}_+ \\ a + b\sqrt{2} &\mapsto |a^2 - 2b^2|.\end{aligned}$$

根据练习 2.5.18, 由 $N(x) = |x \cdot \sigma(x)|$ 可知 N 是积性函数:

$$N(x \cdot y) = N(x) \cdot N(y), \quad \forall x, y \in \mathbb{Q}(\sqrt{2})^\times.$$

N 限制在 $\mathbb{Z}[\sqrt{2}]^\times \subset \mathbb{Q}(\sqrt{2})^\times$ 为 Euclid 函数. 对任意 $x, y \in \mathbb{Z}[\sqrt{2}]^\times$, 记

$$\frac{x}{y} = \frac{x \cdot \sigma(y)}{y \cdot \sigma(y)} = \alpha + \beta\sqrt{2} \in \mathbb{Q}(\sqrt{2})^\times, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{Q}.$$

取 $m, n \in \mathbb{Z}$ 使得

$$|\alpha - m| \leq \frac{1}{2}, \quad |\beta - n| \leq \frac{1}{2}.$$

则由

$$\frac{x}{y} = (m + n\sqrt{2}) + [(\alpha - m) + (\beta - n)\sqrt{2}]$$

可得

$$x = qy + r,$$

其中 $q = m + n\sqrt{2} \in \mathbb{Z}[\sqrt{2}]$, $r = [(\alpha - m) + (\beta - n)\sqrt{2}] \cdot y$. 若 $r \neq 0$, 则

$$N(r) = |(\alpha - m)^2 - 2(\beta - n)^2| \cdot N(y) \leq \left[\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot 2 \right] N(y) < N(y).$$

故 $\mathbb{Z}[\sqrt{2}]$ 是 ED. □

练习 2.5.20 $U(\mathbb{Z}[\sqrt{2}])$ 为无限群.

证明 注意到 $1 + \sqrt{2} \in U(\mathbb{Z}[\sqrt{2}])$, 因此 $(1 + \sqrt{2})^n \in U(\mathbb{Z}[\sqrt{2}])$, $\forall n \geq 0$. □

注记 2.5.21 由 Dirichlet 单位定理可证 $U(\mathbb{Z}[\sqrt{2}]) = \{\pm(1 + \sqrt{2})^n : n \geq 0\}$.

命题 2.5.22 $\mathbb{Z}[\sqrt{3}]$ 是 ED, 从而是 PID.

证明 可仿照命题 2.5.19 证明, 区别仅在最后的放缩:

$$|(\alpha - m)^2 - 3(\beta - n)^2| \leq \frac{3}{4} < 1. \quad \square$$

注记 2.5.23 Squarefree values of n for which the quadratic field $\mathbb{Q}(\sqrt{n})$ is norm-Euclidean: -11, -7, -3, -2, -1, 2, 3, 5, 6, 7, 11, 13, 17, 19, 21, 29, 33, 37, 41, 57, 73. 关于 norm-Euclidean fields 可参阅 https://en.wikipedia.org/wiki/Euclidean_domain#Norm-Euclidean_fields.

命题 2.5.24 设 $d \in \mathbb{Z}$ 无平方因子, 则

$$\mathcal{O}_{\mathbb{Q}(\sqrt{d})} = \begin{cases} \mathbb{Z}[\sqrt{d}], & \text{若 } d \equiv 2, 3 \pmod{4}, \\ \mathbb{Z}\left[\frac{1+\sqrt{d}}{2}\right], & \text{若 } d \equiv 1 \pmod{4}. \end{cases}$$

定理 2.5.25 设 $d \in \mathbb{Z}$ 无平方因子, 则存在基本单位 $u \in \mathcal{O}_{\mathbb{Q}(\sqrt{d})}$, 满足 $u > 1$, 且 $\mathcal{O}_{\mathbb{Q}(\sqrt{d})}$ 中所有单位都可表为 $\pm u^m$, 其中 $m \in \mathbb{Z}$.

命题 2.5.26 $\mathbb{Z}[\sqrt{5}]$ 不是 ED.

证明 记 $\delta = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$. 因为 $5 \equiv 1 \pmod{4}$, 由命题 2.5.24, $\mathcal{O}_{\mathbb{Q}(\sqrt{5})} = \mathbb{Z}[\delta] \supsetneq \mathbb{Z}[\sqrt{5}]$. 由命题 2.5.16, $\mathbb{Z}[\sqrt{5}]$ 不是 UFD, 进而不是 ED. □

2.6 Gauss 素数

定义 2.6.1 整环 R 中非零元 a, b 称为相伴的, 若存在 $u \in U(R)$ 使得 $a = bu$. 这等价于 $(a) = (b)$.

注记 2.6.2 相伴是等价关系.

例 2.6.3 由 $N(m + ni) = m^2 + n^2 = 1 \iff m + ni \in U(\mathbb{Z}[i])$ 可知 $U(\mathbb{Z}[i]) = \{\pm 1, \pm i\}$. 因此在相伴关系下, $m + ni, -m - ni, -n + mi, n - mi \in \mathbb{Z}[i]$ 应视为一体.

命题 2.6.4 设 R 为 PID, 则存在双射

$$\{a \in R : a \text{ 为素元}\} / \text{相伴关系} \leftrightarrow \text{MaxSpec}(R), \quad a \mapsto (a).$$

回顾命题 2.4.31, 此时 $\text{Spec}(R) = \{0\} \sqcup \text{MaxSpec}(R)$.

定义 2.6.5 Gauss 整数环 $\mathbb{Z}[i]$ 中的素元称为 Gauss 素数.

注记 2.6.6 因为 $\mathbb{Z}[i]$ 是 PID, $\mathbb{Z}[i]$ 中素元 = 不可约元.

例 2.6.7 $2 = (1+i)(1-i) = -i(1+i)^2$ 不是 Gauss 素数, 且相伴于 “平方数”.

练习 2.6.8 $1+i$ 是 Gauss 素数.

练习 2.6.9 $\mathbb{Z}[i]/(1+i) \simeq \mathbb{F}_2$.

证明 由于 $N(1+i) = 2$, 任意 $x \in \mathbb{Z}[i]$ 作带余除法:

$$x = q(1+i) + r,$$

其中 $r = 0$ 或 $N(r) = 1$. 因此只需考虑 $r = 0, \pm 1, \pm i$. 由

$$1 - (-i) = 1 + i, \quad i - (-1) = 1 + i, \quad 1 - (-1) = (1+i)(1-i)$$

知 $\pm 1, \pm i$ 模 $(1+i)$ 同余, $\mathbb{Z}[i]/(1+i) = \{\bar{0}, \bar{1}\}$ 是二元域. 由例 2.1.10 知 $\mathbb{Z}[i]/(1+i) \simeq \mathbb{F}_2$. □

以下是一个更富技巧性的证明 (思路与定理 2.6.15 的证明相仿):

证明 定理 2.6.15 证明中给出了环同构

$$\begin{aligned} \varphi: \mathbb{Z}[i] &\xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}[x]/(x^2+1) \\ a+bi &\mapsto \overline{a+bx}. \end{aligned}$$

由 $\varphi(1+i) = \overline{x+1}$ 可得

$$(1+i) \xrightarrow{\varphi} (\overline{x+1}).$$

由练习 2.6.16 即得环同构

$$\mathbb{Z}[i]/(1+i) \simeq (\mathbb{Z}[x]/(x^2+1))/(\overline{x+1}).$$

由 $(x+1)(1-x) \equiv 1-x^2 \equiv 2 \pmod{(x^2+1)}$ 可知 $(\bar{2}) \subset (\overline{x+1})$. 记 $R = \mathbb{Z}[x]/(x^2+1)$, 由例 2.2.27, 存在环同构

$$(R/(\bar{2})) / ((\overline{x+1})/(\bar{2})) \simeq R/(\overline{x+1}).$$

注意到

$$(R/(\bar{2})) / ((\overline{x+1})/(\bar{2})) = \mathbb{F}_2[x]/(\overline{x+1}) \simeq \mathbb{F}_2,$$

于是

$$\mathbb{Z}[i]/(1+i) \simeq R/(\overline{x+1}) \simeq \mathbb{F}_2. \quad \square$$

注记 2.6.10 (1) 由注记 2.3.12 (2), $\mathbb{Z}[i]/(1+i)$ 是域 $\implies 1+i$ 是 Gauss 素数.

(2) $\{0, 1\}$ 是模 $(1+i)$ 同余的完全代表元系也可如下证明:

$$\diamond (1+i) \nmid \mathbb{Z}[i] \implies 1 \notin (1+i) \implies 0 \not\equiv 1 \pmod{(1+i)}.$$

◇ 注意到 $2 = (1+i)(1-i) \in (1+i)$, 因此对任意 $m+ni \in \mathbb{Z}[i]$,

$$m+ni \equiv m-n \equiv \begin{cases} 0, & \text{若 } m-n \text{ 为偶数,} \\ 1, & \text{若 } m-n \text{ 为奇数} \end{cases} \pmod{(1+i)}.$$

(3) 更一般的结论见练习 2.6.26.

练习 2.6.11 记 $R = \mathbb{Z}[i]/(2)$.

(1) 证明: R 有 4 个元素.

(2) R 是否同构于 \mathbb{Z}_4 ?

(3) R 是否同构于 $\mathbb{F}_2[x]/(x^2)$?

解答 (1) 易知 $\{0, 1, i, 1+i\}$ 是 $\mathbb{Z}[i]$ 模 (2) 的完全代表元系. 也可在定理 2.6.15 证明用到的环同构中令 $p=2$ 得到 $\mathbb{Z}[i]/(2) \simeq \mathbb{F}_2[x]/(x^2 + \bar{1})$.

(2) 不同构, 因为 $\text{char}(R) = 2 \neq 4$.

(3) $\mathbb{Z}[i]/(2) \simeq \mathbb{F}_2[x]/(x^2 + \bar{1}) = \mathbb{F}_2[x]/((x + \bar{1})^2) \xrightarrow{x \mapsto x - \bar{1}} \mathbb{F}_2[x]/(x^2)$. □

引理 2.6.12 设 $z \in \mathbb{Z}[i]$. 若 $N(z) = p$ 为素数 (这样的 p 只能是 2 或 $4k+1$), 则 z 是 Gauss 素数.

提示 只需证 z 是不可约元.

引理 2.6.13 设奇素数 $p = 4k+3$, 则 p 是 Gauss 素数.

证明 假设 p 在 $\mathbb{Z}[i]$ 中有非平凡分解 $p = xy$, 则 $p^2 = N(x)N(y)$. 由于 $N(x), N(y) > 1, N(x) = N(y) = p$. 因此 p 是两个整数 (一个奇数与一个偶数) 的平方和, 但一个奇数与一个偶数的平方和为 $4k+1$ 型整数, 矛盾. 故 p 是不可约元, 即 p 是 Gauss 素数. □

例 2.6.14 ($4k+1$ 型素数不是 Gauss 素数)

$$5 = (1+2i)(1-2i), \quad 13 = (3+2i)(3-2i), \quad 17 = (4+i)(4-i).$$

定理 2.6.15 (Fermat 二平方和定理) 设 p 为奇素数, 则 $p = 4k+1$ 当且仅当 $p = a^2 + b^2$. 此时, 这样的 $0 < a < b$ 唯一.

证明 (\Leftarrow) 一个奇数与一个偶数的平方和为 $4k+1$ 型整数.

(\Rightarrow) ① 由于 $4 \mid (p-1)$, 由命题 4.2.8, 循环群 \mathbb{F}_p^\times 中有四阶元, 因此方程 $x^2 + \bar{1} = \bar{0}$ 在 \mathbb{F}_p^\times 中有解, 即 $x^2 + \bar{1}$ 在 $\mathbb{F}_p[x]$ 中可约. 注意到存在环同构

$$\mathbb{Z}[i]/(p) \simeq \mathbb{F}_p[x]/(x^2 + \bar{1}),$$

由注记 2.3.12 (2), p 不是 Gauss 素数. 设 p 在 $\mathbb{Z}[i]$ 中有非平凡分解 $p = xy$, 则 $p^2 = N(x)N(y)$. 由于 $N(x), N(y) > 1, N(x) = N(y) = p$. 故存在 $a, b \in \mathbb{N}$ 使得 $p = a^2 + b^2$.

② 设 $p = a^2 + b^2 = c^2 + d^2$, 其中 $0 < a < b, 0 < c < d$. 由引理 2.6.12,

$$a + bi, \quad a - bi, \quad c + di, \quad c - di$$

均为 Gauss 素数. 由 $p = (a+bi)(a-bi) = (c+di)(c-di)$ 知 $(a+bi) \mid (c+di)$ 或 $(a+bi) \mid (c-di)$. 但 $c \pm di$ 也是 Gauss 素数, 因此 $a+bi$ 与 $c+di$ 相伴或与 $c-di$ 相伴. 设 $a+bi = u(c \pm di)$, 容易验证, $u \neq -1, \pm i$. 故 $a+bi = c+di$. 这证明了 $a, b \in \mathbb{N}$ 的唯一性.

(环同构补证) 以下分三步给出 (\Rightarrow) 中环同构的证明:

① 对环同态 $\mathbb{Z} \hookrightarrow \mathbb{Z}[i]$, 由命题 2.4.13, 唯一存在环同态

$$\begin{aligned}\varphi: \mathbb{Z}[x] &\rightarrow \mathbb{Z}[i] \\ f(x) &\mapsto f(i).\end{aligned}$$

显然 φ 是满射, 且 $\text{Ker } \varphi = (x^2 + 1)$. 由定理 2.2.20, 存在环同构

$$\bar{\varphi}: \mathbb{Z}[x]/(x^2 + 1) \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}[i]$$

② 观察到 ① 中环同构 $\bar{\varphi}$ 使得

$$(x^2 + 1, p)/(x^2 + 1) \xrightarrow{\bar{\varphi}} (p).$$

其中 $(x^2 + 1, p) := (x^2 + 1) + (p)$ 表示包含 $x^2 + 1$ 和 p 的最小理想. 由例 2.2.27 与练习 2.6.16, 存在如下两个环同构:

$$\begin{array}{ccc} (\mathbb{Z}[x]/(x^2 + 1))/((x^2 + 1, p)/(x^2 + 1)) & \xrightarrow[\text{练习 2.6.16}]{\sim} & \mathbb{Z}[i]/(p) \\ \downarrow \text{例 2.2.27} \wr & & \\ \mathbb{Z}[x]/(x^2 + 1, p) & & \end{array}$$

③ 由模 p 约化

$$\mathbb{Z}[x] \twoheadrightarrow \mathbb{F}_p[x], \quad \sum_{i=0}^n a_i x^i \mapsto \sum_{i=0}^n \bar{a}_i x^i$$

及定理 2.2.20, 存在环同构

$$\psi: \mathbb{Z}[x]/(p) \xrightarrow{\sim} \mathbb{F}_p[x].$$

观察到

$$(x^2 + 1, p)/(p) \xrightarrow{\psi} (x^2 + \bar{1}),$$

再次运用例 2.2.27 与练习 2.6.16 就得到如下两个环同构:

$$\begin{array}{ccc} (\mathbb{Z}[x]/(p))/((x^2 + 1, p)/(p)) & \xrightarrow[\text{练习 2.6.16}]{\sim} & \mathbb{F}_p[x]/(x^2 + \bar{1}) \\ \downarrow \text{例 2.2.27} \wr & & \\ \mathbb{Z}[x]/(x^2 + 1, p) & & \end{array}$$

再结合 ② 中环同构就得到欲证的环同构:

$$\mathbb{Z}[i]/(p) \xrightarrow{\sim} \mathbb{F}_p[x]/(x^2 + \bar{1}), \quad \overline{m + ni} \mapsto \overline{m} + \overline{n}x.$$

□

练习 2.6.16 设 $\theta: R \xrightarrow{\sim} S$ 为环同构, $I \triangleleft R$, $\theta(I) \triangleleft S$, 则 $R/I \simeq S/\theta(I)$.

定理 2.6.17 (Gauss 素数分类) 在相伴的意义下, Gauss 素数可分为以下三类:

- ◇ $1 + i$.
- ◇ $4k + 3$ 型素数.
- ◇ $a \pm bi$, 其中 $p = a^2 + b^2$ 为 $4k + 1$ 型素数, $0 < a < b$.

证明 由于这三类数都是 Gauss 素数且互不相伴, 只需验证任一 Gauss 素数 (在相伴的意义下) 均从属于其中一类. 设 $z \in \mathbb{Z}[i]$ 是 Gauss 素数, 则

$$z \mid z \cdot \bar{z} = N(z) = p_1^{n_1} \cdots p_k^{n_k},$$

其中 $p_1, \dots, p_k \in \mathbb{N}$ 为素数, 注意到每个 p_i 必为以下三类数之一:

- ◇ $p_i = 2 = -i \cdot (1 + i)^2$.
- ◇ p_i 为 $4k + 3$ 型素数.
- ◇ $p_i = a^2 + b^2 = (a + bi)(a - bi)$ 为 $4k + 1$ 型素数.

因此 $N(z) = z_1 \cdots z_s$, 其中每个 z_i 均为定理所述三类数之一. 由 $z \mid z_1 \cdots z_s$ 可知存在 $1 \leq j \leq s$ 使得 $z \mid z_j$. 又 z 与 z_j 均为 Gauss 素数, 故 z 与 z_j 相伴. \square

注记 2.6.18 $4k + 3$ 与 $4k + 1$ 型素数均有无穷个. (直接证明或由 [Dirichlet 定理](#): 设正整数 a, d 互素, 则 $a + nd$ 型素数有无穷个.)

命题 2.6.19 $\mathbb{Z}[i]$ 中任一元素 z 有素分解

$$z \overset{\text{相伴}}{\sim} z_1 \cdots z_t,$$

其中 z_1, \dots, z_t 均为 Gauss 素数.

证明 由于 $\mathbb{Z}[i]$ 是 PID, 这等价于证明有不可约分解. 设 $z \in \mathbb{Z}[i]$, 若 z 是不可约元, 则已满足要求; 若 $z = xy$ 是非平凡分解, 则 $N(x), N(y) < N(z)$, 由递降法即得证. \square

定理 2.6.20 (二平方和定理) 设 $n \geq 2$, 则 n 可写成二平方和当且仅当有标准分解

$$n = 2^r p_1^{m_1} \cdots p_t^{m_t},$$

其中若 $p_i = 4k + 3$, 相应的 m_i 为偶数.

证明 (\Leftarrow) 注意到恒等式

$$(a^2 + b^2)(c^2 + d^2) = (ac \pm bd)^2 + (ad \mp bc)^2$$

蕴含着: 若两个整数均可表示成两个整数的平方和, 则它们的积也是两个整数的平方和 (这本质上是 $\mathbb{Z}[i]$ 中范数映射的积性). 由已知条件, 结合定理 2.6.15, 易知 n 可写成若干平方和的乘积, 进而可写成二平方和.

(\Rightarrow) 设 $n = a^2 + b^2, z = a + bi \in \mathbb{Z}[i]$. 由命题 2.6.19, z 在 $\mathbb{Z}[i]$ 中有标准分解

$$z = u \cdot z_1 \cdots z_t,$$

其中 $u \in \{\pm 1, \pm i\}$, z_1, \dots, z_t 均为 Gauss 素数. 于是

$$n = N(z) = N(z_1) \cdots N(z_t).$$

由定理 2.6.17 即知 n 有所给的标准分解. □

例 2.6.21 在 $\mathbb{Z}[i]$ 中分解 $z = 29 - 2i$.

解答 $N(z) = 5 \cdot 13^2$. 由定理 2.6.17 知 z 的不可约因子只能在 $1 \pm 2i, 2 \pm 3i$ 之中. 通过试除即知 $z = -1 \cdot (1 + 2i) \cdot (2 + 3i)^2$. □

练习 2.6.22 分别将 60 和 $81 + 8i$ 在 $\mathbb{Z}[i]$ 中分解成不可约元之积.

解答 $60 = -1 \cdot 3 \cdot (1 + 2i) \cdot (1 - 2i) \cdot (1 + i)^4$, $81 + 8i = -i \cdot (2 - 7i) \cdot (1 - 2i)^3$. □

命题 2.6.23 任一环同态 $\theta: R \rightarrow S$ 诱导映射

$$\text{Spec}(S) \rightarrow \text{Spec}(R), \quad \mathfrak{q} \mapsto \theta^{-1}(\mathfrak{q}).$$

特别地, 若 R 是 S 的子环, 则有映射

$$\text{Spec}(S) \rightarrow \text{Spec}(R), \quad \mathfrak{q} \mapsto \mathfrak{q} \cap R.$$

注记 2.6.24 诱导映射的良好性见练习 2.3.35 (2), 它是 Zariski 拓扑下的连续映射. 此时还有整环间的嵌入映射

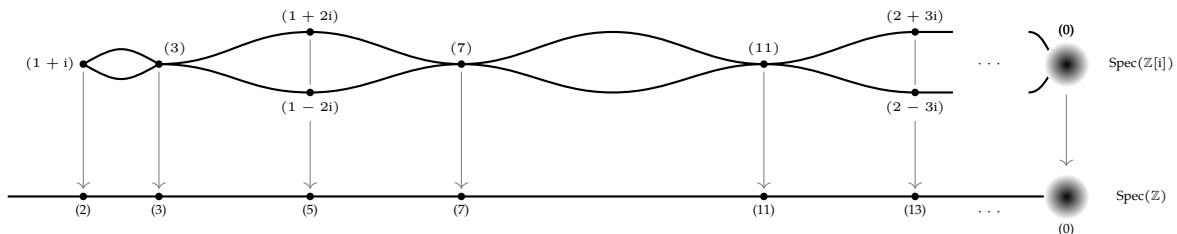
$$R/(\mathfrak{q} \cap R) \hookrightarrow S/\mathfrak{q}.$$

练习 2.6.25 $\mathbb{Z}[i]$ 的素理想与 \mathbb{Z} 的交集有以下三类情形:

- (1) $(1 + i) \cap \mathbb{Z} = 2\mathbb{Z}$.
- (2) 若 p 为 $4k + 3$ 型素数, 则 $(p) \cap \mathbb{Z} = p\mathbb{Z}$.
- (3) 若 $p = a^2 + b^2$ ($0 < a < b$) 为 $4k + 1$ 型素数, 则 $(a + bi) \cap \mathbb{Z} = (a - bi) \cap \mathbb{Z} = p\mathbb{Z}$.

提示 RHS \subset LHS 均显然, 再由命题 2.6.23 及 $p\mathbb{Z} \in \text{MaxSpec}(\mathbb{Z})$ 可得 LHS = RHS.

由命题 2.6.23, 考虑 $\mathbb{Z} \subset \mathbb{Z}[i]$, 利用练习 2.6.25, 可得 $\text{Spec}(\mathbb{Z}[i]) \rightarrow \text{Spec}(\mathbb{Z})$ 的图像:



◇ $\mathbb{Z}[i]/(1 + i) \simeq \mathbb{F}_2$ (练习 2.6.9).

◇ 若 p 为 $4k + 3$ 型素数, 定理 2.6.15 证明中给出环同构

$$\mathbb{Z}[i]/(p) \simeq \mathbb{F}_p[x]/(x^2 + \bar{1}),$$

注意到 $x^2 + \bar{1} \in \mathbb{F}_p[x]$ 是不可约多项式, 上式两边均为 p^2 元域.

◇ 若 $p = a^2 + b^2$ ($0 < a < b$) 为 $4k+1$ 型素数, 则 $\mathbb{Z}[i]/(a+bi) \simeq \mathbb{F}_p$ (练习 2.6.26).

练习 2.6.26 设 $a, b \in \mathbb{Z}$. 若 $\gcd(a, b) = 1$, 则 $\mathbb{Z}[i]/(a+bi) \simeq \mathbb{Z}/(a^2+b^2)$.

证明 因为 $\gcd(a, b) = 1$, 由 Bézout 等式, 存在 $u, v \in \mathbb{Z}$ 使得 $au + bv = 1$, 从而

$$(a+bi)(v+ui) = (av-bu) + (au+bv)i = av-bu+i.$$

因此在 $\mathbb{Z}[i]/(a+bi)$ 中 $i \equiv bu - av \pmod{(a+bi)}$, 进而

$$c+di \equiv c+d(bu-av) \pmod{(a+bi)}, \quad \forall c, d \in \mathbb{Z}.$$

而 $c+d(bu-av) \in \mathbb{Z}$, 这说明环同态

$$\begin{aligned} \theta: \mathbb{Z} &\rightarrow \mathbb{Z}[i]/(a+bi) \\ m &\mapsto \overline{m} \end{aligned}$$

是满的. 再由

$$\begin{aligned} m \in \text{Ker } \theta &\iff (a+bi) \mid m \iff \frac{m}{a+bi} = \frac{m(a-bi)}{a^2+b^2} \in \mathbb{Z}[i] \\ &\iff (a^2+b^2) \mid ma \text{ 且 } (a^2+b^2) \mid mb \iff (a^2+b^2) \mid \gcd(ma, mb) \\ &\iff (a^2+b^2) \mid m \cdot \gcd(a, b) \iff (a^2+b^2) \mid m \end{aligned}$$

得 $\text{Ker } \theta = (a^2+b^2)\mathbb{Z}$. 故由定理 2.2.20,

$$\mathbb{Z}[i]/(a+bi) = \text{Im } \theta \simeq \mathbb{Z}/\text{Ker } \theta = \mathbb{Z}/(a^2+b^2)\mathbb{Z}.$$

□

2.7 唯一分解整环

定义 2.7.1 整环 R 称为唯一分解整环 (UFD), 若满足以下两条:

(1) **(存在不可约分解)** 每个非零非单位元素 $a \in R$ 均可写成

$$a = c_1 c_2 \cdots c_r,$$

其中 c_i 均为不可约元.

(2) **(分解的唯一性)** 若 $a = c_1 c_2 \cdots c_r = c'_1 c'_2 \cdots c'_s$ 是 a 的任意两个上述不可约分解, 则 $r = s$, 且存在置换 $\sigma \in S_r$, 使得 c_i 与 $c'_{\sigma(i)}$ ($1 \leq i \leq r$) 相伴.

注记 2.7.2 由推论 2.7.23, 条件 (2) 可替换成“ R 中素元 = 不可约元”.

命题 2.7.3 若 R 是 UFD, 则 R 中素元 = 不可约元. 故 UFD 中任一元素有素分解.

命题 2.7.4 若 R 是 UFD, 则 R 中任一非零非单位元素 a 有标准分解

$$a = up_1^{n_1} \cdots p_r^{n_r},$$

其中 $u \in U(R)$, p_1, \dots, p_r 为素元且互不相伴, $n_i \geq 1$ ($1 \leq i \leq r$). 进而 a 的因子总形如

$$vp_1^{m_1} \cdots p_r^{m_r},$$

其中 $v \in U(R)$, $0 \leq m_i \leq n_i$ ($1 \leq i \leq r$). 在相伴的意义下, a 恰有 $\prod_{i=1}^r (1 + n_i)$ 个因子.

命题 2.7.5 若 R 是 UFD, 则对任意非零元 $a, b \in R$, $\gcd(a, b)$ 和 $\text{lcm}(a, b)$ 均存在. 若 a, b 有标准分解

$$a = up_1^{n_1} \cdots p_r^{n_r}, \quad b = vp_1^{m_1} \cdots p_r^{m_r},$$

其中 $u, v \in U(R)$, $n_i, m_j \geq 0$, 则

$$\gcd(a, b) \text{ 相伴于 } \prod_{i=1}^r p_i^{\min\{n_i, m_i\}}, \quad \text{lcm}(a, b) \text{ 相伴于 } \prod_{i=1}^r p_i^{\max\{n_i, m_i\}}.$$

引理 2.7.6 设 R 为 UFD, a, b 为 R 中非零元.

- (1) $\gcd\left(\frac{a}{\gcd(a, b)}, \frac{b}{\gcd(a, b)}\right)$ 相伴于 1.
- (2) 若 $\gcd(a, b)$ 相伴于 1 (即 a, b 互素) 且 $a \mid bc$, 则 $a \mid c$.

命题 2.7.7 若 R 为 UFD, 则 $\text{Frac}(R)$ 中任一元素 $\frac{a}{b}$ 有既约表达 $\frac{a}{b} = \frac{a'}{b'}$, 其中 $\gcd(a', b')$ 相伴于 1.

现在可以证明命题 2.5.16.

命题 2.5.16 UFD 是整闭环.

证明 设 R 为 UFD. 任取 $\frac{a}{b} \in \text{Frac}(R) \setminus R$, 由命题 2.7.7, 可设 $\frac{a}{b}$ 为既约形式, 则存在 R 中素元 p 使得 $p \mid b$ 但 $p \nmid a$. 若 $\frac{a}{b} \in \mathcal{O}_{\text{Frac}(R)}$, 设

$$\left(\frac{a}{b}\right)^n + c_{n-1}\left(\frac{a}{b}\right)^{n-1} + \cdots + c_0 = 0, \quad c_i \in R.$$

两边同乘 b^n 得到

$$a^n + c_{n-1}a^{n-1}b + \cdots + c_0b^n = 0.$$

由 $p \mid b$ 即知 $p \mid a^n$, 但这与 R 为 UFD 且 $p \nmid a$ 矛盾. 故 $R = \mathcal{O}_{\text{Frac}(R)}$. □

练习 2.7.8 设 R 为 UFD, 且在 $\text{Frac}(R)$ 中有 $\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$, 其中 $\gcd(a, b)$ 与 $\gcd(c, d)$ 均相伴于 1, 则 a 与 c 相伴, b 与 d 相伴.

定义 2.7.9 整环 R 称为 Bézout 整环, 若 R 中任意两个主理想之和仍为主理想.

注记 2.7.10 (1) Bézout 整环中 Bézout 等式成立.

(2) PID 是 Bézout 整环.

定理 2.7.11 R 是 PID 当且仅当 R 是 UFD 且是 Bézout 整环.

例 2.7.12 (一般 UFD 无 Bézout 等式) 在 $\mathbb{Z}[x]$ 中 $\gcd(2, x) = 1$, 但不存在 $f(x), g(x) \in \mathbb{Z}[x]$, 使得 $2f(x) + xg(x) = 1$.

定义 2.7.13 设 $X \subset R$. 称包含 X 的最理想为 X 生成的理想, 记为

$$(X) = RX = \left\{ \text{有限和} \sum_i a_i \cdot x_i, \text{ 其中 } a_i \in R, x_i \in X \right\}.$$

定义 2.7.14 $I \triangleleft R$ 称为有限生成理想, 若存在有限集 X , 使得 $I = (X)$, X 称为生成元集.

定义 2.7.15 环 R 称为 Noether 环, 若任何理想均有限生成.

例 2.7.16 PID 是 Noether 环.

定理 2.7.17 (Hilbert 基定理) 设 R 为 Noether 环, 则 $R[x_1, \dots, x_n]$ 及其商环均为 Noether 环.

提示 由于 $R[x_1, \dots, x_{n+1}] \simeq R[x_1, \dots, x_n][x_{n+1}]$, 断言的第一类化约为证明 “ R 为 Noether 环 $\implies R[x]$ 为 Noether 环”; 再由例 2.2.27 对应定理, 其商环的任何理想均有限生成.

下面的定理说明定义 2.7.1 中条件 (1) 对绝大多数环均成立.

定理 2.7.18 设 R 为 Noether 整环, 则 R 中每个非零非单位元素均有不可约分解.

证明 用反证法, 假设 $a \in R$ 无不可约分解. 特别地, a 可约. 设有非平凡分解 $a = a_1 \cdot a_2$, 则 a_1 与 a_2 至少有一个无不可约分解. 不妨设 a_1 无不可约分解, 特别地, a_1 可约. 设有非平凡分解 $a_1 = a_{11} \cdot a_{12}$, 并不妨设 a_{11} 无不可约分解, $a_{11} = a_{111} \cdot a_{112}$, a_{111} 无不可约分解. 由此递推可得 R 中理想的无限严格升链:

$$(a_1) \subsetneq (a_{11}) \subsetneq (a_{111}) \subsetneq \dots,$$

由练习 2.7.19 得矛盾. 故假设不成立. □

练习 2.7.19 设 R 为 Noether 环, 则 R 中不存在理想的无限严格升链:

$$I_1 \subsetneq I_2 \subsetneq I_3 \subsetneq \dots, \quad I_i \triangleleft R.$$

证明 用反证法, 假设存在如上严格升链. 令 $I = \bigcup_{n=1}^{\infty} I_n$, 则 $I \triangleleft R$. 由 R 是 Noether 环知 I 是有限生成的, 设 $\{a_1, \dots, a_m\}$ 为其生成元集. 由 I 的定义, 存在映射

$$\sigma: \{1, \dots, m\} \rightarrow \mathbb{Z}_{\geq 1},$$

使得 $a_i \in I_{\sigma(i)}$. 令 $M = \max\{\sigma(1), \dots, \sigma(m)\}$, 则由升链可得 $a_1, \dots, a_m \in I_M$, $I_M \subset I \subset I_M$. 故 $I_M = I$, 矛盾. □

注记 2.7.20 事实上, 这一性质可用作 Noether 环的等价定义.

命题 2.7.21 设 R 为整环. 若 $a \in R$ 有素分解, 则 a 的不可约分解唯一 (在定义 2.7.1 (2) 意义下).

提示 利用素元与整环性质逐一消去.

注记 2.7.22 由此可知素分解强于不可约分解.

推论 2.7.23 设整环 R 中每个非零非单位元素均有不可约分解 (如 Noether 整环), 则 R 是 UFD 当且仅当 R 中素元 = 不可约元.

例 2.7.24 PID 是 UFD.

定理 2.7.25 (Gauss 定理) 设 R 为 UFD, 则 $R[x]$ 亦为 UFD.

例 2.7.26 $\mathbb{Z}[x]$ 为 UFD, 但不是 PID. 因为 $(x) \subsetneq (2, x) \subsetneq \mathbb{Z}[x]$, 说明非零素理想 (x) 不是极大理想.

例 2.7.27 $\mathbb{Z}[x_1, \dots, x_n]$ 和 $k[x_1, \dots, x_n]$ (k 为域) 均为 UFD.

为了证明定理 2.7.25, 需要一些准备工作.

定义 2.7.28 设 $f(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i \in R[x]$ 且 $f(x) \neq 0$. 定义 $f(x)$ 的容度为 $c(f) = \gcd(a_0, a_1, \dots, a_n)$. 称 $f(x)$ 为本原的, 若 $c(f)$ 相伴于 1.

定义 2.7.29 设 $f(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i \in R[x]$ 且 $f(x) \neq 0$, 则可将 $f(x)$ 本原化: $f(x) = c(f) \cdot f_0(x)$, 其中 $f_0(x) = \sum_{i=0}^n \frac{a_i}{c(f)} \cdot x^i$ 是本原多项式.

引理 2.7.30 (Gauss 引理) 设 $f(x), g(x) \in R[x]$, 则 $c(f \cdot g)$ 相伴于 $c(f) \cdot c(g)$. 特别地, 本原多项式的乘积仍是本原的.

证明 通过本原化, 只需证本原多项式的乘积仍是本原的. 设存在两个本原多项式

$$f(x) = a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0, \quad g(x) = b_m x^m + \dots + b_1 x + b_0$$

使得 $f(x)g(x)$ 不是本原的, 则存在素元 p 使得 $f(x)g(x)$ 中所有系数. 由于 $f(x)$ 本原, p 不能整除所有 a_i , 设 r 是最小下标使 $p \nmid a_r$. 类似地, 设 s 是最小下标使 $p \nmid b_s$. 考虑 $f(x)g(x)$ 中 x^{r+s} 的系数

$$a_0 b_{r+s} + \dots + a_{r-1} b_{s+1} + a_r b_s + a_{r+1} b_{s-1} + \dots + a_{r+s} b_0,$$

该和式中只有 $a_r b_s$ 一项不被 p 整除, 因此 x^{r+s} 系数不被 p 整除, 这与假设矛盾. \square

以下用模 p 约化手法给出另证:

证明 用反证法, 同前面证明的假设. 考虑模 p 约化

$$\begin{aligned} \pi : R[x] &\rightarrow (R/pR)[x] \\ \sum_{i=0}^n a_i x^i &\mapsto \sum_{i=0}^n \bar{a}_i x^i. \end{aligned}$$

显然 π 是环同态且 $\text{Ker } \pi = p(R[x])$. 由 $(R/pR)[x]$ 是整环且 $\pi(f(x)g(x)) = \bar{0}$, $f(x) \in \text{Ker } \pi$ 或 $g(x) \in \text{Ker } \pi$, 即 $p \mid f(x)$ 或 $p \mid g(x)$, 矛盾. \square

注记 2.7.31 Gauss 引理一个常用的特例如下: 记 $K = \text{Frac}(R)$, 设 $f(x), g(x) \in K[x]$ 是首一多项式, 则 $f(x)g(x) \in R[x] \implies f(x), g(x) \in R[x]$.

现在可以给出定理 2.7.25 的证明:

证明 记 $K = \text{Frac}(R)$. 将 $R[x]$ 中非零多项式 $f(x)$ 本原化:

$$f(x) = c(f) \cdot f_0(x) = c_1 c_2 \cdots c_r \cdot f_0(x),$$

其中 $c_i \in R$ 为素元. 下面给出 $f(x) \in R[x]$ 的不可约分解.

- (1) 由练习 2.7.32, 若 c 为 R 中素元, 则 c 作为常值多项式亦为 $R[x]$ 中素元. 此断言亦可如下证明. 设 $c \mid g(x)h(x)$, 作本原化: $g(x) = c(g) \cdot g_0(x)$, $h(x) = c(h) \cdot h_0(x)$. 由引理 2.7.30, $g_0(x)h_0(x)$ 为本原多

项式, 因此 $c \mid c(g)c(h)$. 而 c 为 R 中素元, 不妨设 $c \mid c(g)$, 则 $c \mid c(g) \cdot g_0(x) = g(x)$. 故 c 亦为 $R[x]$ 中素元.

(2) 将 $f_0(x)$ 在 $K[x]$ 上作不可约分解:

$$f_0(x) = f_1(x) \cdots f_s(x),$$

其中 $f_i(x) \in K[x]$ 不可约. 对每个 $f_i(x)$, 可先通分为 $f_i(x) = \frac{1}{a} \cdot \tilde{f}_i(x)$, 其中 $\frac{1}{a} \in K$, $\tilde{f}_i(x) \in R[x]$; 再将 $\tilde{f}_i(x)$ 本原化: $\tilde{f}_i(x) = c(\tilde{f}_i) \cdot \bar{f}_i(x)$. 于是

$$f_i(x) = \frac{c(\tilde{f}_i)}{a} \cdot \bar{f}_i(x).$$

由于 $\frac{c(\tilde{f}_i)}{a} \in K \setminus \{0_K\}$, $f_i(x)$ 与 $\bar{f}_i(x)$ 在 $K[x]$ 中相伴, $\bar{f}_i(x) \in K[x]$ 不可约. 故

$$f_0(x) = \frac{b}{a} \cdot \bar{f}_1(x) \cdots \bar{f}_s(x),$$

其中 $\frac{b}{a} \in K$, $\bar{f}_i(x) \in K[x]$ 不可约. 此时

$$a \cdot f_0(x) = b \cdot \bar{f}_1(x) \cdots \bar{f}_s(x).$$

由引理 2.7.30, $\bar{f}_1(x) \cdots \bar{f}_s(x)$ 为本原多项式, 上式两边取容度即得 a 与 b 在 R 中相伴. 因此 $u = \frac{b}{a} \in U(R)$,

$$f_0(x) = u \cdot \bar{f}_1(x) \cdots \bar{f}_s(x),$$

其中 $\bar{f}_i(x) \in K[x]$ 不可约 (在 $K[x]$ 中等价于素), 在 $R[x]$ 中本原.

(3) 由练习 2.7.33 可得 $\bar{f}_i(x)$ 是 $R[x]$ 中不可约元. 亦可如下证明 $\bar{f}_i(x)$ 是 $R[x]$ 中素元. 设在 $R[x]$ 中有 $\bar{f}_i(x) \mid g(x)h(x)$, 由 $\bar{f}_i(x)$ 是 $K[x]$ 中素元, 可不妨设在 $K[x]$ 中有 $\bar{f}_i(x) \mid g(x)$, $g(x) = \bar{f}_i(x) \cdot d(x)$. 设

$$d(x) = \frac{b'}{a'} \cdot \bar{d}(x),$$

其中 $a', b' \in R$, $\bar{d}(x) \in R[x]$ 本原. 此时

$$a' \cdot g(x) = b' \cdot \bar{f}_i(x) \cdot \bar{d}(x).$$

由引理 2.7.30, $\bar{f}_i(x) \cdot \bar{d}(x)$ 本原, 两边取容度即得 $a' \cdot c(g)$ 相伴于 b' . 故 $d(x)$ 在 $R[x]$ 中相伴于 $c(g) \cdot \bar{d}(x)$, 进而在 $R[x]$ 中 $\bar{f}_i(x) \mid g(x)$. 这就说明 $\bar{f}_i(x)$ 是 $R[x]$ 中素元. \square

练习 2.7.32 设 R 为 UFD, $c \in R$ 为素元, 则存在环同构

$$R[x]/(c) \simeq (R/Rc)[x].$$

此时, R/Rc 为整环 $\implies (R/Rc)[x]$ 为整环 $\implies R[x]/(c)$ 为整环 $\implies c$ 为 $R[x]$ 中素元.

练习 2.7.33 设 R 为 UFD, $K = \text{Frac}(R)$. 若 $f(x)$ 是 $R[x]$ 中的本原多项式, 且在 $K[x]$ 中不可约, 则存在环单同态

$$R[x]/(f(x)R[x]) \hookrightarrow K[x]/(f(x)K[x]).$$

此时, 由 $K[x]/(f(x)K[x])$ 是域可得 $R[x]/(f(x)R[x])$ 是整环, 从而 $f(x) \in R[x]$ 不可约.

从定理 2.7.25 证明的 (3) 和练习 2.7.33 可提取出以下重要命题:

命题 2.7.34 设 R 为 UFD, $K = \text{Frac}(R)$. 若 $f(x) \in R[x]$ 为本原多项式, 则 $f(x)$ 在 $R[x]$ 中不可约当且仅当 $f(x)$ 是 K 上的不可约多项式.

例 2.7.35 $f(x) = x^3 + 3x - 2$ 在 \mathbb{Q} 上不可约.

解答 因 $f(x)$ 是 $\mathbb{Z}[x]$ 中的本原多项式, 由命题 2.7.34, 只需证 $f(x)$ 在 $\mathbb{Z}[x]$ 中不可约. 若 $f(x)$ 在 $\mathbb{Z}[x]$ 中可约, 则它在 $\mathbb{Z}[x]$ 中有分解 $f(x) = (x - m)(x^2 + ax + b)$, 其中 $m, a, b \in \mathbb{Z}$. 于是 $f(m) = 0$ 且 $-mb = 2$. 依次代入 $m = \pm 1, \pm 2$ 知无解. \square

例 2.7.36 设 k 为域, 则 $y^3 - x^2 \in k[x, y]$ 不可约.

解答 因为 $k[x, y] \simeq k[x][y]$, 若 $y^3 - x^2$ 在 $k[x, y]$ 中可约, 则它在 $k[x][y]$ 中有分解 $y^3 - x^2 = [y - m(x)] \cdot [y^2 + a(x)y + b(x)]$, 其中 $m(x), a(x), b(x) \in k[x]$. 于是 $m(x)^3 - x^2 = 0$, 但这无解. \square

注记 2.7.37 因为 $y^3 - x^2 \in k[x][y]$ 本原, 由命题 2.7.34, $y^3 - x^2 \in k(x)[y]$ 不可约, 其中 $k(x)$ 表示 $k[x]$ 的分式域.

练习 2.7.38 设 $A = k[x, y]/(y^3 - x^2)$. 由于 $k[x, y]$ 是 UFD, 由例 2.7.36 知 $y^3 - x^2$ 是 $k[x, y]$ 中素元, 因此 A 是整环. 视 $k[x, y]$ 为 k -线性空间, $(y^3 - x^2)$ 为 $k[x, y]$ 的线性子空间, 则 A 为商空间.

(1) 求 A 的一组 k -基.

(2) A 是否为 UFD?

(3) 考虑 $k[t]$ 的子环 $S = \{a_0 + a_2t^2 + a_3t^3 + \cdots : a_i \in k\}$. 证明: $S \simeq A$.

解答 (1) 对任意 $f(x, y) \in k[x, y] = k[x][y]$, 由于 $y^3 - x^2$ 是 $k[x][y]$ 中的首一多项式, 有带余除法

$$f(x, y) = g(x, y)(y^3 - x^2) + h_1(y)x + h_0(y).$$

因此 $B = \{\overline{x^n y^m} : 0 \leq n \leq 1, m \geq 0\}$ 是 A 的生成元. 下证 B 是 A 的一组 k -基. 设 $\sum_{n,m} a_{n,m} \overline{x^n y^m} = \overline{0}$, 则存在 $F(x, y) \in k[x, y]$, 使得

$$\sum_{n,m} a_{n,m} x^n y^m = (y^3 - x^2)F(x, y).$$

在 $k[y][x]$ 中考虑上式: 若 $\text{LHS} \neq 0$, 则 $\deg(\text{LHS}) \leq 1$; 若 $\text{RHS} \neq 0$, 则 $\deg(\text{RHS}) \geq 2$. 因此 $\text{LHS} = \text{RHS} = 0$, 即所有系数 $a_{n,m} = 0$. 故 B 线性无关.

(2) 假设 A 为 UFD. 注意到 $\frac{\overline{x}}{\overline{y}} \in \text{Frac}(A)$ 满足

$$\left(\frac{\overline{x}}{\overline{y}}\right)^2 = \frac{\overline{x}^2}{\overline{y}^2} = \frac{\overline{y}^3}{\overline{y}^2} = \overline{y},$$

即 $\frac{\overline{x}}{\overline{y}} \in \mathcal{O}_{\text{Frac}(A)}$. 由命题 2.5.16, UFD 是整闭环, 因此 $\frac{\overline{x}}{\overline{y}} \in A$. 设 $r(x, y) \in k[x, y]$ 使得 $\frac{\overline{x}}{\overline{y}} = \overline{r(x, y)}$, 则 $\overline{x} = \overline{y \cdot r(x, y)}$. 故存在 $q(x, y) \in k[x, y]$ 使得

$$x = y \cdot r(x, y) + (y^2 - x^3)q(x, y).$$

考虑 $k[x][y]$ 在 0 处的赋值同态 ev_0 , 它作用于上式便得到 $k[x]$ 中等式

$$x = -x^3 \cdot q(x, 0).$$

但这不可能成立. 故 A 不是 UFD.

(3) 考虑环同态

$$\theta : k[x, y] \rightarrow S$$

使得

$$\theta(x) = t^3, \quad \theta(y) = t^2.$$

下证 $\text{Ker } \theta = (y^3 - x^2)$. 显然 $(y^3 - x^2) \subset \text{Ker } \theta$, 故只需证 $\text{Ker } \theta \subset (y^3 - x^2)$. 设 $f(x, y) \in \text{Ker } \theta$, 同 (1) 作带余除法

$$f(x, y) = g(x, y)(y^3 - x^2) + h_1(y)x + h_0(y).$$

将 θ 作用于上式两端即得

$$0 = h_1(t^2) \cdot t^3 + h_0(t^2).$$

注意到: 若 $h_1(t^2) \cdot t^3 \neq 0$, 则其次数为奇数; 若 $h_0(t^2) \neq 0$, 则其次数为偶数. 因此 $h_1(t^2) = h_0(t^2) = 0$ 即 $h_1(y) = h_0(y) = 0$. 故 $f(x, y) \in (y^3 - x^2)$. 于是

$$\text{Ker } \theta = (y^3 - x^2).$$

又 θ 显然是满射, 由定理 2.2.20, 存在环同构

$$k[x, y]/(y^3 - x^2) \simeq S. \quad \square$$

注记 2.7.39 在 $S = k[t^2, t^3]$ 中, t^6 有两种分解:

$$t^6 = t^2 \cdot t^2 \cdot t^2 = t^3 \cdot t^3.$$

由于 t^2 和 t^3 不相伴且均为 S 中不可约元, 这两种分解本质不同. 故 S 不是 UFD.

命题 2.7.40 (Eisenstein 判别法) 设 R 为 UFD, $K = \text{Frac}(R)$, $f(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i \in R[x]$ 本原, $p \in R$ 为素元. 若 $p \mid a_{n-1}, \dots, p \mid a_1, p \mid a_0, p^2 \nmid a_0$ (从而 $p \nmid a_n$), 则 $f(x) \in R[x]$ 不可约 (由命题 2.7.34, $f(x) \in K[x]$ 也不可约).

证明 设 $f(x)$ 在 $R[x]$ 中有非平凡分解 $f(x) = g(x)h(x)$, 其中

$$g(x) = b_r x^r + \dots + b_1 x + b_0, \quad h(x) = c_{n-r} x^{n-r} + \dots + c_1 x + c_0,$$

则 $r, n-r > 0$. 由于 $p \mid b_0 c_0$ 而 $p^2 \nmid b_0 c_0$, b_0 与 c_0 中恰有一个被 p 整除. 不妨设 $p \mid b_0$ 且 $p \nmid c_0$. 取最小下标 i_0 使得 $p \nmid b_{i_0}$, 则 $0 < i_0 \leq r < n$. 注意到

$$a_{i_0} = b_{i_0} c_0 + b_{i_0-1} c_1 + \dots + b_0 c_{i_0},$$

上式右端只有第一项 $b_{i_0} c_0$ 不被 p 整除, 因此 $p \nmid a_{i_0}$, 但 $0 < i_0 < n$, 矛盾. □

以下用模 p 约化手法给出另证:

证明 设 $f(x)$ 在 $R[x]$ 中有非平凡分解 $f(x) = g(x)h(x)$, 其中

$$g(x) = b_r x^r + \cdots + b_1 x + b_0, \quad h(x) = c_{n-r} x^{n-r} + \cdots + c_1 x + c_0.$$

考虑模 p 约化

$$\begin{aligned} \pi : R[x] &\rightarrow (R/pR)[x] \\ \sum_{i=0}^n a_i x^i &\mapsto \sum_{i=0}^n \overline{a_i} x^i. \end{aligned}$$

显然 π 是环同态, 于是在 $(R/pR)[x]$ 中有

$$\overline{a_n} x^n = \pi(f(x)) = \pi(g(x)) \cdot \pi(h(x)).$$

由于 p 为素元, R/pR 为整环, 可取 $K' = \text{Frac}(R/pR)$. 由于

$$R[x] \xrightarrow{\pi} (R/pR)[x] \xrightarrow{\text{inc}} K'[x],$$

而 $K'[x]$ 为 UFD, 利用唯一分解性可知 $\pi(g(x))$ 与 $\pi(h(x))$ 均为单项式. 故 $\overline{b_0} = \overline{c_0} = \overline{0}$, 即 $p \mid b_0$ 且 $p \mid c_0$, 从而 $p^2 \mid a_0$, 矛盾. \square

例 2.7.41 $x^n - 2 \in \mathbb{Q}[x]$ ($n \geq 1$) 均不可约. 故 $\mathbb{Q}[x]$ 中存在任意次数的不可约多项式.

例 2.7.42 设 $f(x) \in \mathbb{Q}[x]$ 使得 $f(\sqrt[n]{2}) = 0$, 则 $(x^n - 2) \mid f(x)$. 特别地, $\deg(f(x)) \geq n$.

证明 用反证法, 假设 $(x^n - 2) \nmid f(x)$. 由 $x^n - 2 \in \mathbb{Q}[x]$ 不可约, $\gcd_{\mathbb{Q}[x]}(x^n - 2, f(x)) = 1$. 由 Bézout 等式, 存在 $a(x), b(x) \in \mathbb{Q}[x]$ 使得

$$a(x)(x^n - 2) + b(x)f(x) = 1.$$

将 $\sqrt[n]{2}$ 处的赋值同态作用于上式两端即得矛盾. \square

例 2.7.43 视 \mathbb{C} 为 \mathbb{Q} -线性空间, 则 $\{1, \sqrt[n]{2}, \sqrt[n]{2^2}, \dots, \sqrt[n]{2^{n-1}}\}$ 是 \mathbb{Q} -线性无关的.

练习 2.7.44 (1) $2x + 2$ 在 $\mathbb{Z}[x]$ 和 $\mathbb{Q}[x]$ 中是否为不可约元?

(2) $x^2 + 1$ 在 $\mathbb{R}[x]$ 和 $\mathbb{C}[x]$ 中是否为不可约元?

练习 2.7.45 设 $f(x) \in \mathbb{Z}[x]$ 为首一多项式, p 为素数. 考虑模 p 约化

$$\begin{aligned} \pi : \mathbb{Z}[x] &\rightarrow \mathbb{F}_p[x] \\ \sum_{i=0}^n a_i x^i &\mapsto \sum_{i=0}^n \overline{a_i} x^i. \end{aligned}$$

(1) 证明: 如果对某个素数 p , $\pi(f(x))$ 在 $\mathbb{F}_p[x]$ 中不可约, 则 $f(x)$ 在 $\mathbb{Z}[x]$ 中不可约.

(2) 如果 $f(x) \in \mathbb{Z}[x]$ 不是首一多项式, (1) 中的结论是否成立?

练习 2.7.46 设 R 为整环, $f(x) \in R[x]$, $c \in R$, $g(x) = f(x + c) \in R[x]$. 求证:

(1) $f(x)$ 在 $R[x]$ 中本原 $\iff g(x)$ 在 $R[x]$ 中本原.

(2) $f(x)$ 在 $R[x]$ 中不可约 $\iff g(x)$ 在 $R[x]$ 中不可约.

证明 由命题 2.4.13, 环嵌入 $R \xrightarrow{\text{inc}} R[x]$ 诱导环同态

$$\theta : R[x] \rightarrow R[x]$$

使得 $\theta|_R = \text{Id}_R$ 且 $\theta(x) = x + c$. 显然 θ 可逆, 其逆映射为

$$\begin{aligned} \theta^{-1} : R[x] &\rightarrow R[x] \\ f(x) &\mapsto f(x - c). \end{aligned}$$

故 θ 是环同构. 显然 θ 保持多项式的本原性与不可约性. \square

例 2.7.47 $u(x) = x^{p-1} + \cdots + x + 1 = \frac{x^p - 1}{x - 1} \in \mathbb{Z}[x]$ 不可约.

证明 由练习 2.7.46 (2), 等价于证明 $u(x+1) \in \mathbb{Z}[x]$ 不可约. 而

$$u(x+1) = \frac{(x+1)^p - 1}{x} = \sum_{i=0}^{p-1} \binom{p}{i+1} x^i,$$

由 Eisenstein 判别法, $u(x+1) \in \mathbb{Z}[x]$ 不可约. \square

2.8 中国剩余定理

定义 2.8.1 设 $\{R_i : i \in I\}$ 为一族环. 其直积 $\prod_{i \in I} R_i$ 中的加法和乘法运算定义为

$$(r_i)_{i \in I} + (s_i)_{i \in I} = (r_i + s_i)_{i \in I}, \quad (r_i)_{i \in I} \cdot (s_i)_{i \in I} = (r_i \cdot s_i)_{i \in I}.$$

注记 2.8.2 任两个环的直积 $R \times S$ 不是整环.

练习 2.8.3 投影同态

$$\begin{aligned} p : R \times S &\rightarrow S \\ (r, s) &\mapsto s \end{aligned}$$

诱导环同构

$$(R \times S)/(R \times \{0_S\}) \xrightarrow{\sim} S.$$

定理 2.8.4 (中国剩余定理) 设 R 为环, I_1, \dots, I_n 为 R 的理想, 且对每个 $i \neq j$ 皆有 $I_i + I_j = R$, 则环同态

$$\begin{aligned} \theta : R &\rightarrow \prod_{i=1}^n R/I_i \\ r &\mapsto (r + I_1, \dots, r + I_n) \end{aligned}$$

诱导环同构

$$R/(I_1 \cap \cdots \cap I_n) \xrightarrow{\sim} \prod_{i=1}^n R/I_i.$$

且 $I_1 \cap \cdots \cap I_n = I_1 \cdots I_n$.

证明 (1) $\text{Ker } \theta = \{r \in R : r \in I_1, \dots, r \in I_n\} = I_1 \cap \dots \cap I_n$.

(2) 下证 θ 是满的, 即对任意 $a_1, \dots, a_n \in R$, 同余方程组

$$\begin{cases} b \equiv a_1 \pmod{I_1} \\ b \equiv a_2 \pmod{I_2} \\ \vdots \\ b \equiv a_n \pmod{I_n} \end{cases}$$

有解. 我们断言 $I_1 + I_2 \cdots I_n = R$. 由

$$\begin{aligned} R &= RR = (I_1 + I_2)(I_1 + I_3) = I_1(I_1 + I_2 + I_3) + I_2I_3 \\ &\subset I_1 + I_2I_3 \subset R \end{aligned}$$

知 $I_1 + I_2I_3 = R$. 由 $I_1 + I_2 \cdots I_{n-1} = R$ 可得

$$\begin{aligned} R &= RR = (I_1 + I_2 \cdots I_{n-1})(I_1 + I_n) = I_1(I_1 + I_n + I_2 \cdots I_{n-1}) + I_2 \cdots I_n \\ &\subset I_1 + I_2 \cdots I_n \subset R, \end{aligned}$$

故 $R = I_1 + I_2 \cdots I_n$. 由归纳法断言得证. 于是存在 $u_1 \in I_1$ 与 $b_1 \in I_2 \cdots I_n$ 使得

$$u_1 + b_1 = 1.$$

由 $I_2 \cdots I_n \subset I_2 \cap \dots \cap I_n$ 即知 b_1 是同余方程组

$$\begin{cases} b \equiv 1 \pmod{I_1} \\ b \equiv 0 \pmod{I_2} \\ \vdots \\ b \equiv 0 \pmod{I_n} \end{cases}$$

的解. 同理可求得另 $n-1$ 个同余方程组

$$\begin{cases} b \equiv 0 \pmod{I_1} \\ b \equiv 1 \pmod{I_2} \\ \vdots \\ b \equiv 0 \pmod{I_n} \end{cases} \quad \dots \quad \begin{cases} b \equiv 0 \pmod{I_1} \\ b \equiv 0 \pmod{I_2} \\ \vdots \\ b \equiv 1 \pmod{I_n} \end{cases}$$

的解 b_2, \dots, b_n . 令 $b = a_1b_1 + \dots + a_nb_n$, 则 b 即最初的同余方程组的解.

(3) 由定理 2.2.20, θ 诱导环同构

$$R/(I_1 \cap \dots \cap I_n) \xrightarrow{\sim} \prod_{i=1}^n R/I_i.$$

由练习 2.8.6, 结合 (2) 中断言, 归纳即得 $I_1 \cap \dots \cap I_n = I_1 \cdots I_n$. □

注记 2.8.5 $I_i + I_j = R$ 这一条件通常称为“ I_i 与 I_j 互素”. 例如对 $a, b \in \mathbb{Z}$, $\gcd(a, b) = 1 \iff (a) + (b) =$

\mathbb{Z} .

练习 2.8.6 设 I, J 为环 R 的理想, $I + J = R$, 则 $I \cap J = IJ$.

证明 由于 $I + J = R$, 存在 $i \in I$ 与 $j \in J$, 使得 $i + j = 1$. 任取 $a \in I \cap J$, 则有 $a = ai + aj$. 由 $a \in J$ 且 $i \in I$ 可知 $ai \in IJ$, 由 $a \in I$ 且 $j \in J$ 可知 $aj \in IJ$, 因此 $a \in IJ$, $I \cap J \subset IJ$. 又 $IJ \subset I \cap J$ 是显然的, 故 $I \cap J = IJ$. \square

例 2.8.7 设 $\gcd(m, n) = 1$, 则存在环同构

$$\mathbb{Z}/mn\mathbb{Z} \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}/m\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, \quad a + mn\mathbb{Z} \mapsto (a + m\mathbb{Z}, a + n\mathbb{Z}).$$

练习 2.8.8 设 R, S 为环, 则有群同构 $U(R \times S) \simeq U(R) \times U(S)$.

例 2.8.9 由例 2.8.7 与练习 2.8.8, $\mathbb{Z}_{15} \simeq \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_5 \implies U(\mathbb{Z}_{15}) \simeq U(\mathbb{Z}_3) \times U(\mathbb{Z}_5)$.

练习 2.8.10 设 R, S 为环, 是否一定有 $\text{Aut}(R \times S) \simeq \text{Aut}(R) \times \text{Aut}(S)$?

解答 否. 取 $R = S = \mathbb{F}_2$. 考虑

$$\begin{aligned} \theta : R \times S &\xrightarrow{\sim} R \times S \\ (a, b) &\longmapsto (b, a) \end{aligned}$$

则 $\theta \in \text{Aut}(R \times S)$ 且 $\theta \neq \text{Id}_{R \times S}$. 但 $|\text{Aut}(R)| = |\text{Aut}(S)| = 1$, 从而

$$|\text{Aut}(R \times S)| \geq 2 > 1 = |\text{Aut}(R) \times \text{Aut}(S)|. \quad \square$$

练习 2.8.11 设 R, S 为环, 则 $\text{Spec}(R \times S) = (\text{Spec}(R) \times \{S\}) \sqcup (\{R\} \times \text{Spec}(S))$.

解答 任取 $\mathfrak{p} \in \text{Spec}(R \times S)$, 令 $\mathfrak{p}_R = \pi_R(\mathfrak{p})$, $\mathfrak{p}_S = \pi_S(\mathfrak{p})$, 其中 π_R, π_S 分别为关于 R, S 的投影同态. 对 $r, r' \in R$, 注意到

$$\begin{array}{ccc} rr' \in \mathfrak{p}_R & \iff & (r, 0)(r', 0) \in \mathfrak{p} \\ \downarrow & & \downarrow \\ r \in \mathfrak{p}_R \text{ 或 } r' \in \mathfrak{p}_R & \iff & (r, 0) \in \mathfrak{p} \text{ 或 } (r', 0) \in \mathfrak{p} \end{array}$$

因此

$$\begin{aligned} \mathfrak{p}_R \in \text{Spec}(R) &\iff \mathfrak{p}_R \neq R, \\ \mathfrak{p}_S \in \text{Spec}(S) &\iff \mathfrak{p}_S \neq S. \end{aligned}$$

进而

$$\begin{aligned} \mathfrak{p}_R \times S \in \text{Spec}(R \times S) &\iff \mathfrak{p}_R \neq R, \\ R \times \mathfrak{p}_S \in \text{Spec}(R \times S) &\iff \mathfrak{p}_S \neq S. \end{aligned}$$

对于欲证等式, $\text{RHS} \subset \text{LHS}$ 是显然的, 只需证 $\text{LHS} \subset \text{RHS}$. 结合前述讨论, 只需证 $\mathfrak{p}_R \neq R$ 与 $\mathfrak{p}_S \neq S$ 有且仅有一者成立.

(至多一者成立) 假设 $\mathfrak{p}_R \neq R$, 则 $1_R \notin \mathfrak{p}_R$. 任取 $s \in \mathfrak{p}_S$, 存在 $r \in R$ 使得 $(r, s) \in \mathfrak{p}$. 因

$$(r, 1_S)(1_R, s) = (r, s) \in \mathfrak{p}, \quad (1_R, s) \notin \mathfrak{p},$$

必有 $(r, 1_S) \in \mathfrak{p}$, 从而 $1_S \in \mathfrak{p}_S$, 即 $\mathfrak{p}_S = S$. 同理, 当 $\mathfrak{p}_S \neq S$ 时, 必有 $\mathfrak{p}_R = R$. 故 $\mathfrak{p}_R \neq R$ 与 $\mathfrak{p}_S \neq S$ 至多有一者成立.

(至少一者成立) 假设二者皆不成立, 即 $\mathfrak{p}_R = R$ 且 $\mathfrak{p}_S = S$, 则存在 $r \in R$ 与 $s \in S$ 使得 $(1_R, s), (r, 1_S) \in \mathfrak{p}$, 从而

$$(1_R, 1_S) = (1_R, 0_S)(1_R, s) + (0_R, 1_S)(r, 1_S) \in \mathfrak{p},$$

即 $\mathfrak{p} = R \times S$, 与 $\mathfrak{p} \in \operatorname{Spec}(R \times S)$ 矛盾. 故 $\mathfrak{p}_R \neq R$ 与 $\mathfrak{p}_S \neq S$ 总有一者成立. \square

注记 2.8.12 若采用代数几何术语, 有拓扑空间范畴中的同构 (即同胚)

$$\operatorname{Spec}(R \times S) \simeq \operatorname{Spec}(R) \sqcup \operatorname{Spec}(S),$$

这里的无交并采用定义 1.1.7 的集合论定义. 参考 <https://stacks.math.columbia.edu/tag/00ED>.

域论

域扩张与单扩张

定义 3.1.1 域扩张是指域同态 $\theta: k \hookrightarrow K$, 简记为 K/k .

注记 3.1.2 之所以选用 K/k 这一记号, 是因为 $k \simeq \theta(k) \subset K$, 我们将 k 等同于 $\theta(k)$, 而后者是 K 的子域. 于是域扩张 $\theta: k \hookrightarrow K$ 等同于包含映射 $\text{inc}: \theta(k) \hookrightarrow K$. 此记号恰略去最关键的信息 θ , 见练习 3.1.4.

例 3.1.3 (域扩张的例子) (1) \mathbb{R}/\mathbb{Q} 和 \mathbb{C}/\mathbb{R} 均是域扩张.

(2) Kronecker 添根构造: $k \hookrightarrow k[x]/(f(x))$.

(3) 考虑 $k[x]$ 的分式域 $k(x)$, 称为有理函数域. 典范嵌入 $k[x] \hookrightarrow k(x)$ 诱导域扩张

$$k \hookrightarrow k(x), \quad \lambda \mapsto \frac{\lambda}{1}.$$

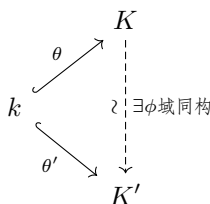
练习 3.1.4 设 k 为域, 记 $F = k(t), K = k(x)$. 考虑域扩张

$$\theta : F \hookrightarrow K$$

$$\frac{f(t)}{q(t)} \mapsto \frac{f(x^2)}{q(x^2)}.$$

通过 θ 将 K 视为 F -线性空间, 求 $\dim_F K$. 提示 注意到 $K = \theta(F)(x)$, 再用定理 3.1.23.

定义 3.1.5 设 $\theta: k \hookrightarrow K$ 与 $\theta': k \hookrightarrow K'$ 是两个域扩张. 称 θ 与 θ' 作为域扩张同构, 若存在域同构 $\phi: K \xrightarrow{\sim} K'$, 使得下图交换:



若 $\theta = \theta'$, 则 θ 的自同构 $\phi: K \xrightarrow{\sim} K$ 又称为域扩张 K/k 的自同构.

注记 3.1.6 (1) 后文中练习 3.1.22 有助于体会 $\phi \circ \theta = \theta'$ 这一条件.

(2) θ 的自同构 ϕ 满足 $\phi \circ \theta = \theta$, 即 $\phi|_{\theta(k)} = \text{Id}_{\theta(k)}$.

练习 3.1.7 在定义 3.1.5 中, $\phi: K \rightarrow K'$ 是 k -线性空间同构, 从而 $\dim_k K = \dim_k K'$.

注记 3.1.8 $\text{Aut}(K/k) := \{\theta \text{ 的自同构}\} \leq \text{Aut}(K)$ 为子群. 由练习 3.1.7 可见, “可视为线性同构” 是域扩张的自同构与一般的域自同构的一大区别.

定义 3.1.9 设 $\theta: R \hookrightarrow S$ 为环的单同态, $\alpha, \alpha_1, \alpha_2 \in S$.

(1) 定义 R 与 α 生成的子环为 S 中包含 $\theta(R)$ 及 α 的最小子环, 记为

$$R[\alpha] = \left\{ \text{有限和} \sum \theta(r_i) \alpha^i : r_i \in R \right\}.$$

(2) 记 S 中包含 $\theta(R)$ 及 α_1, α_2 的最小子环为

$$R[\alpha_1, \alpha_2] = \left\{ \text{有限和} \sum \theta(r_{ij}) \alpha_1^i \alpha_2^j : r_{ij} \in R \right\}.$$

注记 3.1.10 (1) 由命题 2.4.13, 环嵌入 $R \xrightarrow{\text{inc}} S$ 诱导环同态

$$\tilde{\psi}: R[x] \rightarrow S$$

使得 $\tilde{\psi}|_R = \text{Id}_R$ 且 $\theta(x) = \alpha$. 此时 $\text{Im } \tilde{\psi} = R[\alpha]$.

(2) $R[\alpha_1, \alpha_2] = R[\alpha_1][\alpha_2] = R[\alpha_2][\alpha_1]$.

例 3.1.11 $\mathbb{Z}[i] \subset \mathbb{C}$.

定义 3.1.12 设 $\theta: k \hookrightarrow K$ 为域同态, $\alpha, \alpha_1, \alpha_2 \in K$.

(1) 记 K 中包含 $\theta(k)$ 及 α 的最小子域为

$$k(\alpha) = \left\{ \frac{\sum \theta(r_i) \alpha^i}{\sum \theta(r'_j) \alpha^j} : r_i, r'_j \in k, \sum \theta(r'_j) \alpha^j \neq 0_K \right\}.$$

(2) 记 K 中包含 $\theta(k)$ 及 α_1, α_2 的最小子域为

$$k(\alpha_1, \alpha_2) = \left\{ \frac{\sum \theta(r_{ij}) \alpha_1^i \alpha_2^j}{\sum \theta(r'_{ij}) \alpha_1^i \alpha_2^j} : r_{ij}, r'_{ij} \in k, \sum \theta(r'_{ij}) \alpha_1^i \alpha_2^j \neq 0_K \right\}$$

注记 3.1.13 (1) 一般而言, $k(\alpha)$ 与 $k[x]$ 无关.

(2) $k[\alpha] \subset k(\alpha)$.

(3) 有如下交换图表:

$$\begin{array}{ccc} k & \xrightarrow{\theta} & K \\ & \searrow & \nearrow \text{inc} \\ & k(\alpha) & \end{array}$$

(4) $k(\alpha_1, \alpha_2) = k(\alpha_1)(\alpha_2) = k(\alpha_2)(\alpha_1)$.

例 3.1.14 $\mathbb{Q}(i) \subset \mathbb{C}$.

定义 3.1.15 称域扩张 K/k 为单扩张, 若存在 $\alpha \in K$ 使得 $K = k(\alpha)$.

例 3.1.16 (1) Kronecker 添根构造: $k \hookrightarrow k[x]/(f(x))$, $K = k(u) = k[u]$.

(2) 有理函数域 $k \subset k(x)$: $k[x] \subsetneq k(x)$.

(3) $\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(i) = \mathbb{Q}[i]$.

(4) $\mathbb{R} \subset \mathbb{C}$: $\mathbb{C} = \mathbb{R}(i) = \mathbb{R}[i]$.

定义 3.1.17 考虑域扩张 K/k 及 $\alpha \in K$. 称 α 为 k 上代数元, 若存在非零多项式 $f(x) \in k[x]$ 使得 $f(\alpha) = 0_K$. 否则, 称 α 为 k 上超越元.

例 3.1.18 考虑域扩张 \mathbb{C}/\mathbb{Q} , 则 $\sqrt{2}, e^{\frac{2\pi i}{3}}$ 均为 (\mathbb{Q}) 上代数元; π, e 均为 (\mathbb{Q}) 上超越元.

定理 3.1.19 考虑域扩张 K/k 以及 $\alpha \in K$ 在 k 上代数, 则唯一存在首一不可约多项式 $f(x) \in k[x]$ 满足:

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

(2) 若 $g(x) \in k[x]$ 满足 $g(\alpha) = 0$, 则 $f(x) \mid g(x)$.

这样的多项式 $f(x)$ 称为 α 关于 k 的最小多项式.

证明 考虑在 α 处的赋值同态

$$\begin{aligned} \text{ev}_\alpha : k[x] &\rightarrow K \\ g(x) &\mapsto g(\alpha), \end{aligned}$$

由 $k[x]$ 是 PID, 设其核 $\text{Ker}(\text{ev}_\alpha) = (f(x))$, 其中 $f(x) \in k[x]$. 由定理 2.2.20, 存在环同构

$$k[x]/(f(x)) \xrightarrow{\sim} k[\alpha].$$

由于 $k[\alpha] \subset K$ 为整环, $f(x) \in k[x]$ 为素元, 即 $f(x) \in k[x]$ 为不可约多项式. □

注记 3.1.20 由命题 2.4.31, $k[x]/(f(x))$ 为域, 因此 $k[\alpha] \subset K$ 为子域, 即 $k[\alpha] = k(\alpha)$. 这可用来说明例 3.1.16 中 (1)(3)(4) 与 (2) 的不同, 即在于 α 是否为 k 上代数元.

例 3.1.21 关于域扩张 \mathbb{C}/\mathbb{Q} , $\sqrt[3]{2}$ 的最小多项式为 $x^3 - 2$, $e^{\frac{2\pi i}{3}}$ 的最小多项式为 $x^2 + x + 1$.

练习 3.1.22 考虑域扩张 $\theta : k \rightarrow K$ 与 $\theta' : k \rightarrow K'$, $\alpha \in K$. 若存在域扩张的同构 $\phi : K \rightarrow K'$, 则

(1) α 在 k 上代数 $\iff \phi(\alpha)$ 在 k 上代数.

(2) 若 α 在 k 上代数, 则 α 和 $\phi(\alpha)$ 的最小多项式相同.

定理 3.1.23 (单扩张的结构定理) 设有单扩张 K/k 与 $\alpha \in K$ 使得 $K = k(\alpha)$.

(1) 若 α 在 k 上代数, 最小多项式为 $f(x)$, $\deg(f(x)) = d$, 则

◇ $\dim_k K = d < \infty$.

◇ $\{1, \alpha, \dots, \alpha^{d-1}\}$ 是 K 的一组 k -基, 且 $K = k[\alpha]$.

◇ 有域扩张同构 $K \simeq k[x]/(f(x))$.

(2) 若 α 在 k 上超越, 则

- ◇ $\dim_k K = \infty$.
- ◇ $k[\alpha] \subsetneq K$.
- ◇ 有域扩张同构 $K \simeq k(x)$.

提示 考虑赋值同态 ev_α : 若 α 代数, 用定理 2.2.20; 若 α 超越, 用定理 2.3.4.

注记 3.1.24 本质上仅有两种单扩张, 我们主要研究有限维域扩张.

例 3.1.25 (1) 考虑 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})/\mathbb{Q}$. 则 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$ 有 \mathbb{Q} -基 $\{1, \sqrt[3]{2}, \sqrt[3]{4}\}$, 且存在域同构

$$\mathbb{Q}[x]/(x^3 - 2) \xrightarrow{\sim} \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$$

使得 $u = x + (x^3 - 2) \mapsto \sqrt[3]{2}$ 且它在 \mathbb{Q} 上为恒等映射.

(2) 考虑 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}\omega)/\mathbb{Q}$. 则 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}\omega)$ 有 \mathbb{Q} -基 $\{1, \sqrt[3]{2}\omega, \sqrt[3]{4}\omega^2\}$, 且存在域同构

$$\mathbb{Q}[x]/(x^3 - 2) \xrightarrow{\sim} \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}\omega)$$

使得 $u = x + (x^3 - 2) \mapsto \sqrt[3]{2}\omega$ 且它在 \mathbb{Q} 上为恒等映射.

注记 3.1.26 作为 \mathbb{C} 的子域, $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) \neq \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}\omega)$. 但由例 3.1.25 可得交换图表

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) & & \sqrt[3]{2} \\
 & \nearrow \text{inc} & \uparrow \wr & & \uparrow \lambda \\
 \mathbb{Q} & \longrightarrow & \mathbb{Q}[x]/(x^3 - 2) & & \lambda \in \mathbb{Q} \\
 & \searrow \text{inc} & \downarrow \wr & & \downarrow \lambda \\
 & & \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}\omega) & & \sqrt[3]{2}\omega
 \end{array}$$

于是域扩张 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})/\mathbb{Q}$ 同构于 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}\omega)/\mathbb{Q}$:

$$\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) \xrightarrow{\sim} \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}\omega), \quad a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{4} \mapsto a + b\sqrt[3]{2}\omega + c\sqrt[3]{4}\omega^2.$$

应用于 $\sqrt[3]{3} \notin \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$ 的证明 用反证法, 设

$$\sqrt[3]{3} = a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{4}, \quad a, b, c \in \mathbb{Q},$$

即

$$3 = (a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{4})^3, \quad a, b, c \in \mathbb{Q}.$$

由注记 3.1.26, 域扩张 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})/\mathbb{Q}$ 同构于 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}\omega)/\mathbb{Q}$, 因此

$$(a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{4})^3 = 3 = (a + b\sqrt[3]{2}\omega + c\sqrt[3]{4}\omega^2)^3,$$

从而

$$a + b\sqrt[3]{2}\omega + c\sqrt[3]{4}\omega^2 = (a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{4})\omega^k,$$

其中 $k = 0$ 或 1 或 2 . 利用 $\omega^2 = -\omega - 1$ 化简可得:

◇ 若 $k = 0$, 则 $(b\sqrt[3]{2} - c\sqrt[3]{4})\omega = b\sqrt[3]{2} + 2c\sqrt[3]{4}$, 易知与 $\omega \notin \mathbb{R}$ 矛盾.

◇ 若 $k = 1$, 则 $c\sqrt[3]{4}\omega = a$, 易知与 $\omega \notin \mathbb{R}$ 矛盾.

◇ 若 $k = 2$, 则 $(a + 2b\sqrt[3]{2})\omega + 2a + b\sqrt[3]{2} = 0$, 易知与 $\omega \notin \mathbb{R}$ 矛盾.

故假设不成立, $\sqrt[3]{3} \notin \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$.

定义 3.1.27 定义域扩张 K/k 的次数为 $[K:k] := \dim_k K$.

练习 3.1.28 设 F/K 为域扩张, $u \in F$ 是 K 上奇次代数元. 求证 $K(u) = K(u^2)$.

练习 3.1.29 给出域扩张 F/K 的例子, 使得 $F = K(u, v)$, u 和 v 均是 K 上超越元, 但 $F \neq K(x_1, x_2)$.

解答 $K = \mathbb{Q}$, $u = \pi$, $v = \sqrt{\pi}$, u 和 v 在 K 上超越, 但 $F = K(\pi, \sqrt{\pi}) = \mathbb{Q}(\sqrt{\pi}) \simeq \mathbb{Q}(t) \not\simeq \mathbb{Q}(x_1, x_2)$. \square

练习 3.1.30 设 p 为素数, 分别求扩张 $\mathbb{Q}(e^{\frac{2\pi i}{p}})/\mathbb{Q}$ 和 $\mathbb{Q}(e^{\frac{2\pi i}{8}})/\mathbb{Q}$ 的次数. **提示** $p-1$ 和 4 .

练习 3.1.31 求元素 a 在域 K 上的最小多项式, 其中

(1) $a = \sqrt{2} + \sqrt{3}$, $K = \mathbb{Q}$. **提示** $x^4 - 10x^2 + 1$.

(2) $a = \sqrt{2} + \sqrt{3}$, $K = \mathbb{Q}(\sqrt{2})$. **提示** $x^2 - 2\sqrt{2}x - 1$.

(3) $a = \sqrt{2} + \sqrt{3}$, $K = \mathbb{Q}(\sqrt{6})$. **提示** $x^2 - (5 + 2\sqrt{6})$.

解答 (1) $f(x) = x^4 - 10x^2 + 1 \in \mathbb{Q}[x]$ 零化 a . 下证 $f(x) \in \mathbb{Q}[x]$ 不可约. 令

$$r_1 = \sqrt{2} + \sqrt{3}, \quad r_2 = \sqrt{2} - \sqrt{3}, \quad r_3 = \sqrt{3} - \sqrt{2}, \quad r_4 = -\sqrt{2} - \sqrt{3}.$$

由 $f(x) = (x - r_1)(x - r_2)(x - r_3)(x - r_4)$, $r_i \notin \mathbb{Q}$, 且对任意 $i \neq j$, 均有 $(x - r_i)(x - r_j) \notin \mathbb{Q}[x]$ 可知 $f(x) \in \mathbb{Q}[x]$ 不可约.

(2) $f(x) = (x - \sqrt{2})^2 - 3 = x^2 - 2\sqrt{2}x - 1 \in \mathbb{Q}(\sqrt{2})[x]$ 零化 a . 下证 $f(x) \in \mathbb{Q}(\sqrt{2})[x]$ 不可约. 否则, $a \in \mathbb{Q}(\sqrt{2})$, 考虑域扩张塔 $\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(\sqrt{2} + \sqrt{3}) \subset \mathbb{Q}(\sqrt{2})$. 由 (1) 知 $[\mathbb{Q}(\sqrt{2} + \sqrt{3}) : \mathbb{Q}] = 4$, 这与 $[\mathbb{Q}(\sqrt{2}) : \mathbb{Q}] = 2$ 矛盾.

(3) $f(x) = x^2 - (\sqrt{2} + \sqrt{3})^2 = x^2 - (5 + 2\sqrt{6}) \in \mathbb{Q}(\sqrt{6})[x]$ 零化 a . 下证 $f(x) \in \mathbb{Q}(\sqrt{6})[x]$ 不可约. 否则, $a \in \mathbb{Q}(\sqrt{6})$, 考虑域扩张塔 $\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(\sqrt{2} + \sqrt{3}) \subset \mathbb{Q}(\sqrt{6})$. 由 Eisenstein 判别法知 $x^2 - 6 \in \mathbb{Q}[x]$ 不可约, 因此 $[\mathbb{Q}(\sqrt{6}) : \mathbb{Q}] = 2$. 由 (1) 知 $[\mathbb{Q}(\sqrt{2} + \sqrt{3}) : \mathbb{Q}] = 4 > 2$, 矛盾. \square

3.2 域的代数扩张

定义 3.2.1 域扩张 K/k 称为代数扩张, 若任何 $\alpha \in K$ 均在 k 上代数.

例 3.2.2 \mathbb{R}/\mathbb{Q} 不是代数扩张, 例如 π 与 e 均为 (\mathbb{Q}) 上超越元.

引理 3.2.3 有限维域扩张总是代数扩张, 即若 $\dim_k K < \infty$, 则 K/k 代数.

证明 对任意 $\alpha \in K$, $k(\alpha)$ 是 K 的 k -线性子空间, 因此 $\dim_k k(\alpha) < \infty$. 由定理 3.1.23, α 是 k 上代数元. \square

由线性代数可得另证:

证明 对任意 $\alpha \in K$, $\{1, \alpha, \alpha^2, \dots\}$ 是 k -线性相关的, 即存在 k 上多项式零化 α . \square

定理 3.2.4 (维数公式) 考虑域扩张塔 $k \subset E \subset K$. 若 E/k 与 K/E 均为有限维域扩张, 则 K/k 亦为有限维域扩张, 且其次数具有塔性质:

$$[K : k] = [E : k][K : E].$$

提示 若 $(x_i)_{i \in I}$ 和 $(y_j)_{j \in J}$ 分别是 K 在 E 上和 E 在 k 上的一组基, 则 $(x_i y_j)_{(i,j) \in I \times J}$ 是 K 在 k 上的一组基.

例 3.2.5 设 $K = \mathbb{Q}(\sqrt{2}, \sqrt{3})$. 考虑域扩张 K/\mathbb{Q} , 求 $[K : \mathbb{Q}]$.

解答 考虑域扩张塔 $\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(\sqrt{2}) \subset K$, 由定理 3.2.4,

$$[K : \mathbb{Q}] = [\mathbb{Q}(\sqrt{2}) : \mathbb{Q}] [K : \mathbb{Q}(\sqrt{2})].$$

由例 2.7.41, $[\mathbb{Q}(\sqrt{2}) : \mathbb{Q}] = 2$. 由 $\sqrt{3} \notin \mathbb{Q}(\sqrt{2})$ 知 $x^2 - 3 \in \mathbb{Q}(\sqrt{2})[x]$ 不可约, 因此 $[K : \mathbb{Q}(\sqrt{2})] = 2$. 故 $[K : \mathbb{Q}] = 4$. \square

$\sqrt{3} \notin \mathbb{Q}(\sqrt{2})$ 的证明 设 $\sqrt{3} = a + b\sqrt{2}$, 其中 $a, b \in \mathbb{Q}$, 两边平方得

$$3 = a^2 + 2b^2 + 2ab\sqrt{2},$$

因此 $ab = 0$. 但不论 $a = 0$ 或 $b = 0$ 均矛盾.

注记 3.2.6 从 $\mathbb{Q}(\sqrt{2})$ 的 \mathbb{Q} -基 $\{1, \sqrt{2}\}$ 和 K 的 $\mathbb{Q}(\sqrt{2})$ -基 $\{1, \sqrt{3}\}$ 可得 K 的 \mathbb{Q} -基 $\{1, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \sqrt{6}\}$.

例 3.2.7 设 $K = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \omega)$. 考虑域扩张 K/\mathbb{Q} , 求 $[K : \mathbb{Q}]$.

解答 考虑域扩张塔 $\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) \subset K$, 由定理 3.2.4,

$$[K : \mathbb{Q}] = [\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) : \mathbb{Q}] [K : \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})].$$

由例 2.7.41, $[\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) : \mathbb{Q}] = 3$. 由于 $x^2 + x + 1 = (x - \omega)(x - \omega^2)$ 零化 ω , 且其在 \mathbb{C} 上的根 $\omega, \omega^2 \notin \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$, $x^2 + x + 1$ 在 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$ 上不可约, 因此 $[K : \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})] = 2$. 故 $[K : \mathbb{Q}] = 6$. 从 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$ 的 \mathbb{Q} -基 $\{1, \sqrt[3]{2}, \sqrt[3]{4}\}$ 和 K 的 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$ -基 $\{1, \omega\}$ 可得 K 的 \mathbb{Q} -基 $\{1, \sqrt[3]{2}, \sqrt[3]{4}, \omega, \sqrt[3]{2}\omega, \sqrt[3]{4}\omega\}$. \square

练习 3.2.8 求 $\sqrt[3]{2}$ 在 $\mathbb{Q}(\omega)$ 上的最小多项式.

解答 假设 $\sqrt[3]{2} \in \mathbb{Q}(\omega)$, 则有域扩张塔 $\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) \subset \mathbb{Q}(\omega)$. 由定理 3.2.4,

$$2 = [\mathbb{Q}(\omega) : \mathbb{Q}] = [\mathbb{Q}(\omega) : \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})][\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) : \mathbb{Q}] \geq 3,$$

矛盾. 故 $\sqrt[3]{2}, \sqrt[3]{2}\omega, \sqrt[3]{2}\omega^2 \notin \mathbb{Q}(\omega)$ 即 $x^3 - 2 \in \mathbb{Q}(\omega)[x]$ 不可约. 因此 $x^3 - 2$ 为 $\sqrt[3]{2}$ 在 $\mathbb{Q}(\omega)$ 上的最小多项式. \square

练习 3.2.9 设 K/k 为有限维域扩张, $\alpha \in K$ 的最小多项式 $f(x) \in k[x]$, 则 $\deg(f(x)) \mid [K : k]$.

定义 3.2.10 考虑域扩张 K/k . 若一族 K 中的元素 $\{\alpha_i\}_{i \in I}$ 满足 $k(\alpha_i : i \in I) = K$, 则称 $\{\alpha_i\}_{i \in I}$ 是 K/k 的生成元集. 具有有限生成集 $\{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}$ 的扩张称为有限生成扩张, 此时有域扩张塔

$$k \subset k(\alpha_1) \subset k(\alpha_1, \alpha_2) \subset \dots \subset K.$$

定理 3.2.11 域扩张 K/k 是有限维的 $\iff K/k$ 是有限生成的代数扩张.

命题 3.2.12 考虑域扩张塔 $k \subset E \subset K$, 则 K/k 代数 $\iff K/E$ 和 E/k 均代数.

证明 (\Rightarrow) 由 K/k 代数,

◇ 对任意 $\alpha \in K$, 存在 $f(x) \in k[x] \subset E[x]$ 使得 $f(\alpha) = 0_K$, 因此 K/E 代数.

◇ 对任意 $\beta \in E \subset K$, 存在 $g(x) \in k[x]$ 使得 $g(\beta) = 0_E$, 因此 E/k 代数.

(\Leftarrow) 对任意 $\alpha \in K$, 由 K/E 代数, 存在 $u_0, u_1, \dots, u_{n-1} \in E$, 使得

$$\alpha^n + u_{n-1}\alpha^{n-1} + \dots + u_1\alpha + u_0 = 0_K.$$

因此 α 在 $k(u_0, u_1, \dots, u_{n-1})$ 上代数. 由定理 3.1.23,

$$[k(u_0, u_1, \dots, u_{n-1}, \alpha) : k(u_0, u_1, \dots, u_{n-1})] < \infty.$$

又 $k(u_0, u_1, \dots, u_{n-1}) \subset E$, E/k 代数, $k(u_0, u_1, \dots, u_{n-1})/k$ 是有限生成的代数扩张. 由定理 3.2.11,

$$[k(u_0, u_1, \dots, u_{n-1}) : k] < \infty.$$

由定理 3.2.4 即得

$$[k(u_0, u_1, \dots, u_{n-1}, \alpha) : k] < \infty.$$

而 $k \subset k(\alpha) \subset k(u_0, u_1, \dots, u_{n-1}, \alpha)$, 故 $[k(\alpha) : k] < \infty$. 再由定理 3.1.23, α 在 k 上代数. 故 K/k 代数. \square

定义-定理 3.2.13 考虑域扩张 K/k . 定义 $E = \{\alpha \in K : \alpha \text{ 在 } k \text{ 上代数}\}$, 则 $E \subset K$ 为子域, 它称为 k 在 K 中的代数闭包.

证明 对任意 $\alpha, \beta \in K$, 考虑域扩张塔 $k \subset k(\alpha) \subset k(\alpha, \beta)$. 由 α, β 在 k 上代数,

$$[k(\alpha) : k] < \infty, \quad [k(\alpha, \beta) : k(\alpha)] < \infty.$$

由定理 3.2.4, $[k(\alpha, \beta) : k] < \infty$. 再由定理 3.2.11, $k(\alpha, \beta)/k$ 是有限生成的代数扩张. 特别地, $\alpha \pm \beta, \alpha \cdot \beta \in k(\alpha, \beta)$ 均在 k 上代数; 若 $\beta \neq 0_K$, $\beta^{-1} \in k(\alpha, \beta)$ 亦在 k 上代数. \square

练习 3.2.14 考虑域扩张 K/k . 若 $\beta \in K$ 关于 k 的最小多项式为 $f(x)$, $\deg(f(x)) = d$, 则 β^{-1} 的最小多项式为 $x^d \cdot f(\frac{1}{x})$.

练习 3.2.15 在定义-定理 3.2.13 中, 若 $E \subsetneq K$, 任取 $u \in K \setminus E$, 则 u 在 E 上超越.

定义 3.2.16 域 K 称为代数闭域, 若它没有非平凡的代数扩张, 亦即: E/K 为代数扩张 $\iff [E : K] = 1$ ($E = K$).

命题 3.2.17 域 K 是代数闭域当且仅当 $K[x]$ 中任意不可约多项式均为一次的.

命题 3.2.18 域 K 是代数闭域当且仅当 $K[x]$ 中每个非常值多项式完全分裂, 亦即有一次因子.

练习 3.2.19 若域 K 是代数闭域, 则 K 必为无限域.

证明 假设 $|K| < \infty$. 考虑 $f(x) = \prod_{\lambda \in K} (x - \lambda) + 1_K \in K[x]$, 则 $f(x)$ 在 K 上无根. 由命题 3.2.18 即得矛盾. 故 K 为无限域. \square

定理 3.2.20 (代数基本定理) \mathbb{C} 是代数闭域.

练习 3.2.21 记 $\overline{\mathbb{Q}}$ 为 \mathbb{Q} 在 \mathbb{C} 中的代数闭包, 则 $\overline{\mathbb{Q}}$ 是代数闭域.

证明 任取 $f(x) \in \overline{\mathbb{Q}}[x]$, 由定理 3.2.20 与命题 3.2.18, 设 $f(x) = \prod_{i=1}^n (x - \lambda_i)$, 其中 $\lambda_i \in \mathbb{C}$. 记 K 为 $\overline{\mathbb{Q}}$ 在 \mathbb{C} 中的代数闭包, 则由 $f(x) \in \overline{\mathbb{Q}}[x]$ 知 $\lambda_i \in K$. 由于 $K/\overline{\mathbb{Q}}$ 与 $\overline{\mathbb{Q}}/\mathbb{Q}$ 均为代数扩张, 根据命题 3.2.12, K/\mathbb{Q} 为代数扩张, 即 $K \subset \overline{\mathbb{Q}}$. 故 $\lambda_i \in \overline{\mathbb{Q}}$, 再由命题 3.2.18 即知 $\overline{\mathbb{Q}}$ 是代数闭域. \square

注记 3.2.22 $\overline{\mathbb{Q}}$ 为可数域, 其中的元素称为代数数.

定理 3.2.23 对任意域 k , 均存在 (同构意义下) 唯一的代数扩张 $k \hookrightarrow \bar{k}$ 使得 \bar{k} 为代数闭域. 这样的 \bar{k} 称为 k 的代数闭包.

例 3.2.24 \mathbb{C} 为 \mathbb{R} 的代数闭包, 练习 3.2.21 中 $\overline{\mathbb{Q}}$ 为 \mathbb{Q} 的代数闭包.

练习 3.2.25 设 u 是域 K 的某扩域中的元素, 且 $x^n - a$ 是 u 在 K 上的最小多项式. 对于 $m \mid n$, 求 u^m 在域 K 上的最小多项式.

练习 3.2.26 设 u 是多项式 $x^3 - 6x^2 + 9x + 3$ 的一个实根.

(1) 求证 $[\mathbb{Q}(u) : \mathbb{Q}] = 3$.

(2) 试将 $u^4, (u+1)^{-1}, (u^2 - 6u + 8)^{-1}$ 表示成 $1, u, u^2$ 的 \mathbb{Q} -线性组合.

练习 3.2.27 设 $u = \frac{x^3}{x+1}$, 求 $[\mathbb{Q}(x) : \mathbb{Q}(u)]$. 提示 $[\mathbb{Q}(x) : \mathbb{Q}(u)] = 3$.

练习 3.2.28 设 M/K 为域扩张, M 中元素 u, v 分别是 K 上的 m 次和 n 次代数元, $F = K(u), E = K(v)$.

(1) 求证 $[FE : K] \leq mn$.

(2) 若 $\gcd(m, n) = 1$, 则 $[FE : K] = mn$.

我们可以将上面的练习 3.1.4 与练习 3.2.27 推广为如下命题.

命题 3.2.29 设 k 为域, $u \in k(x) \setminus k$, 则 u 在 k 上超越, x 在 $k(u)$ 上代数, 且 $[k(x) : k(u)] = \deg(u)$, 这里 $\deg(u)$ 定义为 u 的既约表达中分子、分母次数的较高者.

证明 由命题 2.7.7, 可设 $u(x) = \frac{a(x)}{b(x)}$, 其中 $a(x), b(x) \in k[x]$ 互素. 则 $a(t) - b(t)u \in k(u)[t]$ 有根 x , 从而 x 在 $k(u)$ 上代数. 进而 u 在 k 上超越, 否则 $k \hookrightarrow k(u) \hookrightarrow k(x)$ 是代数扩张的复合, 由命题 3.2.12, $k(x)/k$ 亦为代数扩张, 矛盾. 由于 u 在 k 上超越, 由命题 2.4.13 易知

$$k[y, t] \simeq k[u, t], \quad y \leftrightarrow u, \quad t \leftrightarrow t.$$

由于 $a(t) - b(t)y \in k[y, t]$ 显然不可约, 因此 $a(t) - b(t)u \in k[u, t]$ 亦不可约, 再由命题 2.7.34 知 $a(t) - b(t)u \in k(u)[t]$ 不可约, 而 x 是它的根, 因此 (在至多相差常数倍的意义下) 它是 x 在 $k(u)$ 上的最小多项式, 其次数为 $\deg(u)$. \square

3.3 分裂域

引理 3.3.1 (关键引理) 考虑下图

$$\begin{array}{ccc} \alpha \in E & & E' \\ \uparrow \text{域扩张} & & \uparrow \text{域扩张} \\ k & \xrightarrow[\sim]{\sigma \text{ 域同构}} & k' \end{array}$$

设 α 关于 k 的最小多项式为 $f(x) = x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_0 \in k[x]$. 令 $\sigma(f) = x^n + \sigma(a_{n-1})x^{n-1} + \cdots + \sigma(a_0) \in k'[x]$. 则

(1) 若 $\beta \in \text{Root}_{E'}(\sigma(f))$, 则唯一存在 σ 的延拓

$$\tilde{\sigma} : k(\alpha) \xrightarrow{\sim} k'(\beta)$$

满足 $\tilde{\sigma}(\alpha) = \beta$.

(2) 恰有 $|\text{Root}_{E'}(\sigma(f))|$ 个这样的延拓 $\tilde{\sigma} : k(\alpha) \hookrightarrow E'$.

证明 (1) 设存在 $\beta \in \text{Root}_{E'}(\sigma(f))$.

① 先证明 $\tilde{\sigma}$ 的至多唯一性. 设 $\deg(f(x)) = d$. 由定理 3.1.23, $\{1, \alpha, \dots, \alpha^{d-1}\}$ 是 $k(\alpha)$ 的一组 k -基, 而 $\tilde{\sigma}(\alpha) = \beta$, 且对任意 $\lambda \in k$, $\tilde{\sigma}(\lambda) = \sigma(\lambda)$.

② 再验证如上 $\tilde{\sigma} : k(\alpha) \rightarrow k'(\beta)$ 满足要求. 由 σ 是域同构知 $\sigma(f) \in k'[x]$ 是首一不可约多项式, 又 $\beta \in \text{Root}_{E'}(\sigma(f))$, 因此 $\sigma(f)$ 是 β 关于 k' 的最小多项式. 又域同构 $\sigma : k \xrightarrow{\sim} k'$ 自然诱导环同构 $k[x] \xrightarrow{\sim} k'[x]$ (仍用 σ 标识), 它使得 $(f(x)) \xrightarrow{\sigma} (\sigma(f(x)))$. 由练习 2.6.16, 有环同构 $k[x]/(f(x)) \xrightarrow{\sim} k'[x]/(\sigma(f(x)))$. 再结合定理 3.1.23 即可得到如下图表:

$$\begin{array}{ccccc} \alpha & \in & k(\alpha) & \xleftarrow{\sim} & k[x]/(f(x)) & \ni & \bar{\alpha} \\ \downarrow \text{虚线} & & \downarrow \tilde{\sigma} & & \downarrow \wr & & \downarrow \\ \beta & \in & k'(\beta) & \xleftarrow{\sim} & k'[x]/(\sigma(f(x))) & \ni & \bar{\beta} \end{array}$$

由此图表显见欲求 $\tilde{\sigma}$ (即虚线箭头) 的存在性.

(2) 设 $\delta: k(\alpha) \hookrightarrow E'$ 为 (1) 中所述的延拓:

$$\begin{array}{ccc} k(\alpha) & \xhookrightarrow{\delta} & E' \\ \uparrow & & \uparrow \\ k & \xrightarrow[\sim]{\sigma} & k' \end{array}$$

将 δ 作用在等式

$$\alpha^n + a_{n-1}\alpha^{n-1} + \cdots + a_0 = 0_{k(\alpha)}$$

两端即得

$$\delta(\alpha)^n + \sigma(a_{n-1})\delta(\alpha)^{n-1} + \cdots + \sigma(a_0) = 0_{E'},$$

即 $\delta(\alpha) \in \text{Root}_{E'}(\sigma(f))$. 再由 (1) 即得证. \square

注记 3.3.2 由定理 3.1.23, 当 $\beta \in \text{Root}_{E'}(\sigma(f))$ 时, 有如下图表:

$$\begin{array}{ccccccc} & & \alpha \in E & & E' \ni \beta & & \\ & & \uparrow & & \uparrow & & \\ k[x]/(f(x)) & \xleftarrow{\sim} & k(\alpha) & \xrightarrow[\alpha \mapsto \beta]{\exists! \tilde{\sigma} \text{ 域同构}} & k'(\beta) & \xrightarrow{\sim} & k'[x]/(\sigma(f(x))) \\ & & \uparrow & & \uparrow & & \\ & & k & \xrightarrow[\sim]{\sigma} & k' & & \end{array}$$

定义 3.3.3 设 k 为域, 非常值多项式 $f(x) \in k[x]$ 的分裂域是指域扩张 E/k 满足:

- (1) $f(x)$ 在 E 上分裂: $f(x) = (x - \alpha_1) \cdots (x - \alpha_n), \alpha_i \in E$.
- (2) $E = k(\alpha_1, \cdots, \alpha_n)$.

注记 3.3.4 由每个 α_i 均被 $f(x) \in k[x]$ 零化知它们在 k 上代数, 再由定理 3.1.23 知域扩张塔 $k \subset k(\alpha_1) \subset k(\alpha_1, \alpha_2) \subset \cdots \subset E$ 中相邻扩张均是有限维的. 由定理 3.2.4 得 $[E : k] < \infty$.

定理 3.3.5 设 k 为域, 则非常值多项式 $f(x) \in k[x]$ 在 k 上的分裂域总是存在的.

证明 (1) 先证明存在域扩张 K/k 使得 $f(x)$ 在 K 上完全分裂. 提示 添根构造.

- (2) 由 (1), 设 $f(x) = (x - \beta_1) \cdots (x - \beta_n), \beta_i \in K$. 取 $E = k(\beta_1, \cdots, \beta_n) \subset K$, 则 E/k 为分裂域. \square

例 3.3.6 设 $f(x) \in \mathbb{Q}[x]$, 由定理 3.2.20,

$$f(x) = (x - z_1) \cdots (x - z_n), \quad z_i \in \mathbb{C}.$$

则 $E = \mathbb{Q}(z_1, \cdots, z_n)$ 为 $f(x)$ 的分裂域.

例 3.3.7 $x^3 - 2 \in \mathbb{Q}[x]$ 的分裂域为 $E = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \sqrt[3]{2}\omega, \sqrt[3]{2}\omega^2) = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \omega)$.

例 3.3.8 $(x^2 - 2)(x^2 - 3) \in \mathbb{Q}[x]$ 的分裂域为 $E = \mathbb{Q}(\sqrt{2}, \sqrt{3})$.

例 3.3.9 $x^2 + x + \bar{1} \in \mathbb{F}_2[x]$ 的分裂域为 $\mathbb{F}_2(u, u + \bar{1}) = \mathbb{F}_4$.

定义 3.3.10 设 E/k 为 $f(x) \in k[x]$ 的分裂域, 称 $\text{Gal}(E/k) := \text{Aut}(E/k) = \{\delta \in \text{Aut}(E) : \delta|_k = \text{Id}_k\}$ 为 E/k 的 Galois 群 (或方程 $f(x) = 0$ 的 Galois 群 $\text{Gal}_k(f)$).

注记 3.3.11 由下面的定理 3.3.13, Galois 群的定义不依赖于域扩张 E/k 的选取.

命题 3.3.12 任取 $\alpha \in \text{Root}_E(f(x))$ 与 $\sigma \in \text{Gal}_k(f)$, 则 $\sigma(\alpha) \in \text{Root}_E(f(x))$.

定理 3.3.13 给定域同构 $\sigma: k \xrightarrow{\sim} k'$, $f(x) \in k[x]$ 及相应的 $\sigma(f(x)) \in k'[x]$. 取 E/k 为 $f(x)$ 的一个分裂域, E'/k' 为 $\sigma(f(x))$ 的一个分裂域. 则 σ 可延拓为域同构

$$\delta: E \xrightarrow{\sim} E'.$$

这样的域同构 δ 至多有 $[E:k] = [E':k']$ 个.

证明 对 $[E:k]$ 归纳. 若 $[E:k] = 1$, 则 $E = k$. 因此 $f(x)$ 在 k 上完全分裂, $\sigma(f(x))$ 在 k' 上完全分裂, $E' = k'$. 此时 σ 自身即为所求 δ (自然个数为 1). 现设 $[E:k] < N$ 时结论成立, 考虑 $[E:k] = N \geq 2$ 的情形. 设 $f(x)$ 在 E 上完全分裂为

$$f(x) = (x - \alpha_1) \cdots (x - \alpha_n), \quad \alpha_i \in E.$$

由于 $[E:k] > 1$, 不妨设 $\alpha_1 \notin k$. 设 α_1 关于 k 的最小多项式为 $g(x)$, 则 $\deg(g(x)) \geq 2$ 且 $g(x) \mid f(x)$, 进而 $\sigma(g(x)) \mid \sigma(f(x))$. 由 $\sigma(f(x))$ 在 E' 上完全分裂即知 $\sigma(g(x))$ 亦在 E' 上完全分裂. 于是可取 $\beta_1 \in \text{Root}_{E'}(\sigma(g(x)))$. 由引理 3.3.1, 唯一存在 σ 的延拓 $\tilde{\sigma}: k(\alpha_1) \xrightarrow{\sim} k'(\beta_1)$ 满足 $\tilde{\sigma}(\alpha_1) = \beta_1$. 由分裂域的定义可知 $E/k(\alpha_1)$ 是 $f(x) \in k(\alpha_1)[x]$ 的分裂域, $E'/k'(\beta_1)$ 是 $\sigma(f(x)) \in k'(\beta_1)[x]$ 的分裂域. 由定理 3.2.4,

$$[E:k(\alpha_1)] = \frac{[E:k]}{[k(\alpha_1):k]} < [E:k].$$

由归纳假设, 存在域同构 $\delta: E \xrightarrow{\sim} E'$ 延拓 $\tilde{\sigma}$, 且这样的域同构至多有 $[E:k(\alpha_1)]$ 个. 而由引理 3.3.1, 恰有 $|\text{Root}_{E'}(\sigma(g(x)))|$ 个 $\tilde{\sigma}: k(\alpha_1) \xrightarrow{\sim} k'(\beta_1)$. 于是这样的 δ 的个数为

$$[E:k(\alpha_1)] \cdot \underbrace{|\text{Root}_{E'}(\sigma(g(x)))|}_{\leq \deg(g(x)) = [k(\alpha_1):k]} \leq [E:k(\alpha_1)][k(\alpha_1):k] \stackrel{\text{定理 3.2.4}}{=} [E:k].$$

□

推论 3.3.14 在定理 3.3.13 中取 $\delta = \text{Id}_k$ (从而 $k' = k, \sigma(f(x)) = f(x)$), 可得

$$\begin{array}{ccc} E & \xrightarrow[\sim]{\exists \delta \text{ 域同构}} & E' \\ \uparrow & & \uparrow \\ k & \xrightarrow{\text{Id}_k} & k \end{array}$$

(1) **(分裂域的唯一性)** 分裂域在域扩张同构的意义下唯一.

(2) $|\text{Gal}_k(f)| := |\text{Aut}(E/k)| \leq [E:k]$.

例 3.3.15 考虑 $f(x) = x^3 - 2 \in \mathbb{Q}[x]$, 由例 3.3.7, 其分裂域 $E = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \omega)$, 因此 $\text{Gal}_{\mathbb{Q}}(f) = \text{Aut}(E/\mathbb{Q})$. 同练习 2.5.18 (2) 证明手法可知, E 上任一自同构限制在 \mathbb{Q} 上均为恒等映射. 于是域 E 的自同构均为域扩张 E/\mathbb{Q} 的自同构, $\text{Aut}(E/\mathbb{Q}) = \text{Aut}(E)$. 记

$$\begin{aligned} \text{Root}_E(x^3 - 2) &= \left\{ \beta_0 = \sqrt[3]{2}, \beta_1 = \sqrt[3]{2}\omega, \beta_2 = \sqrt[3]{2}\omega^2 \right\}, \\ \text{Root}_E(x^2 + x + 1) &= \left\{ \alpha_1 = \omega, \alpha_2 = \omega^2 \right\}. \end{aligned}$$

由引理 3.3.1, 存在 $\text{Id}_{\mathbb{Q}}$ 的延拓

$$\sigma_i : \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) \xrightarrow{\sim} \mathbb{Q}(\beta_i)$$

满足 $\sigma_i(\sqrt[3]{2}) = \beta_i$. 再次运用引理 3.3.1, 存在 σ_i 的延拓

$$\delta_{i,j} : \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})(\omega) \xrightarrow{\sim} \mathbb{Q}(\beta_i)(\alpha_j)$$

满足 $\delta_{i,j}(\omega) = \alpha_j$. 故

$$\text{Aut}(E) = \{\delta_{i,j} : i = 0, 1, 2; j = 1, 2\}.$$

此时 $|\text{Aut}(E/\mathbb{Q})| = 6 = [E : \mathbb{Q}]$.

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})(\omega) & \xrightarrow[\sim]{\delta_{i,j}} & \mathbb{Q}(\beta_i)(\alpha_j) \\ \uparrow x^2+x+1 & & \uparrow \sigma_i(x^2+x+1) \\ \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) & \xrightarrow[\sim]{\sigma_i} & \mathbb{Q}(\beta_i) \\ \uparrow x^3-2 & & \uparrow \text{Id}_{\mathbb{Q}}(x^3-2) \\ \mathbb{Q} & \xlongequal{\text{Id}_{\mathbb{Q}}} & \mathbb{Q} \end{array}$$

练习 3.3.16 例 3.3.15 中 $\text{Aut}(E)$ 的乘法表.

解答 见表 3.1. 注意 $\text{Aut}(E)$ 是非 Abel 群.

表 3.1: 例 3.3.15 中 $\text{Aut}(E)$ 的乘法表

$\downarrow \circ \rightarrow$	$\delta_{0,1}$	$\delta_{0,2}$	$\delta_{1,1}$	$\delta_{1,2}$	$\delta_{2,1}$	$\delta_{2,2}$
$\delta_{0,1}$	$\delta_{0,1}$	$\delta_{0,2}$	$\delta_{1,1}$	$\delta_{1,2}$	$\delta_{2,1}$	$\delta_{2,2}$
$\delta_{0,2}$	$\delta_{0,2}$	$\delta_{0,1}$	$\delta_{2,2}$	$\delta_{2,1}$	$\delta_{1,2}$	$\delta_{1,1}$
$\delta_{1,1}$	$\delta_{1,1}$	$\delta_{1,2}$	$\delta_{2,1}$	$\delta_{2,2}$	$\delta_{0,1}$	$\delta_{0,2}$
$\delta_{1,2}$	$\delta_{1,2}$	$\delta_{1,1}$	$\delta_{0,2}$	$\delta_{0,1}$	$\delta_{2,2}$	$\delta_{2,1}$
$\delta_{2,1}$	$\delta_{2,1}$	$\delta_{2,2}$	$\delta_{0,1}$	$\delta_{0,2}$	$\delta_{1,1}$	$\delta_{1,2}$
$\delta_{2,2}$	$\delta_{2,2}$	$\delta_{2,1}$	$\delta_{1,2}$	$\delta_{1,1}$	$\delta_{0,2}$	$\delta_{0,1}$

例 3.3.17 考虑 $f(x) = x^2 + x + \bar{1} \in \mathbb{F}_2[x]$, 由例 3.3.9, 其分裂域 $\mathbb{F}_2(u, u + \bar{1}) = \mathbb{F}_4$. 因此 $\text{Gal}_{\mathbb{F}_2}(f) = \text{Aut}(\mathbb{F}_4/\mathbb{F}_2)$. 由于 \mathbb{F}_4 上任一自同构限制在 \mathbb{F}_2 上均为恒等映射, $\text{Aut}(\mathbb{F}_4/\mathbb{F}_2) = \text{Aut}(\mathbb{F}_4)$. 记

$$\text{Root}_{\mathbb{F}_4}(x^2 + x + \bar{1}) = \{\alpha_0 = u, \alpha_1 = u + \bar{1}\}.$$

由引理 3.3.1, 存在 $\text{Id}_{\mathbb{F}_2}$ 的延拓

$$\delta_i : \mathbb{F}_4 \xrightarrow{\sim} \mathbb{F}_2(\alpha_i)$$

满足 $\delta_i(u) = \alpha_i$. 故

$$\text{Aut}(\mathbb{F}_4) = \{\delta_0, \delta_1\}.$$

此时 $|\text{Aut}(\mathbb{F}_4/\mathbb{F}_2)| = 2 = [\mathbb{F}_4 : \mathbb{F}_2]$.

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{F}_2(u) & = & \mathbb{F}_4 \xrightarrow{\delta_i} \mathbb{F}_4 \\ & \uparrow \text{Id}_{\mathbb{F}_2} & \uparrow \text{Id}_{\mathbb{F}_2} \\ & \mathbb{F}_2 & \xrightarrow{\text{Id}_{\mathbb{F}_2}} \mathbb{F}_2 \end{array}$$

练习 3.3.18 例 3.3.17 中, $\delta_0 = \text{Id}_{\mathbb{F}_4}$, 而对每个 $a \in \mathbb{F}_4$ 均有 $\delta_1(a) = a^2$.

定义 3.3.19 称非零多项式 $f(x) \in k[x]$ (在某个扩域里) 有重根, 若存在域扩张 E/k 使得对某个 $a \in E$ 有 $(x-a)^2 \mid f(x)$.

定义 3.3.20 设 $f(x) = a_n x^n + \cdots + a_1 x + a_0 \in k[x]$. 定义 $f(x)$ 的形式微分为

$$f'(x) = n a_n x^{n-1} + \cdots + 2 a_2 x + a_1.$$

注记 3.3.21 若 $n 1_k \neq 0_k$, 则对任意 n 次多项式 $f(x)$, $\deg(f'(x)) = \deg(f(x)) - 1$.

性质 3.3.22 (Leibniz 法则) 设 $f(x), g(x) \in k[x]$, 则

$$(f(x)g(x))' = f'(x)g(x) + f(x)g'(x).$$

引理 3.3.23 非零多项式 $f(x) \in k[x]$ 无重根当且仅当 $\gcd_{k[x]}(f(x), f'(x)) = 1$.

定义 3.3.24 非零多项式 $f(x) \in k[x]$ 称为 k 上可分的, 若 $f(x)$ 在 $k[x]$ 中的不可约因子均无重根.

引理 3.3.25 若 $\text{char}(k) = 0$, 则 k 上的任意多项式均可分.

证明 设 $g(x)$ 是 $f(x) \in k[x]$ 的不可约因子. 由注记 3.3.21, $\deg(g'(x)) = \deg(g(x)) - 1$. 因此

$$\gcd_{k[x]}(g(x), g'(x)) = 1.$$

由引理 3.3.23, $g(x)$ 无重根. 故 $f(x)$ 在 k 上可分. □

例 3.3.26 (不可分多项式) 考虑有理函数域 $k = \mathbb{F}_p(t)$, 其中 p 为素数, t 为未定元. 由 $t \in \mathbb{F}_p[t]$ 为素元, 根据 Eisenstein 判别法, $x^p - t \in \mathbb{F}_p[t][x]$ 不可约. 而 $\mathbb{F}_p[t]$ 为 UFD, 由命题 2.7.34, $x^p - t \in k[x]$ 不可约. 设 α 是 $x^p - t$ 在 k 的某个扩域上的根, 则由

$$x^p - t = x^p - \alpha^p = (x - \alpha)^p$$

可知 α 是重根. 故 $x^p - t \in k[x]$ 是不可分多项式.

练习 3.3.27 考虑域扩张 K/k 与 $f(x) \in k[x]$. 若 $f(x)$ 在 k 上可分, 则 $f(x)$ 在 K 上亦可分.

定理 3.3.13 续 给定域同构 $\sigma : k \xrightarrow{\sim} k'$, $f(x) \in k[x]$ 及相应的 $\sigma(f(x)) \in k'[x]$. 取 E/k 为 $f(x)$ 的一个分裂域, E'/k' 为 $\sigma(f(x))$ 的一个分裂域. 则 $f(x) \in k[x]$ 可分当且仅当 σ 仅有 $[E : k]$ 个延拓 $\delta : E \xrightarrow{\sim} E'$. 此时 $|\text{Aut}(E/k)| = [E : k]$.

有限维域扩张 设 E/k 为有限维域扩张, 由定理 3.2.11, E/k 是有限生成的代数扩张. 因此任意 $u \in E$ 均有关于 k 的最小多项式 $g(x)$. 对任意 $\sigma \in \text{Aut}(E/k)$, 由 $\sigma|_k = \text{Id}_k$ 知, 对 $g(x) \in k[x]$, 有 $g(u) = 0 \implies g(\sigma(u)) = 0$, 即 $\sigma(u) \in \text{Root}_E(g(x))$, 它仅有有限种可能取值. 设 $E = k(u_1, \dots, u_n)$, 我们有以下事实:

练习 3.3.28 设 $\sigma, \tau \in \text{Aut}(E/k)$. 若 $\sigma(u_i) = \tau(u_i), \forall i$, 则 $\sigma = \tau$.

也即域扩张 E/k 的自同构完全由其在生成元集上的作用确定. 故 $\text{Aut}(E/k)$ 是有限群.

例 3.3.29 $\text{Aut}(\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})/\mathbb{Q}) = \text{Aut}(\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})) = \{\text{Id}_{\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})}\}$. 它是平凡群的原因在于 $x^3 - 2$ 在 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$ 中的根仅有 $\sqrt[3]{2}$.

定理 3.3.30 设 E/k 是有限维域扩张, 则 $|\text{Aut}(E/k)| \leq [E : k]$, 等号成立当且仅当 E/k 是 k 上某个可分多项式的分裂域. 此时, 对任意 $a \in E$, 有 $a \in k$ 当且仅当对任意 $\sigma \in \text{Aut}(E/k)$ 均有 $\sigma(a) = a$.

证明 (1) 由定理 3.2.11, E/k 是有限生成的代数扩张, 设 $E = k(u_1, \dots, u_n)$. 不妨只考虑 $n = 2$ 的情形. 取 u_1 关于 k 的最小多项式 $g_1(x) \in k[x]$, 任取 $\beta_1 \in \text{Root}_E(g_1(x))$. 由引理 3.3.1, 对于每个取定的 β_1 , 唯一存在 Id_k 的延拓 $\sigma_1 : k(u_1) \xrightarrow{\sim} k(\beta_1)$ 满足 $\sigma_1(u_1) = \beta_1$. 这样的延拓 σ_1 恰有 $|\text{Root}_E(g_1(x))|$ 个, 而 $|\text{Root}_E(g_1(x))| \leq \deg(g_1(x)) = [k(\beta_1) : k]$. 再取 u_2 关于 $k(u_1)$ 的最小多项式 $g_2(x) \in k(u_1)[x]$, 任取 $\beta_2 \in \text{Root}_E(\sigma_1(g_2(x)))$. 再由引理 3.3.1, 对于给定的 σ_1 与取定的 β_2 , 唯一存在 σ_1 的延拓 $\sigma_2 : E \xrightarrow{\sim} E$ 满足 $\sigma_2(u_2) = \beta_2$. 这样的延拓恰有 $|\text{Root}_E(\sigma_1(g_2(x)))|$ 个, 而 $|\text{Root}_E(\sigma_1(g_2(x)))| \leq \deg(g_2(x)) = [E : k(\beta_1)]$. 故

$$\begin{aligned} |\text{Aut}(E/k)| &= |\text{Root}_E(g_1(x))| \cdot |\text{Root}_E(\sigma_1(g_2(x)))| \\ &\leq [k(\beta_1) : k][E : k(\beta_1)] \stackrel{\text{定理 3.2.4}}{=} [E : k]. \end{aligned}$$

(2) 设 $|\text{Aut}(E/k)| = [E : k]$. 由 (1) 中第一处 “ \leq ” 为 “ $=$ ” 知, u_1 关于 k 的最小多项式 $h_1(x) \in k[x]$ 在 E 上分裂且无重根. 由于从 k 到 E 的扩张不依赖于 u_1, \dots, u_n 的顺序, 对域扩张 $k(u_i)/k$ 如上分析即知, u_i 关于 k 的最小多项式 $h_i \in k[x]$ 在 E 上分裂且在 k 上可分. 记 $f(x) = \prod_{i=1}^n h_i(x) \in k[x]$, 则 $f(x)$ 在 E 上分裂且在 k 上可分, E/k 即 $f(x)$ 的分裂域.

(3) 设 E/k 为 k 上可分多项式 $f(x)$ 的分裂域, $f(x) = (x - u_1) \cdots (x - u_n)$. 由于 u_1 关于 k 、 u_2 关于 $k(u_1)$ 直至 u_n 关于 $k(u_1, \dots, u_{n-1})$ 的最小多项式均为 $f(x)$ 的因子, 因此它们在 E 上分裂且无重根. 由此可知 (1) 中每处 “ \leq ” 均为 “ $=$ ”, 故 $|\text{Aut}(E/k)| = [E : k]$.

(4) 设 E/k 是 k 上可分多项式 $f(x)$ 的分裂域, $a \in E$, 且对任意 $\sigma \in \text{Aut}(E/k)$ 均有 $\sigma(a) = a$. 下证 $a \in k$. 用反证法, 假设 $a \notin k$, 则 a 关于 k 的最小多项式 $g(x)$ 满足 $\deg(g(x)) \geq 2$. 同 (2) 知 $g(x)$ 在 E 上分裂且无重根, 因此 $|\text{Root}_E(g(x))| = \deg(g(x)) \geq 2$, 存在 $b \neq a$ 使得 $g(b) = 0$. 由引理 3.3.1, 存在 Id_k 的延拓 $\sigma : k(a) \xrightarrow{\sim} k(b)$ 满足 $\sigma(a) = b$. 由于 $\sigma(f(x)) = f(x)$, $E/k(a)$ 为 $f(x) \in k(a)[x]$ 的分裂域, $E/k(b)$ 为 $f(x) \in k(b)[x]$ 的分裂域, 由定理 3.3.13, 存在 σ 的延拓 $\delta \in \text{Aut}(E)$. 因此 $\delta \in \text{Aut}(E/k)$, 但 $\delta(a) = \sigma(a) = b \neq a$, 矛盾.

$$\begin{array}{ccc} E & \xrightarrow{\sim} & E \\ \uparrow & & \uparrow \\ k(a) & \xrightarrow{\sim} & k(b) \\ \uparrow & & \uparrow \\ k & \xrightarrow{\text{Id}_k} & k \end{array}$$

□

不动子域 设 E/k 为有限维域扩张, $H \leq \text{Aut}(E/k)$ 为子群. 定义 H -不动子域为

$$E^H := \{z \in E : \sigma(z) = z, \forall \sigma \in H\}.$$

此时有域扩张塔 $k \subset E^H \subset E$.

中间域 考虑域扩张塔 $k \subset K \subset E$. 此时对中间域 K 有

$$\text{Aut}(E/K) = \{\sigma \in \text{Aut}(E) : \sigma|_K = \text{Id}_K\} \leq \text{Aut}(E/k)$$

为子群.

3.4 有限域

有限域的概念 设 E 为有限域. 由推论 2.2.24, $\text{char}(R) = p$ (p 为素数). 再由注记 2.2.25, 存在域嵌入 $\mathbb{F}_p \hookrightarrow E$. 由练习 2.4.39, 可视 E 为 \mathbb{F}_p -线性空间. 设 $n = \dim_{\mathbb{F}_p} E$, 则有线性同构 $E \simeq \mathbb{F}_p \times \cdots \times \mathbb{F}_p$. 于是 $|E| = p^n$.

定义 3.4.1 设有限域 E 特征为 p . 定义 E 上的 Frobenius 自同构为

$$\begin{aligned} \sigma : E &\xrightarrow{\sim} E \\ a &\longmapsto a^p. \end{aligned}$$

注记 3.4.2 考虑域扩张 E/\mathbb{F}_p , 由于 $\sigma \in \text{Aut}(E)$, $\sigma|_{\mathbb{F}_p} = \text{Id}_{\mathbb{F}_p}$. 因此对任意 $\bar{m} \in \mathbb{F}_p$, $\sigma(\bar{m}) = \bar{m}^p = \bar{m}$. 这便是 Fermat 小定理.

例 3.4.3 考虑域扩张 $\mathbb{F}_4/\mathbb{F}_2$, 则 $\sigma|_{\mathbb{F}_2} = \text{Id}_{\mathbb{F}_2}$, $\sigma(u) = u^2 = u + \bar{1}$, $\sigma(u + \bar{1}) = u^2 + \bar{1} = u$. 因此 $\sigma^2 = \text{Id}_{\mathbb{F}_4}$. 而 $|\text{Aut}(\mathbb{F}_4/\mathbb{F}_2)| \leq [\mathbb{F}_4 : \mathbb{F}_2] = 2$, 因此 $\text{Aut}(\mathbb{F}_4/\mathbb{F}_2) = \{\text{Id}_{\mathbb{F}_4}, \sigma\}$.

例 3.4.4 有理函数域 $\mathbb{F}_p(t)$ 的 Frobenius 自同态 $\sigma(x) = x^p$ 不是满射. 例如, 假设 $t \in \text{Im } \sigma$, 则存在 $f(t), g(t) \in \mathbb{F}_p[t]$, 使得 $\left(\frac{f(t)}{g(t)}\right)^p = t$. 两边取次数即 $p \cdot [\deg(f) - \deg(g)] = 1$, 但这不可能. 故 $t \notin \text{Im } \sigma$.

设 $|E| = p^n$, 则 $E^\times = E \setminus \{0_E\}$ 满足 $|E^\times| = p^n - 1$. 我们有定理 4.1.18 的特殊情形:

引理 3.4.5 对任意 $a \in E^\times$ 均有 $a^{p^n-1} = 1_E$. 故任意 $a \in E$ 均为 $x^{p^n} - x$ 的根.

证明 固定 $a \in E^\times$, 考虑无穷序列

$$1_E, a, a^2, \dots \in E.$$

由 E 是有限域, 必存在 $i < j$ 使得 $a^i = a^j$. 于是 $a^{j-i} = 1_E$. 取最小的 $d \geq 1$ 使得 $a^d = 1_E$. 由于 $H = \{1_E, a, \dots, a^{d-1}\} \leq E^\times$ 是子群, 由定理 4.1.18, $|H| \mid (p^n - 1)$ 即 $d \mid (p^n - 1)$. 故 $a^{p^n-1} = 1_E$. \square

定理 3.4.6 对任意正整数 n 与素数 p , 唯一存在 p^n 阶有限域, 通常记为 \mathbb{F}_{p^n} .

证明 (至多唯一性) 设存在有限域 E 满足 $|E| = p^n$. 由引理 3.4.5, E/\mathbb{F}_p 是 $x^{p^n} - x \in \mathbb{F}_p[x]$ 的分裂域, 它在域扩张同构的意义下唯一.

(存在性) 设 K/\mathbb{F}_p 为 $x^{p^n-1} - x \in \mathbb{F}_p[x]$ 的分裂域. 由 K/\mathbb{F}_p 是有限生成的代数扩张知 $[K : \mathbb{F}_p] < \infty$, 因此 K 为有限域. 取 $E = \text{Root}_K(x^{p^n} - x)$. 考虑 K 上的 Frobenius 自同构 σ , 对任意 $a, b \in E$, 有

$$(a \pm b)^{p^n} = \sigma^n(a \pm b) = \sigma^n(a) \pm \sigma^n(b) = a \pm b, \quad (ab)^{p^n} = a^{p^n} b^{p^n} = ab,$$

因此 E 为 K 的子域. 由 K 的定义即得 $E = K$. 只需说明 $|E| = p^n$ 即 $x^{p^n} - x \in \mathbb{F}_p[x]$ 无重根. 这来自

$$\gcd_{\mathbb{F}_p[x]}(x^{p^n} - x, (x^{p^n} - x)') = \gcd_{\mathbb{F}_p[x]}(x^{p^n} - x, -1) = 1. \quad \square$$

注记 3.4.7 特别地, 我们有 $\mathbb{F}_{p^n}[x]$ 中的等式

$$x^{p^n} - x = \prod_{a \in \mathbb{F}_{p^n}} (x - a).$$

当 $n = 1$ 时, 就得到 $\mathbb{F}_p[x]$ 中的等式

$$x^p - x = x(x - 1) \cdots (x - \overline{p-1}),$$

两边约去 x 即

$$x^{p-1} - 1 = (x - 1) \cdots (x - \overline{p-1}).$$

令 $x = \bar{0}$ 便是初等数论中的 Wilson 定理:

$$(p-1)! \equiv -1 \pmod{p}.$$

命题 3.4.8 对素数 p 与正整数 n , 在 $\mathbb{F}_p[x]$ 中有分解

$$x^{p^n} - x = \prod_{d|n} \prod_{\substack{d \text{ 次首一不可约} \\ \text{多项式 } f(x) \in \mathbb{F}_p[x]}} f(x).$$

证明 取定 E 满足 $|E| = p^n$. 任取 $x^{p^n} - x$ 的不可约因子 $f(x) \in \mathbb{F}_p[x]$, 则 $f(x)$ 在 E 上完全分裂, 因此可取 $a \in E$ 使得 $f(a) = \bar{0}$. 考虑域扩张塔

$$\mathbb{F}_p \subset \mathbb{F}_p(a) \subset E.$$

由于 $[\mathbb{F}_p(a) : \mathbb{F}_p] = \deg(f(x))$, $[E : \mathbb{F}_p] = n$, 由定理 3.2.4, $\deg(f(x)) \mid n$. 又 $x^{p^n} - x$ 无重根 (见定理 3.4.6 证明), 故 $f(x)$ 在分解式中仅出现一次. 反过来, 设 $g(x) \in \mathbb{F}_p[x]$ 为 d 次首一不可约多项式, $d \mid n$. 考虑 Kronecker 添根构造 $K = \mathbb{F}_p[x]/(g(x))$, 记 $u = \bar{x}$. 则 $K = \mathbb{F}_p(u)$, $[K : \mathbb{F}_p] = d$, 因此 $|K| = p^d$. 由引理 3.4.5, $u^{p^d} - u = \bar{0}$. 又 $g(x)$ 是 u 的最小多项式, 因此 $g(x) \mid (x^{p^d} - x)$. 而 $(x^{p^d} - x) \mid (x^{p^n} - x)$, 故 $g(x) \mid (x^{p^n} - x)$. \square

$(x^{p^d} - x) \mid (x^{p^n} - x)$ 的证明 $\gcd(a^m - 1, a^n - 1) = a^{\gcd(m,n)} - 1, \forall a, m, n \in \mathbb{Z}_+$.

例 3.4.9 在命题 3.4.8 中, 取 $p = 2$ 可得 $\mathbb{F}_2[x]$ 中分解

$$\begin{aligned} x^4 - x &= x(x+1)(x^2+x+1), \\ x^8 - x &= x(x+1)(x^3+x^2+1)(x^3+x+1), \\ x^{16} - x &= x(x+1)(x^2+x+1)(x^4+x^3+x^2+x+1)(x^4+x^3+1)(x^4+x+1). \end{aligned}$$

取 $p = 3$ 可得 $\mathbb{F}_3[x]$ 中分解

$$x^9 - x = x(x+1)(x-1)(x^2+1)(x^2+x-1)(x^2-x-1).$$

命题 3.4.10 取定 p^n 元域 E .

(1) 设 K 为 E 的子域, 则 $|K| = p^d$, 其中 $d \mid n$.

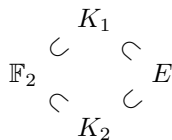
(2) 设 $d \mid n$, 则存在唯一的子域 $K \subset E$ 满足 $|K| = p^d$.

证明 (1) 考虑域扩张塔 $\mathbb{F}_p \subset K \subset E$, 由定理 3.2.4 得 $[K : \mathbb{F}_p] \mid [E : \mathbb{F}_p]$.

(2) **(至多唯一性)** 假设 $K \subset E$ 满足 $|K| = p^d$, 由引理 3.4.5, $K \subset \text{Root}_E(x^{p^d} - x)$. 但 $x^{p^d} - x$ 无重根 (见定理 3.4.6 证明), $|\text{Root}_E(x^{p^d} - x)| = p^d = |K|$, 因此 $K = \text{Root}_E(x^{p^d} - x)$.

(存在性) 只需验证 $\text{Root}_E(x^{p^d} - x) \subset E$ 是 p^d 阶子域. □

例 3.4.11 (\mathbb{F}_{2^6} 的子域格) 取定域 E 使得 $|E| = 2^6$. 由命题 3.4.10, 存在唯一子域 $K_1 \subset E$ 与 $K_2 \subset E$ 满足 $|K_1| = 2^2, |K_2| = 2^3$.



此时, $K_1 = \{a \in E : a^4 = a\}$, $K_2 = \{b \in E : b^8 = b\}$.

练习 3.4.12 设 E, K_1, K_2 如例 3.4.11 所述.

(1) 证明: $K_1 \cap K_2 = \mathbb{F}_2$.

(2) 求 $|\{u \in E : \mathbb{F}_2(u) = E\}|$.

解答 (1) $K_1 \cap K_2 = \{a \in E : a^2 = a\} = \text{Root}_E(x^2 - x) = \mathbb{F}_2$.

(2) 结合 (1) 可知 $|\{u \in E : \mathbb{F}_2(u) = E\}| = |E \setminus (K_1 \cup K_2)| = 64 - (4 + 8 - 2) = 54$. □

从例 3.4.11 可提取出如下结论: 设 n 有素因数分解 $n = q_1^{r_1} \cdots q_t^{r_t}$ ($r_i \geq 1$), 则 E 的极大真子域 K_i 阶为 $p^{\frac{n}{q_i}}$. 此时, 从练习 3.4.12 (2) 出发, 我们还有

命题 3.4.13 E 的全体极大真子域的并集 $\bigcup_{i=1}^t K_i \neq E$. 故存在 $u \in E$ 使得 $E = \mathbb{F}_p(u)$.

证明 只需作简单的估计:

$$\left| \bigcup_{i=1}^t K_i \right| \leq \sum_{i=1}^t p^{\frac{n}{q_i}} \leq t \cdot p^{\frac{n}{2}} < \frac{n}{2} \cdot p^{\frac{n}{2}} \leq p^n.$$

□

从命题 3.4.13 可知 E/\mathbb{F}_p 为单扩张. 于是 $E \setminus (K_1 \cup \cdots \cup K_t)$ 中任一元素关于 \mathbb{F}_p 的最小多项式次数为 $[E : \mathbb{F}_p] = n$. 故我们得到

推论 3.4.14 对任意正整数 n , $\mathbb{F}_p[x]$ 中总有 n 次不可约多项式.

命题 3.4.15 取定 n 次首一不可约多项式 $f(x) \in \mathbb{F}_p[x]$. 设 $u \in \text{Root}_E(f(x))$, 则

$$f(x) = \prod_{i=0}^{n-1} (x - \sigma^i(u)).$$

证明 由 $u \in \text{Root}_E(f(x))$ 可知 $[\mathbb{F}_p(u) : \mathbb{F}_p] = \deg(f(x)) = n$, 因此 $\mathbb{F}_p(u) = E$.

(1) 先证明 $\sigma^i(u) \neq u, \forall 1 \leq i \leq n-1$. 假设存在 $i \leq n-1$ 使得 $\sigma^i(u) = u$. 记

$$d = \gcd(i, n) = mi + rn, \quad m, r \in \mathbb{Z}.$$

由 $u \in E$ 即知 $\sigma^n(u) = u$. 于是

$$\sigma^d(u) = (\sigma^i)^m \circ (\sigma^n)^r(u) = (\sigma^i)^m(u) = u.$$

若 $d < n$, 则 $u \in \mathbb{F}_{p^d} \subsetneq E, \mathbb{F}_p(u) \subsetneq E$, 矛盾. 故 $d = n$, 但这与 $i \leq n-1$ 矛盾.

(2) 由 (1) 可知 $\sigma^i(u) \neq \sigma^j(u), 0 \leq i < j \leq n-1$. 否则两边作用 σ^{-i} 即得矛盾.

(3) 由于 $\sigma \in \text{Aut}(E), u, \sigma(u), \dots, \sigma^{n-1}(u) \in \text{Root}_E(f(x))$ 且两两不同. □

注记 3.4.16 E/\mathbb{F}_p 是 \mathbb{F}_p 上可分多项式 $f(x)$ 的分裂域.

例 3.4.17 对任意 $w \in \mathbb{F}_9 \setminus \mathbb{F}_3, w$ 与 $\sigma(w) = w^3$ 有相同的最小多项式, 为

$$(x - w)(x - \sigma(w)) \in \mathbb{F}_3[x].$$

证明 由 Fermat 小定理, $\sigma|_{\mathbb{F}_3} = \text{Id}_{\mathbb{F}_3}$. 视 \mathbb{F}_9 为 \mathbb{F}_3 -线性空间, 则

$$g(w) = \bar{0} \iff \sigma(g(w)) = \bar{0} \iff g(\sigma(w)) = \bar{0}.$$

又 $[\mathbb{F}_9 : \mathbb{F}_3] = 2, w$ 的最小多项式次数为 2, $\sigma(w) \neq w$, 因此 w (与 $\sigma(w)$) 关于 \mathbb{F}_3 的最小多项式为 $(x - w)(x - \sigma(w)) \in \mathbb{F}_3[x]$. □

注记 3.4.18 由此可知 $\mathbb{F}_3[x]$ 中共有 3 个 2 次首一不可约多项式.

定理 3.4.19 设域 E 满足 $|E| = p^n$, 则 $\text{Aut}(E) = \{\text{Id}_E, \sigma, \dots, \sigma^{n-1}\}$.

证明 取定 u 使 $\mathbb{F}_p(u) = E$, 设 u 关于 \mathbb{F}_p 的最小多项式为 $f(x)$. 由命题 3.4.15 证明知 $\text{Id}_E, \sigma, \dots, \sigma^{n-1} \in \text{Aut}(E)$ 两两不同, 且 $u, \sigma(u), \dots, \sigma^{n-1}(u) \in \text{Root}_E(f(x))$. 任取 $\delta \in \text{Aut}(E)$, 则 $\delta(u) \in \text{Root}_E(f(x))$. 因此存在 $0 \leq i \leq n-1$, 使得 $\delta(u) = \sigma^i(u)$. 又 E 的任一自同构限制在 \mathbb{F}_p 上均为恒等映射, 由 E 为 \mathbb{F}_p -线性空间即知 $\delta = \sigma^i$. □

注记 3.4.20 $\text{Aut}(E)$ 为循环群. 对任意 $d \mid n$,

$$H_d = \{\text{Id}_E, \sigma^d, \sigma^{2d}, \dots, \sigma^{n-d}\} \leq \text{Aut}(E)$$

为子群, 且 $\text{Aut}(E)$ 的任意子群均形如此.

由命题 3.4.10 与注记 3.4.20, E 的子域与 $\text{Aut}(E)$ 的子群均一一对应于 n 的 (正) 因子. 故我们得到

定理 3.4.21 (有限域的 Galois 对应) 设 E 为有限域, $|E| = p^n$. 存在格的反同构

$$\begin{aligned} \{H \leq \text{Aut}(E) \text{ 子群}\} &\xleftarrow{1:1} \{K \subset E \text{ 子域}\} \\ H_d &\longmapsto \begin{aligned} &K_d = \{a \in E : \sigma^d(a) = a\} \\ &= \{a \in E : \delta(a) = a, \forall \delta \in H_d\} \\ &= \text{Root}_E(x^{p^d} - x) \end{aligned} \\ \text{Aut}(E/K_d) &= \{\delta \in E : \delta|_{K_d} = \text{Id}_{K_d}\} \longleftarrow K_d. \end{aligned}$$

注记 3.4.22 (1) K_d 是由 σ^d 生成的子群 H_d 的不动子域.

(2) 由注记 3.4.16, E/K_d 也是 K_d 上可分多项式 $f(x) = x^{p^n} - x$ 的分裂域. 由定理 3.3.13 续, $|\text{Aut}(E/K_d)| = [E : K_d]$. 这与 $|\text{Aut}(E/K_d)| = |H_d| = \frac{n}{d}$ 而 $[E : K_d] = \frac{n}{d}$ 相符.

(3) Galois 对应反保持偏序关系 (格结构).

3.5 分圆域

定义 3.5.1 称元素 $w \in k$ 为 n 次单位根, 若满足 $w^n = 1_k$. 定义单位根 w 的阶 $\text{ord}(w)$ 为最小的正整数 d 使得 $w^d = 1_k$. 此时, 称 w 为 d 次本原单位根.

引理 3.5.2 设单位根 $w \in k$ 满足 $\text{ord}(w) = d$, 则 $w^n = 1_k \iff d \mid n$.

引理 3.5.3 设 $\text{char}(k) = p > 0$, 单位根 $w \in k$ 满足 $\text{ord}(w) = d$, 则 $p \nmid d$.

证明 用反证法, 假设 $d = pd_1$, 则

$$0_k = w^d - 1_k = (w^{d_1})^p - 1_k^p = (w^{d_1} - 1_k)^p \implies w^{d_1} = 1_k.$$

这与 d 的最小性矛盾. □

例 3.5.4 设有限域 E 满足 $|E| = p^n$. 任意 $w \in E^\times$ 均满足 $w^{p^n-1} = 1_E$, 故 $\text{ord}(w) \mid (p^n - 1)$.

若 $w \in k$ 为 d 次本原单位根, 则 $\{1, w, \dots, w^{d-1}\} = \text{Root}_k(x^d - 1)$ 为 k^\times 的 d 阶子群. 事实上, 这是唯一可能的 d 阶子群:

定理 3.5.5 设 k 为域, 且 $H \leq k^\times$ 为 d 阶子群, 则存在 d 阶本原单位根 w , 且 $H = \{1, w, \dots, w^{d-1}\}$. 特别地, 这样的 H 唯一.

例 3.5.6 设有限域 E 满足 $|E| = p^n$, 则 E^\times 为 $p^n - 1$ 阶群. 由定理 3.5.5, 存在 $p^n - 1$ 次本原单位根 $u \in E$, 使得 $E^\times = \{1, u, \dots, u^{p^n-2}\}$. 于是 $E = \mathbb{F}_p(u)$.

例 3.5.7 考虑九元域 $E = \mathbb{F}_3[x]/(x^2 + \bar{1})$, 记 $u = \bar{x}$. 在 E^\times 中, 由于 $\text{ord}(u + \bar{1}) \mid 8$, 而 $(u + \bar{1})^2 = \bar{2}u$, $(u + \bar{1})^4 = \bar{2}$, 因此 $\text{ord}(u + \bar{1}) = 8$, $u + \bar{1}$ 是 E^\times 的生成元.

复单位根 设 $n \geq 2$, 考虑 $\zeta = \zeta_n = e^{\frac{2\pi i}{n}}$, 则 $\text{Root}_{\mathbb{C}}(x^n - 1) = \{1, \zeta, \dots, \zeta^{n-1}\}$,

$$x^n - 1 = (x - 1)(x - \zeta) \cdots (x - \zeta^{n-1}).$$

由定理 3.5.5, $\{1, \zeta, \dots, \zeta^{n-1}\}$ 是 \mathbb{C}^\times 的 (唯一) n 阶子群.

练习 3.5.8 设 ζ 是 n 次本原单位根, m 为正整数, 则 $\text{ord}(\zeta^m) = \frac{n}{\gcd(m, n)}$.

引理 3.5.9 复 n 次本原单位根的全体恰为 $\{\zeta^d : 1 \leq d < n, \gcd(d, n) = 1\}$, 共有 $\varphi(n)$ 个, 这里 $\varphi(n)$ 为 Euler 函数.

定义 3.5.10 $\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}$ 恰为 $x^n - 1 \in \mathbb{Q}[x]$ 的分裂域, 称为分圆域.

例 3.5.11 $\mathbb{Q}(\zeta_2) = \mathbb{Q}$, $\mathbb{Q}(\zeta_3) = \mathbb{Q}(\omega) = \mathbb{Q}(\sqrt{-3})$, $\mathbb{Q}(\zeta_4) = \mathbb{Q}(i)$, $\mathbb{Q}(\sqrt{5}) \subset \mathbb{Q}(\zeta_5)$.

计算 ζ_5 将 $\zeta = \zeta_5$ 满足的方程 $\zeta^4 + \zeta^3 + \zeta^2 + \zeta + 1 = 0$ 写成

$$(\zeta + \zeta^{-1})^2 + (\zeta + \zeta^{-1}) - 1 = 0.$$

由此可得 $2 \cos \frac{2\pi}{5} = \zeta_5 + \zeta_5^{-1} = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$, 进而 $\zeta_5 = \frac{\sqrt{5}-1}{4} + \sqrt{\frac{5+\sqrt{5}}{8}}i$. 由于 $\zeta_5, \zeta_5^{-1} \in \mathbb{Q}(\zeta_5)$, 而 $\zeta_5 + \zeta_5^{-1} = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$, 因此 $\mathbb{Q}(\sqrt{5}) \subset \mathbb{Q}(\zeta_5)$.

定义 3.5.12 对 $n \geq 2$, n 级分圆多项式

$$\Phi_n(x) = \prod_{\text{ord}(w)=n} (x-w) = \prod_{\substack{1 \leq m < n \\ \gcd(m,n)=1}} (x-\zeta^m).$$

注记 3.5.13 补充定义 $\Phi_1(x) = x-1$. 我们有 $\deg \Phi_n(x) = \varphi(n)$.

引理 3.5.14 $x^n - 1 = \prod_{d|n} \Phi_d(x)$.

证明 由练习 3.5.8, 对于 $1 \leq m \leq n$ 与 $d | n$,

$$\text{ord}(\zeta^m) = d \iff \gcd(m, n) = \frac{n}{d} \iff m = \frac{n}{d} \cdot k \text{ 且 } \gcd(k, d) = 1.$$

因此 n 次单位根中阶为 d 的元素为

$$S_d = \{\zeta^{\frac{n}{d}k} : 1 \leq k \leq d, \gcd(k, d) = 1\}.$$

利用 n 次单位根之集的划分

$$\{1, \zeta, \dots, \zeta^{n-1}\} = \bigsqcup_{d|n} S_d$$

即得

$$x^n - 1 = (x-1)(x-\zeta) \cdots (x-\zeta^{n-1}) = \prod_{d|n} \prod_{w \in S_d} (x-w) = \prod_{d|n} \Phi_d(x).$$

□

注记 3.5.15 由 $\{1, \zeta, \dots, \zeta^{n-1}\} = \bigsqcup_{d|n} S_d$ 可得 $n = \sum_{d|n} \varphi(d)$.

例 3.5.16 设 p 为素数, 则 $\Phi_p(x) = \frac{x^p - 1}{x - 1} = x^{p-1} + \cdots + x + 1$.

定理 3.5.17 对任意正整数 n , $\Phi_n(x) \in \mathbb{Z}[x]$.

证明 用归纳法, 当 $n=1$ 时, $\Phi_1(x) = x-1 \in \mathbb{Z}[x]$. 假设对所有正整数 $d < n$, 均有 $\Phi_d(x) \in \mathbb{Z}[x]$. 令

$$g(x) = \prod_{\substack{d|n \\ 1 \leq d < n}} \Phi_d(x),$$

则 $g(x) \in \mathbb{Z}[x]$. 由引理 3.5.14,

$$x^n - 1 = g(x)\Phi_n(x).$$

由于 $g(x)$ 首一, 由带余除法, 存在 $q(x), r(x) \in \mathbb{Z}[x]$ 使得

$$x^n - 1 = q(x)g(x) + r(x),$$

其中 $r(x) = 0$ 或 $\deg(r(x)) < \deg(g(x))$. 将以上两式看作 $\mathbb{C}[x]$ 中带余除法, 由定理 2.4.18 即知 $r(x) = 0$ 且 $q(x) = \Phi_n(x)$. 故 $\Phi_n(x) \in \mathbb{Z}[x]$. \square

练习 3.5.18 设域 F 为 p^n 元域, p 为素数, $f(x) \in F[x]$ 为首一不可约多项式. 求证:

- (1) $f(x)$ 有重根 \iff 存在 $g(x) \in F[x]$, 使得 $f(x) = g(x^p)$.
- (2) 如果 $f(x) = g(x^{p^n})$, 其中 $g(x) \in F[x]$, 但不存在 $\bar{g}(x) \in F[x]$ 使得 $f(x) = \bar{g}(x^{p^{n+1}})$, 则 $p^n \mid m = \deg(f(x))$, 并且 $f(x)$ 共有 $\frac{m}{p^n}$ 个不同的根, 每个根的重数均为 p^n .

证明 (1) 设 $f(x) = x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a_0$, 则

$$\begin{aligned} f(x) \text{ 有重根} &\xleftrightarrow{\text{引理 3.3.23}} \gcd(f(x), f'(x)) \neq 1 \xleftrightarrow[\deg(f'(x)) < \deg(f(x))]{f(x) \text{ 首一不可约}} f'(x) = 0 \\ &\iff ma_m = 0, 0 \leq m \leq n \iff \text{若 } p \nmid m \text{ 则 } a_m = 0. \end{aligned}$$

- (2) 由 $f(x)$ 首一不可约且 $f(x) = g(x^{p^{n+1}})$ 知 $g(x)$ 亦为首一不可约多项式. 由条件, 不存在 $h(x) \in F[x]$ 使得 $g(x) = h(x^p)$. 由 (1), 这等价于 $g(x)$ 无重根. 设

$$g(x) = \prod_{i=1}^{\frac{m}{p^n}} (x - u_i),$$

其中 u_i 互异. 取 v_i 使得 $v_i^{p^n} = u_i$, 则 v_i 互异, 且

$$f(x) = g(x^{p^{n+1}}) = \prod_{i=1}^{\frac{m}{p^n}} (x^{p^n} - v_i^{p^n}) = \prod_{i=1}^{\frac{m}{p^n}} [\sigma^n(x) - \sigma^n(v_i)] = \prod_{i=1}^{\frac{m}{p^n}} (x - v_i)^{p^n}. \quad \square$$

由例 3.5.16 与例 2.7.47, 对于素数 p , $\Phi_p(x) \in \mathbb{Z}[x]$ 不可约. 更一般地, 我们有

定理 3.5.19 $\Phi_n(x) \in \mathbb{Z}[x]$ 不可约 (由命题 2.7.34, $\Phi_n(x) \in \mathbb{Q}[x]$ 也不可约), 它是任意 n 次本原单位根的最小多项式.

证明 取定 n 次本原单位根 ζ_n 及其 (首一) 最小多项式 $P \in \mathbb{Q}[x]$, 则 $P \mid \Phi_n$. 如能证明每个 n 次单位根 ζ 都是 P 的根, 则 $\deg P = \varphi(n) = \deg \Phi_n$, 从而 $\Phi_n = P$ 不可约. 为此只需证对 ζ 如上及满足 $p \nmid n$ 的素数 p , 皆有 $P(\zeta) = 0 \implies P(\zeta^p) = 0$; 因为对任意满足 $\gcd(k, n) = 1$ 及 $1 < k < n$ 的正整数 k , 可由素因数分解 $k = p_1 \cdots p_s$ ($p_i \nmid n$) 得到 $P(\zeta) = 0 \implies P(\zeta^{p_1}) = 0 \implies P(\zeta^{p_1 p_2}) = 0 \implies \cdots \implies P(\zeta^{p_1 \cdots p_s}) = 0$.

注意到 $\Phi_n(\zeta^p) = 0$, 并且在 $\mathbb{Q}[x]$ 中有分解 $\Phi_n = PQ$, 其中 Q 首一, 而由注记 2.7.31 即得 $P, Q \in \mathbb{Z}[x]$. 假设 $P(\zeta) = 0$ 而 $P(\zeta^p) \neq 0$, 则 $Q(\zeta^p) = 0$. 此时 $P(x)$ 与 $Q(x^p)$ 有公共根 ζ , 因此 $P(x)$ 与 $Q(x^p)$ 在 $\mathbb{C}[x]$ 中不互素, 由于 $\mathbb{Q}[x]$ 中最大公因子不随域 \mathbb{Q} 的扩张而改变, 它们在 $\mathbb{Q}[x]$ 中也不互素. 又 $P(x)$ 在 \mathbb{Q} 上不可约, 因此在 $\mathbb{Q}[x]$ 中 $P(x) \mid Q(x^p)$, 即存在 $R(x) \in \mathbb{Q}[x]$ 使得 $Q(x^p) = P(x)R(x)$. 再次运用注记 2.7.31 即知 $R(x) \in \mathbb{Z}[x]$. 考虑多项式的模 p 约化 $\pi: \mathbb{Z}[x] \rightarrow \mathbb{F}_p[x]$. 由 Fermat 小定理, 设 $Q(x) = b_mx^m + b_{m-1}x^{m-1} + \cdots + b_1x + b_0$, 则

$$\begin{aligned} \pi(Q(x^p)) &= \overline{b_m}x^{pm} + \overline{b_{m-1}}x^{p(m-1)} + \cdots + \overline{b_1}x^p + \overline{b_0} \\ &= (\overline{b_m}x^m)^p + (\overline{b_{m-1}}x^{m-1})^p + \cdots + (\overline{b_1}x)^p + (\overline{b_0})^p \\ &= (\overline{b_m}x^m + \overline{b_{m-1}}x^{m-1} + \cdots + \overline{b_1}x + \overline{b_0})^p = \pi(Q(x))^p. \end{aligned}$$

于是由 $Q(x^p) = P(x)R(x)$ 可得

$$\pi(Q)^p = \pi(P)\pi(R).$$

由于 $\mathbb{F}_p[x]$ 是 UFD, $\pi(P)$ 在 $\mathbb{F}_p[x]$ 中任一不可约因子必整除 $\pi(Q)$, 从而 $\pi(P)$ 与 $\pi(Q)$ 不互素. 而 $\pi(\Phi_n) = \pi(P)\pi(Q)$, $\Phi_n(x) \mid (x^n - 1)$, 故 $\pi(x^n - 1) = x^n - \bar{1} \in \mathbb{F}_p[x]$ 有重根. 但由 $p \nmid n$ 知 $(x^n - \bar{1})' = nx^{n-1} \in \mathbb{F}_p[x]$ 非零, $\gcd(x^n - \bar{1}, nx^{n-1}) = \bar{1}$, 由引理 3.3.23 知 $x^n - \bar{1} \in \mathbb{F}_p[x]$ 无重根, 矛盾. \square

推论 3.5.20 分圆域 $\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}$ 的维数 $[\mathbb{Q}(\zeta_n) : \mathbb{Q}] = \varphi(n)$.

由于 $\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q}$ 是可分多项式 $x^n - 1 \in \mathbb{Q}[x]$ 的分裂域, 由定理 3.3.13 续,

$$|\text{Aut}(\mathbb{Q}(\zeta_n))| = |\text{Aut}(\mathbb{Q}(\zeta_n)/\mathbb{Q})| = [\mathbb{Q}(\zeta_n) : \mathbb{Q}] = \varphi(n).$$

注意到域的自同构保持代数元的最小多项式, 因此对任意 $\sigma \in \text{Aut}(\mathbb{Q}(\zeta_n))$, $\sigma(\zeta_n)$ 仍为 n 次本原单位根, 记 $\sigma(\zeta_n) = \zeta_n^k$, 其中 $1 \leq k \leq n$ 且 $\gcd(k, n) = 1$.

定理 3.5.21 存在群同构

$$\text{Aut}(\mathbb{Q}(\zeta_n)) \xrightarrow{\sim} U(\mathbb{Z}_n), \quad \sigma \mapsto \bar{k},$$

其中 σ 满足 $\sigma(\zeta_n) = \zeta_n^k$.

注记 3.5.22 在此群同构下, 复共轭 $\sigma(z) = \bar{z}$ 的像为 $-\bar{1}$.

练习 3.5.23 $\mathbb{Q}(\zeta_n) \cap \mathbb{R} = \mathbb{Q}(\cos \frac{2\pi}{n})$. 这便是 $\mathbb{Q}(\zeta_n)$ 的不动子域 $\mathbb{Q}(\zeta_n)^{\{\text{Id}, \sigma\}}$, 其中 σ 为复共轭.

提示 利用第一类 Chebyshev 多项式证明 $\text{LHS} \subset \text{RHS}$, 注意 $\mathbb{Q}(\zeta_n) = \mathbb{Q}[\zeta_n]$.

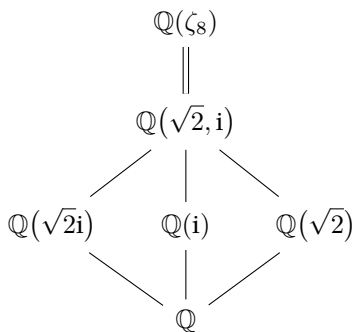
例 3.5.24 由定理 3.5.21, $\text{Aut}(\mathbb{Q}(\zeta_8)) \simeq U(\mathbb{Z}_8) = \{\bar{1}, \bar{3}, \bar{5}, \bar{7}\}$, 元素间的对应关系为

$$\bar{1} \leftrightarrow (\zeta_8 \mapsto \zeta_8), \quad \bar{3} \leftrightarrow (\zeta_8 \mapsto \zeta_8^3), \quad \bar{5} \leftrightarrow (\zeta_8 \mapsto \zeta_8^5), \quad \bar{7} \leftrightarrow (\zeta_8 \mapsto \zeta_8^7).$$

易知 $\mathbb{Q}(\zeta_8) = \mathbb{Q}(\sqrt{2}, i)$. 利用 $\zeta_8 + \zeta_8^7 = \sqrt{2}$ 与 $\zeta_8^2 = i$, 经计算可将上述 $\text{Aut}(\mathbb{Q}(\zeta_8))$ 元素重新表述为

$$\boxed{\text{Id} : \sqrt{2} \mapsto \sqrt{2}, i \mapsto i} \quad \boxed{\sigma : \sqrt{2} \mapsto -\sqrt{2}, i \mapsto -i} \quad \boxed{\delta : \sqrt{2} \mapsto -\sqrt{2}, i \mapsto i} \quad \boxed{\tau : \sqrt{2} \mapsto \sqrt{2}, i \mapsto -i}$$

由定理 4.1.18, 四阶群 $\text{Aut}(\mathbb{Q}(\zeta_8)) = \{\text{Id}, \sigma, \delta, \tau\}$ 的非平凡子群只能为二阶群, 而由上述可见 σ, δ, τ 均为二阶元, 故所有二阶子群为 $\{\text{Id}, \sigma\}, \{\text{Id}, \delta\}, \{\text{Id}, \tau\}$. 再考虑余下两个平凡子群, 由 Galois 对应及下面的练习 3.5.25 结果可得 $\mathbb{Q}(\zeta_8)$ 的所有子域为 $\mathbb{Q}(\zeta_8), \mathbb{Q}(\sqrt{2}i), \mathbb{Q}(i), \mathbb{Q}(\sqrt{2}), \mathbb{Q}$.



练习 3.5.25 例 3.5.24 中 $\{\text{Id}, \sigma\}, \{\text{Id}, \delta\}, \{\text{Id}, \tau\}$ 对应的 $\mathbb{Q}(\zeta_8)$ 的不动子域分别为 $\mathbb{Q}(\sqrt{2}i), \mathbb{Q}(i), \mathbb{Q}(\sqrt{2})$.

提示 $\mathbb{Q}(\zeta_8)$ 的一组 \mathbb{Q} -基为 $\{1, \sqrt{2}, i, \sqrt{2}i\}$.

第四章

群论

4.1 群的定义

定义 4.1.1 二元组 (G, \cdot) 称为群, 其中 G 为非空集合, 乘法 \cdot 为二元运算

$$G \times G \rightarrow G, \quad (a, b) \mapsto a \cdot b$$

满足如下三条公理:

(G1) 结合律: $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c), \forall a, b, c \in G$.

(G2) 有幺元: 存在 $1_G \in G$, 使得 $1_G \cdot a = a = a \cdot 1_G, \forall a \in G$.

(G3) 有逆元: 对任意 $a \in G$, 存在 $b \in G$, 使得 $a \cdot b = 1_G = b \cdot a$, 记 $b = a^{-1}$.

有时简记 (G, \cdot) 为 G , 乘法运算 $a \cdot b = ab$.

注记 4.1.2 满足 **(G1)** 和 **(G2)** 的称为含幺半群.

练习 4.1.3 群中幺元和逆元均是唯一的.

定义 4.1.4 若群 G 中运算还满足交换律, 则称 G 为交换群或 Abel 群.

引理 4.1.5 设 G 为群, 则有

(1) 乘法消去律: $ab = ac \implies b = c$.

(2) $ab = 1_G \implies b = a^{-1}$.

(3) $(a^{-1})^{-1} = a$.

(4) $(ab)^{-1} = b^{-1}a^{-1}$.

(5) $a^{n+m} = a^n \cdot a^m, \forall n, m \in \mathbb{Z}$.

定义 4.1.6 非空子集 $H \subset G$ 称为 G 的子群, 若对任意 $a, b \in H$, 均有 $a \cdot b \in H, a^{-1} \in H$, 记作 $H \leq G$. 此时, H 也是群.

注记 4.1.7 每个群 G 均有平凡子群 $\{1_G\}$ 和 G .

例 4.1.8 (一般线性群) $\mathrm{GL}(n, \mathbb{C}) = \{A \in M_n(\mathbb{C}) : \det(A) \neq 0\}$.

例 4.1.9 (特殊线性群) $\mathrm{SL}(n, \mathbb{C}) = \{A \in \mathrm{GL}(n, \mathbb{C}) : \det(A) = 1\}$.

例 4.1.10 (正交群) $\mathrm{O}(n) = \{A \in \mathrm{GL}(n, \mathbb{R}) : AA^T = I_n\}$.

例 4.1.11 (特殊正交群) $\mathrm{SO}(n) = \{A \in \mathrm{O}(n) : \det(A) = 1\}$.

约定 4.1.12 加法群意指 Abel 群 A , 其二元运算记为 $+$, 么元记为 0 , 元素 $a \in A$ 的加法逆元 (负元) 记为 $-a$.

例 4.1.13 给定环 R , 自然有三个群: 加法群 $(R, +)$, 单位群 $(U(R), \cdot)$, 自同构群 $(\mathrm{Aut}(R), \circ)$. 实例如下:

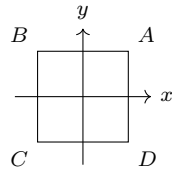
R	\mathbb{Z}	\mathbb{Z}_n	$\mathbb{Z}[i]$
$(R, +)$	$(\mathbb{Z}, +)$	$(\mathbb{Z}_n, +)$	$(\mathbb{Z}[i], +) \simeq (\mathbb{Z}, +) \times (\mathbb{Z}, +)$
$(U(R), \cdot)$	$\{\pm 1\}$	$\{\overline{m} : 1 \leq m \leq n, \gcd(m, n) = 1\}$	$\{\pm 1, \pm i\}$
$(\mathrm{Aut}(\mathbb{Q}), \circ)$	$\{\mathrm{Id}_{\mathbb{Z}}\}$	$\{\mathrm{Id}_{\mathbb{Z}_n}\}$	$\{\mathrm{Id}_{\mathbb{Z}[i]}, \sigma (\text{复共轭})\}$

例 4.1.14 考虑域扩张 K/k , 则 $\mathrm{Aut}(K/k) = \{\sigma \in \mathrm{Aut}(K) : \sigma|_k = \mathrm{Id}_k\} \leq \mathrm{Aut}(K)$.

例 4.1.15 图形 $P \subset \mathbb{R}^n$ 的对称群 $\Sigma(P) = \{g \in \mathrm{O}(n) : g(P) = P\} \leq \mathrm{O}(n)$. 称 $g \in \Sigma(P)$ 为 P 的对称. 如 \mathbb{R}^2 中单位圆周 S^1 的对称群即 $\mathrm{O}(2)$.

练习 4.1.16 写出 \mathbb{R}^2 中以原点为中心的正方形的对称群 (矩阵形式).

提示 四个旋转和四个镜面对称, $|\Sigma(\square)| = 8$.



例 4.1.17 抽象集 X (无附加结构) 上的置换指双射 $\sigma : X \xrightarrow{\sim} X$, X 的对称群 $S(X) = \{X \text{ 上的所有置换}\}$. 如 $\mathrm{Aut}(R) \leq S(R)$, $\mathrm{GL}(n, \mathbb{C})$ 同构于 $S(\mathbb{C}^n)$ 的子群.

定理 4.1.18 (Lagrange 定理) 设 G 为有限群, $H \leq G$, 则 $|H| \mid |G|$.

证明 定义 G 上关系 \approx 为 $a \approx b \iff ab^{-1} \in H$, 容易验证 \approx 是等价关系, 且任意 $a \in H$ 关于 \approx 的等价类为 $Ha = \{ha : h \in H\}$, 称其为 H 的右陪集. 设 $G = \bigsqcup_{i \in I} Ha_i$ 为 G 关于 H 的右陪集分解, 称 $\{a_i\}_{i \in I}$ 为 G 关于 H 的右陪集完全代表元系. 观察到对任意 $a \in G$, $|Ha| = |H|$, 因此 $|G| = |H| \cdot |I|$. \square

注记 4.1.19 $[G : H] := |I|$ 称为 H 在 G 中的指数. 故 Lagrange 定理可表述为 $|G| = |H| \cdot [G : H]$.

练习 4.1.20 设 $H \leq G$. H 的左陪集 $aH = \{ah : h \in H\}$ 是 a 关于等价关系 $a \sim b \iff b^{-1}a \in H$ 的等价类.

练习 4.1.21 设 $H \leq G$. 若 $G = \bigsqcup_{i \in I} Ha_i$, 则 $G = \bigsqcup_{i \in I} a_i^{-1}H$.

例 4.1.22 设 $G = \mathrm{GL}(2, \mathbb{F}_2)$. 考虑 G 的子群 $H = \left\{ \begin{pmatrix} \bar{1} & \bar{0} \\ \bar{0} & \bar{1} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \bar{1} & \bar{1} \\ \bar{0} & \bar{1} \end{pmatrix} \right\}$ 与元素 $a = \begin{pmatrix} \bar{0} & \bar{1} \\ \bar{1} & \bar{0} \end{pmatrix}$, 则 $Ha = \left\{ \begin{pmatrix} \bar{0} & \bar{1} \\ \bar{1} & \bar{0} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \bar{1} & \bar{1} \\ \bar{1} & \bar{0} \end{pmatrix} \right\} \neq \left\{ \begin{pmatrix} \bar{0} & \bar{1} \\ \bar{1} & \bar{0} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \bar{0} & \bar{1} \\ \bar{1} & \bar{1} \end{pmatrix} \right\} = aH$.

定义 4.1.23 元素 $a \in G$ 的阶是指最小的正整数 d 使得 $a^d = 1_G$, 记为 $\text{ord}(a)$. 若不存在这样的 d , 则记 $\text{ord}(a) = \infty$.

注记 4.1.24 若 G 是有限群, 则 G 中任意元素 a 具有有限的阶, 且 $\text{ord}(a) \mid |G|$.

例 4.1.25 设 p 为素数. 由注记 4.1.24, 对任意 $\bar{m} \in \mathbb{F}_p^\times$, 有 $\bar{m}^{p-1} = \bar{1}$. 这即是 Fermat 小定理.

命题 4.1.26 设 G 为群, $a \in G$. 若 $\text{ord}(a) = d < \infty$, 则 $a^n = 1_G$ 当且仅当 $d \mid n$.

定义 4.1.27 设 G, G' 为群. 称映射 $f: G \rightarrow G'$ 为群同态, 若 $f(a \cdot b) = f(a) \cdot f(b), \forall a, b \in G$. 双射的群同态称为群同构.

注记 4.1.28 f 是群同态蕴含了 $f(1_G) = 1_{G'}$ 及 $f(a)^{-1} = f(a^{-1})$.

练习 4.1.29 设 $f: G \rightarrow G'$ 为群同态, $a \in G$, 则 $\text{ord}(f(a)) \mid \text{ord}(a)$. 若 f 是群同构, 则 $\text{ord}(f(a)) = \text{ord}(a)$.

注记 4.1.30 同构的群的阶表必定相同.

例 4.1.31 子群 $H \leq G$ 诱导包含同态 $\text{inc}: H \rightarrow G$.

例 4.1.32 行列式映射 $\det: \text{GL}(n, \mathbb{C}) \rightarrow \mathbb{C}^\times$ 是群的满同态.

例 4.1.33 记 n 阶单位根群 $\mu_n = \{z \in \mathbb{C} : z^n = 1\} \leq \mathbb{C}^\times$, 存在群同构

$$\mu_n \xrightarrow{\sim} (\mathbb{Z}_n, +), \quad e^{\frac{2k\pi}{n}} \mapsto \bar{k}.$$

定义 4.1.34 设 G, H 是两个群, 在 $G \times H = \{(g, h) : g \in G, h \in H\}$ 中定义乘法为

$$(g_1, h_1) \cdot (g_2, h_2) = (g_1 g_2, h_1 h_2).$$

则 $G \times H$ 是一个群, 称为 G 与 H 的直积, 其中 $1_{G \times H} = (1_G, 1_H), (g, h)^{-1} = (g^{-1}, h^{-1})$.

◇ 有自然同态

$$G \hookrightarrow G \times H, \quad g \mapsto (g, 1_H).$$

◇ 有投影同态

$$G \times H \twoheadrightarrow G, \quad (g, h) \mapsto g.$$

$$(g, h) = (g, 1_H) \cdot (1_G, h) = (1_G, h) \cdot (g, 1_H).$$

练习 4.1.35 考虑 $(g, h) \in G \times H$, 若 $\text{ord}(g), \text{ord}(h) < +\infty$, 则 $\text{ord}(g, h) = \text{lcm}(\text{ord}(g), \text{ord}(h))$.

例 4.1.36 Klein 四元群 $V_4 := \mu_2 \times \mu_2 = \{(\pm 1, \pm 1)\}$, 其阶表如下:

	$(1, 1)$	$(1, -1)$	$(-1, 1)$	$(-1, -1)$
阶	1	2	2	2

特别地, V_4 无四阶元, 因此 $V_4 \not\cong \mathbb{Z}_4$. 由命题 4.2.7, V_4 不是循环群. 由推论 4.2.12, V_4 是最小的非 Abel 群.

练习 4.1.37 存在群同构 $V_4 \cong U(\mathbb{Z}_8)$.

定义 4.1.38 设 G 为群, $X \subset G$ 是任意子集, 则包含 X 的最小子群称为由 X 生成的子群, 记为 (X) . 若 $(X) = G$, 则称 X 为 G 的生成元集. 当 X 是独点集 $\{x\}$ 时, 简记 $(\{x\})$ 为 $(x) := \{x^n : n \in \mathbb{Z}\}$.

注记 4.1.39 (X) 中的元素是由 X 的元素出发, 经乘法及求逆运算所能得到的所有元素:

$$(X) = \{1_G\} \cup \{x_1 \cdots x_n : x_i \in X \text{ 或 } x_i^{-1} \in X, n \geq 1\}.$$

练习 4.1.40 证明: $(\mathbb{Q}, +) \not\cong (\mathbb{Q}^\times, \cdot)$.

证明 假设存在群同构 $f: (\mathbb{Q}, +) \xrightarrow{\sim} (\mathbb{Q}^\times, \cdot)$, 取 $a \in \mathbb{Q}$ 使得 $f(a) = 2$, 则 $2 = f(a) = f(\frac{a}{2} + \frac{a}{2}) = f(\frac{a}{2})^2$, 与 $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$ 矛盾. \square

练习 4.1.41 设 A, B 是群 G 的两个子群. 试证: $AB \leq G$ 当且仅当 $AB = BA$.

练习 4.1.42 设 a, b 是群 G 的任意两个元素. 试证: a 和 a^{-1} , ab 和 ba 有相同的阶.

4.2 循环群

定义 4.2.1 群 G 称为循环群, 若存在 $a \in G$ 使 $(a) = G$, 即 $G = \{a^n : n \in \mathbb{Z}\}$. 此时称 a 为 G 的生成元.

注记 4.2.2 循环群是 Abel 群.

练习 4.2.3 设 $G \simeq H$, 则 G 为循环群当且仅当 H 为循环群.

例 4.2.4 $(\mathbb{Z}, +)$ 为循环群, 生成元为 1 或 -1 .

例 4.2.5 $(\mathbb{Z}_n, +)$ 为循环群, $\bar{1}$ 或 $-\bar{1}$ 是生成元.

例 4.2.6 n 阶单位根群 μ_n 为循环群, $e^{\frac{2\pi i}{n}}$ 是生成元.

命题 4.2.7 设 G 为循环群, 则 G 同构于 $(\mathbb{Z}, +)$ 或 $(\mathbb{Z}_n, +)$.

利用命题 4.2.7 的同构可以得到

命题 4.2.8 设 G 为循环群, 生成元为 a .

- (1) 若 $|G| = \infty$, 则 G 恰有两个生成元 a 和 a^{-1} , G 的子群有 $\{1_G\}$ 和 (a^d) , 其中 $d \geq 1$. 每个 (a^d) 均同构于 \mathbb{Z} , 也同构于 G .
- (2) 若 $|G| = n < \infty$, 则 G 恰有 $\varphi(n)$ 个生成元 a^k , 其中 $1 \leq k \leq n, \gcd(k, n) = 1$. 对于每个 $d \mid n$, 存在唯一的子群 $H_d = (a^{\frac{n}{d}})$, 满足 $|H_d| = d$.

提示 对 (2), 利用例 2.2.29 对环 \mathbb{Z}_n 理想的分类结果以及练习 4.2.10. 注意

$$\text{群 } (\mathbb{Z}_n, +) \text{ 的子群} = \text{环 } (\mathbb{Z}_n, +, \cdot) \text{ 的理想}$$

注记 4.2.9 由于 $\varphi(d)$ 恰为 G 中 d 阶元的个数, 我们再次得到 $n = \sum_{d \mid n} \varphi(d)$.

练习 4.2.10 设 G 为群, $a \in G$. 若 $\text{ord}(a) = n < \infty$, 则 $\text{ord}(a^m) = \frac{n}{\gcd(m, n)}$.

命题 4.2.11 n 阶群 G 为循环群当且仅当 G 中存在 n 阶元.

推论 4.2.12 对于素数 p , p 阶群一定为循环群, 进而 $G \simeq (\mathbb{Z}_p, +)$.

证明 设 G 为 p 阶群. 任取 $1_G \neq a \in G$, 则 $\text{ord}(a) > 1$, 但 $\text{ord}(a) \mid |G| = p$, 因此 $\text{ord}(a) = p$. 由命题 4.2.11, G 为循环群. \square

定理 4.2.13 设 G 为群, $|G| = n < \infty$, 则 G 为循环群当且仅当对任意 $d \mid n$, 至多存在一个 d 阶子群.

证明 (\Rightarrow) 这即是命题 4.2.8 (2).

(\Leftarrow) 对任意 $d \mid n$, 记 $S_d = \{g \in G : \text{ord}(g) = d\}$, 由定理 4.1.18,

$$G = \bigsqcup_{d \mid n} S_d.$$

对任意 $g \in S_d$, $\langle g \rangle \leq G$ 为 d 阶循环群, 由条件, $\langle g \rangle$ 不依赖于 $g \in S_d$ 的选取, 记之为 H_d , 则 $S_d \subset H_d$. 因此

$$n = |G| = \sum_{d \mid n} |S_d| \leq \sum_{d \mid n} \#\{H_d \text{ 生成元}\} = \sum_{d \mid n} \varphi(d) = n,$$

这说明 $|S_d| = \varphi(d)$, $\forall d \mid n$. 特别地, $S_n \neq \emptyset$, 由命题 4.2.11, G 为循环群. \square

定理 4.2.14 设 k 为域, $G \leq k^\times$ 为有限子群, 则 G 为循环群.

证明 设 $|G| = n$, 对任意 $d \mid n$, 假设存在 G 的 d 阶子群 H , 下证 H 唯一. 注意到 $H \subset \text{Root}_k(x^d - 1_k)$, 而 $|\text{Root}_k(x^d - 1_k)| \leq d$, 故 $H = \text{Root}_k(x^d - 1)$. 由定理 4.2.13, G 为循环群. \square

运用定理 4.2.14, 我们再次得到命题 3.4.13 的结论:

例 4.2.15 考虑有限域 E/\mathbb{F}_p , 则 E^\times 为循环群, 即存在 $v \in E$ 使得 $E^\times = \langle v \rangle$. 故 $E = \{0\} \cup \{1, v, \dots, v^{|E|-2}\}$, $E = \mathbb{F}_p(v)$ 为单扩张.

利用定理 4.2.14 还可以确定乘法群 \mathbb{C}^\times 的所有有限子群:

例 4.2.16 设 $G \leq \mathbb{C}^\times$ 为有限子群, $|G| = n$, 则 $G = \mu_n$ (n 阶单位根群).

练习 4.2.17 乘法群 \mathbb{C}^\times 不是循环群.

证明 假设 \mathbb{C}^\times 是循环群, 由命题 4.2.7, $\mathbb{C}^\times \simeq \mathbb{Z}$, 从而 \mathbb{C}^\times 中除去 1 外任意元素的阶为 ∞ . 这与 \mathbb{C}^\times 存在有限子群 μ_n 矛盾. \square

例 4.2.18 由定理 4.2.14, $\mathbb{F}_9^\times = (\mathbb{F}_3[x]/(x^2 + 1)) \setminus \{0\}$ 是循环群. 由于 $u = \bar{x}$ 满足 $u^2 = \bar{2}$, $u^3 = \bar{2}u$, $u^4 = \bar{1}$, 因此 $\{\bar{1}, \bar{2}, u, \bar{2}u\}$ 是 \mathbb{F}_9^\times 的 4 阶子群. 又 \mathbb{F}_9^\times 共有 $\varphi(8) = 4$ 个生成元, 故余下的 $u + \bar{1}, u + \bar{2}, \bar{2}u + \bar{1}, \bar{2}u + \bar{2}$ 均为 \mathbb{F}_9^\times 的生成元.

练习 4.2.19 $(\mathbb{Q}, +)$ 不是循环群, 但它的任意有限生成的子群都是循环群.

证明 设 $\frac{m}{n} \in \mathbb{Q}$. 取素数 p 满足 $p \nmid n$, 则 $\frac{1}{p} \notin \left(\frac{m}{n}\right)$. 这表明 $(\mathbb{Q}, +)$ 不是循环群. 欲证 $(\mathbb{Q}, +)$ 的有限生成子群是循环群, 由归纳法只需证由两个元素生成的子群是循环群. 设 $H = \left(\frac{m}{n}, \frac{t}{s}\right)$, 令 $d = \gcd(ms, nt)$. 则由 Bézout 等式, 存在 $\lambda, \mu \in \mathbb{Z}$ 使得 $d = \lambda ms + \mu nt$, 从而 $\frac{d}{ns} = \lambda \cdot \frac{m}{n} + \mu \cdot \frac{t}{s} \in H$. 又

$$\frac{m}{n} = \frac{ms}{ns} \in \left(\frac{d}{ns}\right), \quad \frac{t}{s} = \frac{nt}{ns} \in \left(\frac{d}{ns}\right),$$

故 $H = \left(\frac{d}{ns}\right)$ 为循环群. \square

练习 4.2.20 设 p 为素数, $G = \{x \in \mathbb{C} : \text{存在正整数 } n \text{ 使得 } x^{p^n} = 1\}$, 则 G 对于复数的乘法构成群. 试证 G 的任意真子群都是有限阶的循环群.

证明 设 H 是 G 的真子群, 取 $g \in G \setminus H$. 设 $\text{ord}(g) = p^n$, 则 H 中任一元素的阶为 p^m , $m < n$. 否则, $\mu_{p^m} \leq H$, 而 $g \in \mu_{p^m}$, 与 $g \notin H$ 矛盾. 故可设 h 是 H 中阶最大的元素, 进而 $H = \langle h \rangle$. \square

4.3 正规子群与商群

考虑群同态 $f: G \rightarrow H$, 则 f 的像 $\text{Im}(f) \leq H$ 是子群. 回顾定义 1.1.16, f 诱导 G 上的等价关系:

$$a \sim b \iff f(ab^{-1}) = 1_H \iff f(b^{-1}a) = 1_H.$$

应该注意, 一般而言 $ab^{-1} \neq b^{-1}a$, 但有相似 (共轭) 关系: $ab^{-1} = a(b^{-1}a)a^{-1}$.

定义 4.3.1 定义群同态 $f: G \rightarrow H$ 的核为 $\text{Ker}(f) = \{g \in G : f(g) = 1_H\}$.

注记 4.3.2 $\text{Ker}(f) \leq G$ 为子群.

令 $N = \text{Ker}(f)$, 则 $a \in Nb \iff ab^{-1} \in N \iff b^{-1}a \in N \iff a \in bN$, 即 $Nb = bN, \forall b \in G$.

定义 4.3.3 子群 $N \leq G$ 称为正规子群, 若 $aN = Na, \forall a \in G$, 记为 $N \triangleleft G$.

注记 4.3.4 (1) 设 $f: G \rightarrow H$ 为群同态, 则 $\text{Ker}(f) \triangleleft G$.

(2) 若群 G 为 Abel 群, 则 G 的任意子群均正规.

定义 4.3.5 群 G 的中心定义为 $Z(G) = \{g \in G : gh = hg, \forall h \in G\}$.

练习 4.3.6 设 G 为群, 则 $Z(G) \triangleleft G$.

定义 4.3.7 设 G 为群, $H \leq G, a \in G$. 定义 H 的共轭 $aHa^{-1} = \{aha^{-1} : h \in H\}$.

练习 4.3.8 在定义 4.3.7 中, $aHa^{-1} \leq G$, 且有内自同构 $H \xrightarrow{\sim} aHa^{-1}$.

命题 4.3.9 设 $H \leq G$ 为子群, 则 $H \triangleleft G$ 当且仅当 $H = aHa^{-1}, \forall a \in G$.

例 4.3.10 设 $G = \text{GL}(n, \mathbb{C})$ ($n \geq 2$), H 为 G 中全体上三角方阵构成的集合, 则 $H \leq G$ 但 H 不是正规子群, 因为总可用 G 中方阵将 H 中方阵相似下三角化.

例 4.3.11 由 $\text{SL}(n, \mathbb{C})$ 是 $\det: \text{GL}(n, \mathbb{C}) \rightarrow \mathbb{C}^\times$ 的核知, $\text{SL}(n, \mathbb{C}) \triangleleft \text{GL}(n, \mathbb{C})$.

例 4.3.12 设 $H \leq G$ 为子群. 若 $[G: H] = 2$, 则 $H \triangleleft G$. 提示 $G = G \sqcup (G \setminus H)$.

例 4.3.13 考虑 $G = \text{GL}(2, \mathbb{F}_2)$. 设 $H = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right\}$, $N = \left(\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \right)$. 则 $H \leq G$ 但 H 不是正规子群, 因为

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \notin H.$$

而 $|N| = 3, |G| = 6, [G: N] = 2$, 由例 4.3.12, $N \triangleleft G$.

定义 4.3.14 设 G 为群, $N \triangleleft G$. 在陪集空间 $G/N = \{\bar{a} = aN : a \in G\}$ 上定义乘法运算

$$aN \cdot bN = abN, \quad a, b \in G.$$

这使得 G/N 构成一个群, 称为 G 模 N 的商群.

注记 4.3.15 (1) 在商群 G/N 中, $\bar{a} = \bar{b} \iff a^{-1}b \in N \iff ba^{-1} \in N$. 由此可验证 G/N 中乘法的良好性与结合律.

(2) G/N 中幺元为 $1_{G/N} = \bar{1}$, 而逆由 $\bar{a}^{-1} = \overline{a^{-1}}$ 给出.

(3) 有典范群同态

$$\begin{aligned} \text{can} : G &\twoheadrightarrow G/N \\ a &\mapsto \bar{a}. \end{aligned}$$

其核 $\text{Ker}(\text{can}) = N$.

定理 4.3.16 (群同态基本定理) 设 $f : G \rightarrow H$ 为群同态, 则唯一存在群同构

$$\bar{f} : G/\text{Ker}(f) \xrightarrow{\sim} \text{Im}(f)$$

使得下图交换:

$$\begin{array}{ccc} G & \xrightarrow{f} & H \\ \text{can} \downarrow & & \uparrow \text{inc} \\ G/\text{Ker}(f) & \xrightarrow{\bar{f}} & \text{Im}(f) \end{array}$$

提示 由定理 1.1.19, 只需验证 \bar{f} 为群同态.

注记 4.3.17 (1) 若 f 是单的, 即 $\text{Ker}(f) = \{1_G\}$, 则 $G \simeq \text{Im}(f) \leq H$.

(2) 若 f 是满的, 即 $\text{Im}(f) = H$, 则 $H \simeq G/\text{Ker}(f)$.

例 4.3.18 在练习 4.1.16 中, 记 $V = \{A, B, C, D\}$, 则任意 $g \in \Sigma(\square)$ 均满足 $g|_V$ 为 V 的置换. 因此有群同态

$$\begin{aligned} \phi : \Sigma(\square) &\rightarrow S(V) \\ g &\mapsto g|_V. \end{aligned}$$

由于 $\text{Ker } \phi = \{I_2\}$ 即 ϕ 是单射, 由定理 4.3.16, $\Sigma(\square)$ 同构于 $S(V)$ 的一个 8 阶子群.

例 4.3.19 考虑 $x^3 - 2 \in \mathbb{Q}[x]$ 的分裂域 $E = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \omega)$ 及其根集 $X = \text{Root}_E(x^3 - 2) = \{\sqrt[3]{2}, \sqrt[3]{2}\omega, \sqrt[3]{2}\omega^2\}$. 对任意 $\sigma \in \text{Aut}(E/\mathbb{Q}) = \text{Aut}(E)$, $\sigma|_X \in S(X)$, 因此有自然群同态

$$\begin{aligned} \phi : \text{Aut}(E) &\rightarrow S(X) \\ \sigma &\mapsto \sigma|_X. \end{aligned}$$

利用 E 是 \mathbb{Q} -线性空间 (\mathbb{Q} -基见例 3.2.7) 可知 ϕ 是单射. 又 $|\text{Aut}(E)| = 6 = |S(X)|$, 由定理 4.3.16, ϕ 是群同构, $\text{Aut}(E) \simeq S(X)$. 特别地, $\text{Aut}(E/\mathbb{Q})$ 是非 Abel 群.

练习 4.3.20 在例 4.3.19 中, 存在群同构 $S(X) \simeq \text{GL}(2, \mathbb{F}_2)$.

证明 记 $u = (\bar{1}, \bar{0})^T, v = (\bar{0}, \bar{1})^T, w = (\bar{1}, \bar{1})^T$. 观察到 $\text{GL}(2, \mathbb{F}_2)$ 中任一方阵诱导集合 $\{u, v, w\}$ 上的一个置换, 因此存在群同态 $f : \text{GL}(2, \mathbb{F}_2) \rightarrow S(X)$. 可验证 f 是单的, 又 $|\text{GL}(2, \mathbb{F}_2)| = 6 = |S(X)|$, 由定理

4.3.16, f 是群同构. 具体而言, 群同构 $f: \text{GL}(2, \mathbb{F}_2) \xrightarrow{\sim} S(X)$ 如下:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \bar{1} & \bar{1} \\ \bar{1} & \bar{0} \end{pmatrix} &\mapsto (123), & \begin{pmatrix} \bar{0} & \bar{1} \\ \bar{1} & \bar{0} \end{pmatrix} &\mapsto (12), & \begin{pmatrix} \bar{0} & \bar{1} \\ \bar{1} & \bar{1} \end{pmatrix} &\mapsto (132), \\ \begin{pmatrix} \bar{1} & \bar{1} \\ \bar{0} & \bar{1} \end{pmatrix} &\mapsto (13), & \begin{pmatrix} \bar{1} & \bar{0} \\ \bar{1} & \bar{1} \end{pmatrix} &\mapsto (23), & I &\mapsto \text{Id}. \end{aligned}$$

□

定理 4.3.21 (对应定理) 设 G 为群, $N \triangleleft G$, 则存在双射

$$\begin{aligned} \{K : N \leq K \leq G\} &\xleftarrow{1:1} \{G/N \text{ 的子群}\} \\ K &\longmapsto K/N \\ \{a \in G : aN \in \overline{K}\} &\longleftarrow \overline{K}. \end{aligned}$$

定理 4.3.22 设 G 为群, $N \leq K \leq G$, $N \triangleleft G$. 则 $K \triangleleft G$ 当且仅当 $K/N \triangleleft G/N$. 此时, 有自然同构

$$(G/N)/(K/N) \xrightarrow{\sim} G/K, \quad (aN)K/N \mapsto aK.$$

证明 (1) 若 $K \triangleleft G$, 则有群的满同态

$$G/N \twoheadrightarrow G/K, \quad aN \mapsto aK.$$

其良定性检验: $aN = a'N \iff a^{-1}a' \in N \implies a^{-1}a' \in K \iff aK = a'K$. 此同态的核为 $\{aN : aK = 1_{G/K}\} = \{aN : a \in K\} = K/N$. 因此 $K/N \triangleleft G/N$.

(2) 若 $K/N \triangleleft G/N$, 由命题 4.3.9, 对任意 $gN \in G/N$, $(gN)(K/N) = (gN)^{-1}$, 于是 $(gKg^{-1})/N = K/N, \forall g \in G$. 又 $N \leq K, N \leq gKg^{-1}$, 由定理 4.3.21 中的双射即得 $gKg^{-1} = K, \forall g \in G$. 再由命题 4.3.9, $K \triangleleft G$.

(3) 若 $K \triangleleft G$, 对 (1) 中满同态运用定理 4.3.16 即得 $(G/N)/(K/N) \xrightarrow{\sim} G/K$. □

定理 4.3.23 设 G 为群, $N \triangleleft G, H \leq G$, 则

- (1) $NH = HN \leq G$.
- (2) $(H \cap N) \triangleleft H$.
- (3) $H/(H \cap N) \simeq NH/N$.

证明 由 $N \triangleleft G$ 知 $Nh = hN, \forall h \in H$, 令 h 遍历 H 即得 $NH = HN$. 由此易得 $NH \leq G$. 于是有群的满同态

$$H \twoheadrightarrow NH/N, \quad h \mapsto hN.$$

其核为 $\{h \in H : hN = 1_{NH/N}\} = \{h \in H : h \in N\} = N \cap H$. 故 $(N \cap H) \triangleleft H$, 且由定理 4.3.16, 存在群同构

$$H/(H \cap N) \xrightarrow{\sim} NH/N. \quad \square$$

例 4.3.24 设 G, H 为群. 考虑投影同态

$$G \times H \twoheadrightarrow H, \quad (g, h) \mapsto h.$$

其核为 $(G \times \{1_H\}) \triangleleft (G \times H)$. 由定理 4.3.16, 存在群同构

$$(G \times H)/(G \times \{1_H\}) \xrightarrow{\sim} H.$$

练习 4.3.25 设有群同构 $\theta: G \xrightarrow{\sim} G'$, $N \triangleleft G$, $N' = \theta(N) \triangleleft G'$, 则 $G/N \simeq G'/N'$.

练习 4.3.26 令 G 是实数对 (a, b) , $a \neq 0$ 带有乘法 $(a, b)(c, d) = (ac, ad + b)$ 的群. 试证: $K = \{(1, b) : b \in \mathbb{R}\} \triangleleft G$ 且 $G/K \simeq (\mathbb{R}^\times, \cdot)$. **提示** 第一分量投影同态.

练习 4.3.27 设 $f: G \rightarrow H$ 是群同态, $M \leq G$. 试证 $f^{-1}(f(M)) = KM$, 这里 $K = \text{Ker}(f)$.

练习 4.3.28 设 M 和 N 均为群 G 的正规子群. 若 $M \cap N = \{1_G\}$, 则对任意 $a \in M, b \in N$ 有 $ab = ba$. **提示** $b^{-1}aba^{-1} \in M \cap N$.

练习 4.3.29 若 $G/Z(G)$ 是循环群, 则 G 是 Abel 群.

证明 设 $G/Z(G) = \langle gZ(G) \rangle$, 其中 $g \in G$. 对任意 $a, b \in G$, 存在 $c, d \in Z(G)$ 使得 $a = g^m c, b = g^n d$. 由此可见 $ab = ba$, 即 G 是 Abel 群. \square

4.4 对称群

定义 4.4.1 记 n 元集合 $\underline{n} = \{1, \dots, n\}$ 的对称群为 S_n , 称为 n 次的对称群或置换群.

注记 4.4.2 $|S_n| = n!$.

命题 4.4.3 设有集合间双射 $\delta: X \rightarrow Y$, 则有群同构

$$S(X) \xrightarrow{\sim} S(Y), \quad \sigma \mapsto \delta \circ \sigma \circ \delta^{-1}.$$

推论 4.4.4 若集合 X 满足 $|X| = n$, 则 $S(X) \simeq S_n$.

约定 4.4.5 当 j_1, j_2, \dots, j_n 是 $1, 2, \dots, n$ 的一个排列时, 可将一个置换 $\sigma \in S_n$ 记为

$$\sigma = \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & \cdots & j_n \\ \sigma(j_1) & \sigma(j_2) & \cdots & \sigma(j_n) \end{pmatrix}.$$

例 4.4.6 在 S_3 中, 考虑 $\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}$ 及 $\tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}$, 则 $\sigma \circ \tau \neq \tau \circ \sigma$.

例 4.4.7 对任意正整数 n , 有群嵌入

$$S_n \hookrightarrow S_{n+1}, \quad \sigma \mapsto \bar{\sigma} = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & n & n+1 \\ \sigma(1) & \cdots & \sigma(n) & n+1 \end{pmatrix}.$$

于是结合例 4.4.6 即知, 当 $n \geq 3$ 时, S_n 是非 Abel 群.

定义 4.4.8 设 $\{i_1, i_2, \dots, i_t\} \subset \{1, 2, \dots, n\}$. 若 $c \in S_n$ 满足

$$\begin{array}{ccc} & i_1 \xrightarrow{c} i_2 & \\ c \nearrow & & \searrow c \\ i_t & & i_3 \\ c \nwarrow & & \swarrow c \\ & \dots\dots\dots & \end{array} \quad \text{且} \quad c(j) = j, \forall j \in \underline{n} \setminus \{i_1, i_2, \dots, i_t\},$$

则称 c 为 S_n 中的一个 t -轮换 (又称循环), 记为 $c = (i_1 i_2 \dots i_t)$. 称 i_1, i_2, \dots, i_t 为轮换 c 中的文字, t 称为轮换 c 的长. 特别地, 2-轮换称为对换, 1-轮换实际上就是恒等置换.

注记 4.4.9 (1) $c^{-1} = (i_t \dots i_2 i_1)$.

(2) $\text{ord}(c) = t$.

(3) 任一个 t -轮换都有 t 种表示法.

(4) S_n 中 t -轮换共有 $\frac{n!}{t}$ 个.

例 4.4.10 (辨结构) 在 S_3 中, $(12)(23)(12) = (23)(12)(23)$. 提示 用引理 4.4.12 简算.

定义 4.4.11 在 S_n 中, 如果若干个轮换间没有共同文字, 则称它们是不相交的轮换.

引理 4.4.12 (t -轮换的共轭) 对任意 $\sigma \in S_n$ 与 t -轮换 $(i_1 i_2 \dots i_t) \in S_n$, 有

$$\sigma(i_1 i_2 \dots i_t) \sigma^{-1} = (\sigma(i_1) \sigma(i_2) \dots \sigma(i_t)).$$

提示 观察 LHS 在 $\sigma(i_r)$ 上的作用.

引理 4.4.13 S_n 中两个不相交的轮换是可交换的.

证明 设 $\sigma, \tau \in S_n$ 为两个不相交的轮换, $\tau = (i_1 i_2 \dots i_t)$, 由引理 4.4.12,

$$\sigma \tau \sigma^{-1} = (\sigma(i_1) \sigma(i_2) \dots \sigma(i_t)) \xrightarrow{\text{不相交}} (i_1 i_2 \dots i_t) = \tau \implies \sigma \tau = \tau \sigma. \quad \square$$

命题 4.4.14 (轮换分解) 任何 $\sigma \in S_n$ 均可表为 $\sigma = c_1 \dots c_l$, 其中 c_i 为互不相交的轮换 (不含 1-轮换). 如果不计次序, 则表法是唯一的. 提示 考虑 \underline{n} 上的 σ -轨道.

定义 4.4.15 称群 G 中元素 a 与 b 共轭, 若存在 $g \in G$ 使得 $a = gbg^{-1}$. 这是 G 上的等价关系, 其等价类称为共轭类. 通常记元素 a 所在的共轭类为 C_a .

注记 4.4.16 $C_a = \{a\} \iff a \in Z(G)$.

定义 4.4.17 设 $\sigma \in S_n$ 可表为 $c_1 \dots c_t$, 其中 c_i 为互不相交的轮换 (包括 1-轮换), 并用 λ_i 表示其中长为 i 的轮换个数. 定义 σ 的循环型为 $1^{\lambda_1} 2^{\lambda_2} \dots n^{\lambda_n}$, 它满足 $\sum_{i=1}^n i \lambda_i = n$.

注记 4.4.18 $\text{ord}(\sigma) = \text{lcm}(i : \lambda_i \neq 0)$.

定理 4.4.19 S_n 中两元素共轭当且仅当它们具有相同的循环型.

证明 (\Rightarrow) 任取 $\sigma \in S_n$, 设 $\sigma = c_1 \dots c_t$, 其中 c_i 为互不相交的轮换, 则对任意 $h \in S_n$, $h\sigma h^{-1} = (hc_1 h^{-1}) \dots (hc_t h^{-1})$. 由引理 4.4.12 立见 σ 与 $h\sigma h^{-1}$ 同型.

(\Leftarrow) 设 $\sigma, \tau \in S_n$ 具有相同的循环型:

$$\begin{aligned}\sigma &= (a_1) \cdots (a_s)(i_1 i_2) \cdots (i_{2r-1} i_{2r}) \cdots, \\ \tau &= (b_1) \cdots (b_s)(j_1 j_2) \cdots (j_{2r-1} j_{2r}) \cdots.\end{aligned}$$

取 $h \in S_n$ 满足 $h(a_1) = b_1, \dots, h(a_s) = b_s, h(i_1) = j_1, h(i_2) = j_2, \dots, h(i_{2r-1}) = j_{2r-1}, h(i_{2r}) = j_{2r}, \dots$. 易见 $h\sigma h^{-1} = \tau$ 即 σ 与 τ 共轭. \square

例 4.4.20 由定理 4.4.19 可得 S_3 的共轭类 (表 4.1).

表 4.1: S_3 的共轭类 $6 = 1 + 3 + 2$

循环型	1^3	$1^1 2^1$	3^1
元素	Id	$(12), (13), (23)$	$(123), (132)$

由此可知在 S_3 中 (12) 与 (13) 共轭, 为求 $h \in S_3$ 使得 $h(12)h^{-1} = (13)$, 利用引理 4.4.12, 只需求解 $(h(1)h(2)) = (13)$. 故分别解

$$\begin{cases} h(1) = 1, \\ h(2) = 3 \end{cases} \quad \text{与} \quad \begin{cases} h(1) = 3, \\ h(2) = 1 \end{cases}$$

得 $h = (23)$ 或 $h = (132)$.

例 4.4.21 由定理 4.4.19 可得 S_4 的共轭类 (表 4.2).

表 4.2: S_4 的共轭类 $24 = 1 + 6 + 3 + 8 + 6$

循环型	1^4	$1^2 2^1$	2^2	$1^1 3^1$	4^1
元素	Id	$(12), (13),$ $(14), (23),$ $(24), (34)$	$(12)(34),$ $(13)(24),$ $(14)(23)$	$(123), (132), (124), (142),$ $(134), (143), (234), (243)$	$(1234), (1243),$ $(1324), (1342),$ $(1423), (1432)$

观察到群嵌入 $S_3 \hookrightarrow S_4$ (例 4.4.7) 对共轭不封闭, 由命题 4.3.9, S_3 不是 S_4 的正规子群.

注记 4.4.22 由注记 4.4.16, 从例 4.4.20 与例 4.4.21 可见, $Z(S_3)$ 与 $Z(S_4)$ 均平凡.

例 4.4.23 在练习 4.1.16 中, 代 A, B, C, D 以 $1, 2, 3, 4$. 映射 $\Sigma(\square) \hookrightarrow S_4$ 的像 H 为

- (1) 四个旋转: Id, $(1234), (13)(24), (1432)$.
- (2) 四个镜面对称: $(14)(23), (12)(34), (24), (13)$.

由表 4.2 可见, $H \leq S_4$ 对共轭不封闭, 因此 H 不是 S_4 的正规子群.

练习 4.4.24 在例 4.4.23 中,

- (1) $H = ((1234), (13))$.
- (2) 另代练习 4.1.16 中的 A, B, C, D 以 $1, 3, 2, 4$, 求映射 $\Sigma(\square) \hookrightarrow S_4$ 的像 H' .
- (3) 另代练习 4.1.16 中的 A, B, C, D 以 $1, 2, 4, 3$, 求映射 $\Sigma(\square) \hookrightarrow S_4$ 的像 H'' .

(4) 求 $H \cap H' \cap H''$.

解答 (1) 在 S_4 中, $\text{ord}(1234) = 4$ 且 $(13) \notin \langle (1234) \rangle$, 因此 $|\langle (1234), (13) \rangle| \geq 5$. 又 $\langle (1234), (13) \rangle \leq H$, $|H| = 8$, 由定理 4.1.18, $|\langle (1234), (13) \rangle| = 8$, 故 $H = \langle (1234), (13) \rangle$.

(2) $H' = \{\text{Id}, (1324), (12)(34), (1423), (14)(23), (13)(24), (12), (34)\}$.

(3) $H'' = \{\text{Id}, (1243), (14)(23), (1342), (13)(24), (12)(34), (14), (23)\}$.

(4) $H \cap H' \cap H'' = \{\text{Id}, (12)(34), (13)(24), (14)(23)\} \triangleleft S_4$, 其正规性见表 4.2. □

注记 4.4.25 (4) 中得到的子群记作 K_4 , 因其同构于 Klein 四元群 (例 4.1.36).

引理 4.4.26 任意 $\sigma \in S_n$ 均能写成对换之积.

证明 任一 t -轮换都可写成 $t-1$ 个对换之积: $(i_1 i_2 \cdots i_t) = (i_{t-1} i_t) \cdots (i_2 i_t)(i_1 i_t)$. □

引理 4.4.27 S_n 可由 $(12), (23), \cdots, (n-1, n)$ 生成.

证明 只需证任意 $(ij) \in \langle (12), (23), \cdots, (n-1, n) \rangle$. 对 $|j-i|$ 归纳, 当 $|j-i| = 1$ 时结论已成立. 当 $|j-i| > 1$ 时, $(ij) = (i+1, j)(i, i+1)(i+1, j)$, 对 $(i+1, j)$ 归纳即证. □

注记 4.4.28 对 $1 \leq i \leq n-1$, 通常记 $s_i = (i, i+1) \in S_n$. 因此 S_n 由 $s_1, s_2, \cdots, s_{n-1}$ 生成. 有如下辫子关系:

$$\begin{aligned} s_i s_{i+1} s_i &= s_{i+1} s_i s_{i+1}, \quad \forall 1 \leq i \leq n-2, \\ s_i s_j &= s_j s_i, \quad \forall |i-j| \geq 2, \\ s_i^2 &= \text{Id}, \quad \forall 1 \leq i \leq n-1. \end{aligned}$$

例 4.4.29 存在群同态

$$S_n \hookrightarrow \text{GL}(n, \mathbb{R}), \quad \sigma \mapsto P_\sigma \text{ 置换方阵.}$$

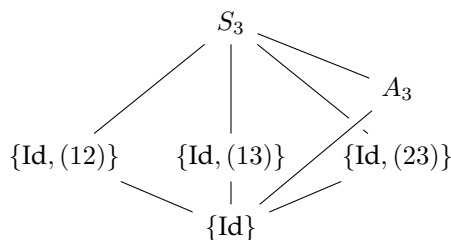
将其与行列式同态复合便得群同态

$$\begin{aligned} \text{sgn} : S_n &\rightarrow \{1, -1\} \\ \sigma &\mapsto \det(P_\sigma). \end{aligned}$$

若 $\text{sgn}(\sigma) = 1$, 称 σ 为偶置换; 若 $\text{sgn}(\sigma) = -1$, 称 σ 为奇置换. 定义 $A_n = \text{Ker}(\text{sgn})$, 称为 n 元集合上的交错群, 则 A_n 的元素为全体偶置换, $A_n \triangleleft S_n$. 由定理 4.3.16, $S_n/A_n \simeq \{\pm 1\}$, $|A_n| = \frac{n!}{2}$. 由引理 4.4.26, $\text{sgn}(i_1 i_2 \cdots i_t) = (-1)^{t-1}$.

例 4.4.30 由表 4.1, $A_3 = \{\text{Id}, (123), (132)\} \triangleleft S_3$.

例 4.4.31 (S_3 的子群格) 对 S_3 的子群作分类 (用线表示包含关系, 称为 Hasse 图):



例 4.4.32 在表 4.2 中, A_4 为循环型 $1^4, 2^2, 1^1 3^1$ 对应共轭类之并, 因此 $A_4 \triangleleft S_4$.

例 4.4.33 对 S_4 的正规子群分类: $\{\text{Id}\} \leq K_4 \leq A_4 \leq S_4$ (利用子群正规当且仅当是共轭类之并).

定义 4.4.34 若群 G 不具有除 $\{1_G\}, G$ 之外的正规子群, 则称 G 为单群.

练习 4.4.35 设 $G \neq \{1_G\}$ 为 Abel 群, 则 G 为单群当且仅当 G 为 p 阶循环群, 其中 p 为素数.

证明 由于 G 为 Abel 群, G 的任意子群均是正规子群.

(\Rightarrow) 任取 $a \in G \setminus \{1_G\}$, 则 $\langle a \rangle \triangleleft G$, 因此 $G = \langle a \rangle$ 为循环群. 由任意非 1_G 元素均为生成元即知 G 为素数阶循环群.

(\Leftarrow) 若 G 为 p 阶循环群, 由定理 4.1.18, G 无非平凡子群, 进而为单群. □

定理 4.4.36 当 $n \geq 5$ 时, 交错群 A_n 是单群.

证明 (1) 先证明当 $n \geq 3$ 时, A_n 由所有 3-轮换生成. 对于互不相同的 i, j, k, l , 有 $(ij)(ik) = (jik)$, $(ij)(kl) = (ij)(jk)(jk)(kl) = (ijk)(jkl)$, 因此两个不同的对换之积一定是 3-轮换之积, 而 A_n 中任何元素都可以写成偶数个对换之积, 因此 A_n 由 3-轮换生成.

(2) 再证明当 $n \geq 5$ 时, A_n 中所有 3-轮换是一个共轭类. 对任意 3-轮换 (ijk) , 存在 $\sigma \in S_n$ 使得 $\sigma(i) = 1, \sigma(j) = 2, \sigma(k) = 3$. 若 $\sigma \in A_n$, 则 $\sigma(ijk)\sigma^{-1} = (123)$; 若 $\sigma \notin A_n$, 则 $(45)\sigma \in A_n$, 且 $(45)\sigma(ijk)\sigma^{-1}(45) = (123)$. 因此所有 3-轮换都与 (123) 共轭.

(3) 下证 A_n 无非平凡正规子群. 由 (1)(2), 只需证若 $\{\text{Id}\} \neq N \triangleleft A_n$, 则 N 含有一个 3-轮换. 以下记任意置换 σ 的不动点集为 $\text{Fix}(\sigma) := \{i : \sigma(i) = i\}$. 取 $\sigma \in N \setminus \{\text{Id}\}$ 使得 $|\text{Fix}(\sigma)|$ 最大, 下证 σ 即欲求的 3-轮换.

① 如果 σ 的轮换分解中只有对换, 那么分解中至少含两项如 $(ij)(kl)$, 其中 $\{i, j\} \cap \{k, l\} = \emptyset$. 由于 $n \geq 5$, 可取 $r \notin \{i, j, k, l\}$ 并定义

$$\tau := (klr), \quad \sigma' := \tau\sigma\tau^{-1}\sigma^{-1} \in N \quad (\because N \triangleleft A_n).$$

可直接验证 $i, j \in \text{Fix}(\sigma') \setminus \text{Fix}(\sigma)$, $\sigma'(k) = r \neq k$, 以及

$$\text{Fix}(\sigma) \setminus \{r\} = \text{Fix}(\sigma) \setminus \{k, l, r\} = (\text{Fix}(\sigma) \cap \text{Fix}(\tau)) \subset \text{Fix}(\sigma').$$

故 $|\text{Fix}(\sigma')| > |\text{Fix}(\sigma)|$, 矛盾.

② 设 σ 的轮换分解中包含长 > 2 的项 $(ijk \cdots)$. 若 $\sigma = (ijk)$ 则 σ 即所求的 3-轮换; 否则因为 σ 不可能是 4-轮换, σ 除了 i, j, k 之外还挪动至少两个相异元 r, l . 依然如 ① 定义 $\sigma' \in N$. 可以验证 $j \in \text{Fix}(\sigma'), \sigma'(k) = l \neq k$ 和

$$\text{Fix}(\sigma) = \text{Fix}(\sigma) \setminus \{k, l, r\} = (\text{Fix}(\sigma) \cap \text{Fix}(\tau)) \subset \text{Fix}(\sigma').$$

仍得到矛盾 $|\text{Fix}(\sigma')| > |\text{Fix}(\sigma)|$. 故 σ 只能为 3-轮换. □

推论 4.4.37 当 $n \geq 5$ 时, A_n 是 S_n 唯一的非平凡正规子群.

证明 设 $\{\text{Id}\} \neq N \triangleleft S_n$, 结合 $A_n \triangleleft S_n$ 即得 $(N \cap A_n) \triangleleft A_n$.

◇ 若 $N \cap A_n = A_n$, 则 $A_n \subset N$, 而 $[S_n : A_n] = 2$, 故 $N = A_n$.

◇ 若 $N \cap A_n = \{\text{Id}\}$, 考虑群同态

$$A_n \xrightarrow{\text{inc}} S_n \rightarrow S_n/N,$$

因其核即 $N \cap A_n = \{\text{Id}\}$, 这是群嵌入. 因此 $|N| = 2$. 取 $\sigma \in N \setminus \{\text{Id}\}$, 则 $\text{ord}(\sigma) = 2$. 由命题 4.4.14 与注记 4.4.18, σ 是不交对换之积. 由定理 4.4.19 易见 N 对共轭不封闭, 与 $N \triangleleft S_n$ 矛盾. \square

例 4.4.38 由例 4.3.12 与定理 4.4.36 即知, A_5 无 30 阶子群.

练习 4.4.39 在 A_4 中求解方程 $\sigma(12)(34)\sigma^{-1} = (13)(24)$.

解答 由引理 4.4.12, $\sigma(12)(34)\sigma^{-1} = (\sigma(12)\sigma^{-1})(\sigma(34)\sigma^{-1}) = (\sigma(1)\sigma(2))(\sigma(3)\sigma(4))$.

$$\diamond \begin{cases} (\sigma(1)\sigma(2)) = (13), \\ (\sigma(3)\sigma(4)) = (24) \end{cases} \implies \sigma = \underbrace{(23)}_{\notin A_4}, (132), (234), \underbrace{(1342)}_{\notin A_4}.$$

$$\diamond \begin{cases} (\sigma(1)\sigma(2)) = (24), \\ (\sigma(3), \sigma(4)) = (13) \end{cases} \implies \sigma = \underbrace{(1243)}_{\notin A_4}, (143), (143), (124), \underbrace{(14)}_{\notin A_4}.$$

故 $\sigma = (132), (234), (143), (124)$. \square

照此计算可知 A_4 中 $(12)(34)$ 与 $(14)(23)$ 共轭, 但 (123) 与 (132) 不共轭 (尽管它们在 S_4 中共轭).

练习 4.4.40 分别求 A_4 中 (123) 和 (132) 的共轭类.

解答 A_4 中 (123) 和 (132) 的共轭类均为 3^1 型, 因此 $|C_{(123)}| + |C_{(132)}| \leq 8$, 若能分别找到 $C_{(123)}$ 与 $C_{(132)}$ 中的 4 个元素, 则它们恰为欲求共轭类. 直接计算得:

$$\begin{aligned} (12)(34)(123)(34)^{-1}(12)^{-1} &= (142), \\ (13)(24)(123)(24)^{-1}(13)^{-1} &= (134), \\ (14)(23)(123)(23)^{-1}(14)^{-1} &= (243), \\ (12)(34)(132)(34)^{-1}(12)^{-1} &= (124), \\ (13)(24)(132)(24)^{-1}(13)^{-1} &= (143), \\ (14)(23)(132)(23)^{-1}(14)^{-1} &= (234). \end{aligned}$$

故 $C_{(123)} = \{(123), (134), (142), (243)\}$, $C_{(132)} = \{(124), (132), (143), (234)\}$. \square

练习 4.4.41 A_4 没有 6 阶子群.

证明 假设 G 是 A_4 的 6 阶子群, 则 $[A_4 : G] = 2$, 由例 4.3.12, $G \triangleleft A_4$, 因此 G 为 A_4 中若干共轭类之并. 由前述讨论可得 A_4 的共轭类 (表 4.3), 可见与 $|G| = 6$ 矛盾.

表 4.3: A_4 的共轭类 $12 = 1 + 3 + 4 + 4$

循环型	1^4	2^2	$1^1 3^1$	$1^1 3^1$
元素	Id	$(12)(34), (13)(24), (14)(23)$	$(123), (134), (142), (243)$	$(124), (132), (143), (234)$

练习 4.4.42 讨论置换 $\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ n & n-1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}$ 的奇偶性.

4.5 群作用

定义 4.5.1 设 G 为群, X 为非空集合. 若映射

$$\begin{aligned}\psi : G \times X &\rightarrow X \\ (g, x) &\mapsto \psi(g, x)\end{aligned}$$

满足对任意 $x \in X$ 与 $g_1, g_2 \in G$ 都有

$$\begin{aligned}\psi(1_G, x) &= x, \\ \psi(g_1 g_2, x) &= \psi(g_1, \psi(g_2, x)),\end{aligned}$$

则称 G 左作用于 X , 记为 $G \curvearrowright X$. 此时称 X 或 (X, ψ) 为左 G -集. 常记 $\psi(g, x)$ 为 $g \cdot x$.

例 4.5.2 对任意非空集合 X , 其对称群 $S(X)$ 在 X 上有自然的左作用: $(\sigma, x) \mapsto \sigma(x)$.

例 4.5.3 $\mathrm{GL}(n, \mathbb{R})$ 在 \mathbb{R}^n 上有自然的左 (线性) 作用: $(A, x) \mapsto Ax$.

例 4.5.4 设 K/k 为 $f(x) \in k[x]$ 的分裂域, 则 $\mathrm{Aut}(K/k) \curvearrowright \mathrm{Root}_K(f) : (\sigma, a) \mapsto \sigma(a)$.

例 4.5.5 在练习 4.3.20 的证明中, 我们看到 $\mathrm{GL}(2, \mathbb{F}_2) \curvearrowright \mathbb{F}_2^{\oplus 2}$.

例 4.5.6 若 $G \curvearrowright X$, 则 G 自然作用于 P 的幂集 $\mathcal{P}(X)$.

$\{G \text{ 在 } X \text{ 上的左作用}\} \xrightarrow{1:1} \mathrm{Hom}(G, S(X))$ 任意左 G -集 (X, ψ) 诱导群同态 (群的置换表示)

$$\begin{aligned}\rho : G &\rightarrow S(X) \\ g &\mapsto \rho(g),\end{aligned}$$

其中 $\rho(g)(x) := g \cdot x$. 反过来, 给定群同态 $\rho : G \rightarrow S(X)$, 可定义 G 在 X 上的左作用:

$$\begin{aligned}\psi : G \times X &\rightarrow X \\ (g, x) &\mapsto \rho(g)(x).\end{aligned}$$

阅读提示

请验证如上群同态的良好性, 如 $\rho(g) \in S(X)$ 等.

定义 4.5.7 定义群作用 $G \curvearrowright X$ 的核 N 为如上群同态 $G \rightarrow S(X)$ 的核, 即 $N = \bigcap_{x \in X} G_x$.

练习 4.5.8 设 K/k 为 $f(x) \in k[x]$ 的分裂域, 由例 4.5.4 可得群同态

$$\rho : \mathrm{Aut}(K/k) \rightarrow S(\mathrm{Root}_K(f)).$$

证明 ρ 是单同态. 由此再次得到 $\mathrm{Aut}(K/k)$ 是有限群.

定义 4.5.9 给定群 (G, \cdot) , 在集合 G 上定义新的二元运算 \star 使得 $x \star y = y \cdot x$, 得到的新群 (G, \star) 记作 G^{op} , 称为 G 的反群.

注记 4.5.10 存在群同构 $G \xrightarrow{\sim} G^{\text{op}}, g \mapsto g^{-1}$.

定义 4.5.11 设 G 为群, Y 为非空集合. 若映射

$$\begin{aligned}\phi : Y \times G &\rightarrow Y \\ (y, g) &\mapsto \phi(y, g)\end{aligned}$$

满足对任意 $y \in Y$ 与 $g_1, g_2 \in G$ 都有

$$\begin{aligned}\phi(y, 1_G) &= y, \\ \phi(y, g_1 g_2) &= \phi(\phi(y, g_1), g_2),\end{aligned}$$

则称 G 右作用于 y , 记为 $Y \curvearrowright G$. 此时称 Y 或 (Y, ϕ) 为右 G -集. 常记 $\phi(y, g)$ 为 $y \cdot g$.

$\{G \text{ 在 } Y \text{ 上的右作用}\} \xrightarrow{1:1} \text{Hom}(G, S(Y)^{\text{op}})$ 任意右 G -集 (Y, ϕ) 诱导群同态 (群的置换表示)

$$\begin{aligned}\rho : G &\rightarrow S(Y)^{\text{op}} \\ g &\mapsto \rho(g),\end{aligned}$$

其中 $\rho(g)(y) := y \cdot g$. 反过来, 给定群同态 $\rho : G \rightarrow S(Y)^{\text{op}}$, 可定义 G 在 Y 上的右作用:

$$\begin{aligned}\phi : Y \times G &\rightarrow Y \\ (y, g) &\mapsto \rho(g)(y).\end{aligned}$$

$$\text{左/右 } G\text{-集本质相同: } \boxed{G \curvearrowright X : (g, x) \mapsto g \cdot x} \rightleftarrows \boxed{X \curvearrowright G : (x, g) \mapsto x \cdot g := g^{-1} \cdot x}$$

例 4.5.12 设 G 为群, $H \leq G$.

- (1) 考虑左陪集空间 $G/H = \{aH : a \in G\}$ (未必为商群), 则有左诱导作用 $G \curvearrowright (G/H) : (g, aH) \mapsto gaH$.
- (2) 对偶地, 考虑右陪集空间 $H \backslash G = \{Ha : a \in G\}$, 则有右诱导作用 $(H \backslash G) \curvearrowright G : (Ha, g) \mapsto Hag$, 与右正则作用对应的左作用为 $(g, Ha) \mapsto Hag^{-1}$.
- (3) 特别地, 当 $H = \{1_G\}$ 时, 得到左正则作用 $G \curvearrowright G : (g, a) \mapsto ga$ 与右正则作用 $G \curvearrowright G : (a, g) \mapsto ag$.

前文已谈及 G 在 X 上的左作用与 $\text{Hom}(G, S(X))$ 间存在一一对应关系, 将其用于例 4.5.12 (3) 的左正则作用, 便得到群嵌入

$$G \hookrightarrow S(G), \quad g \mapsto \ell_g,$$

其中 $\ell_g(x) := gx$ (易验证此同态的核为 $\{1_G\}$). 故我们得到

定理 4.5.13 (Cayley 定理) 任何群 G 与对称群 $S(G)$ 的一个子群同构.

定义 4.5.14 设 G 为群, X 为左 G -集, 称 $G \curvearrowright X$ 是忠实的, 若相应的群同态

$$\begin{aligned}\rho : G &\rightarrow S(X) \\ g &\mapsto \rho(g)\end{aligned}$$

是单射, 其中 $\rho(g)(x) = g \cdot x, \forall x \in X$. 这等价于说群作用 $G \curvearrowright X$ 的核 $N = \{1_G\}$.

例 4.5.15 例 4.5.12 中的左/右正则作用均是忠实的.

例 4.5.16 由练习 4.5.8, $\text{Aut}(K/k) \curvearrowright S(\text{Root}_K(f))$ 是忠实的.

例 4.5.17 (非忠实群作用) $(\mathbb{R}^2, +) \curvearrowright \mathbb{S}^1 : ((x, y), e^{i\theta}) \mapsto e^{i(\theta+x+y)}$ 非忠实.

定义 4.5.18 设 $G \curvearrowright X, x \in X$. 称 $\mathcal{O}_x = \{g \cdot x : g \in G\} \subset X$ 为 x 的轨道.

注记 4.5.19 定义 X 上的等价关系为 $x \approx y \iff \exists g \in G, \text{ s.t. } y = g \cdot x$. 则 x 所在的等价类即 \mathcal{O}_x , X 有 G -轨道分解 $X = \bigsqcup_{x \in I} \mathcal{O}_x$, 其中 I 为 G -轨道的完全代表元系. 轨道的集合记为 X/G 或 $G \backslash X$.

定义 4.5.20 设 $G \curvearrowright X$. 若对任意 $x, y \in X$, 均存在 $g \in G$ 使得 $y = g \cdot x$, 则称群作用 $G \curvearrowright X$ 是可迁的.

注记 4.5.21 (1) $G \curvearrowright X$ 可迁当且仅当 X 仅有一个 G -轨道.

(2) 对任意 $x \in X$, 限制作用 $G \curvearrowright \mathcal{O}_x$ 总是可迁的.

引理 4.5.22 考虑无重根非零多项式 $f(x) \in k[x]$ 及其分裂域 K/k , 则 $f(x)$ 不可约当且仅当群作用 $\text{Aut}(K/k) \curvearrowright \text{Root}_K(f)$ 是可迁的.

证明 (\Rightarrow) 对不可约的 $f(x)$ 的任意一对根 $\alpha \neq \beta \in K$, 由引理 3.3.1, 唯一存在 Id_k 的延拓 $\sigma : k(\alpha) \xrightarrow{\sim} k(\beta)$ 满足 $\sigma(\alpha) = \beta$. 此时 $K/k(\alpha)$ 与 $K/k(\beta)$ 分别为 $f(x) \in k(\alpha)[x]$ 与 $\sigma(f(x)) \in k(\beta)[x]$ 的分裂域, 由定理 3.3.13, 存在 σ 的延拓 $\delta \in \text{Aut}(K)$. 故 $\delta \in \text{Aut}(K/k)$ 满足 $\delta(\alpha) = \beta$, 即 $\text{Aut}(K/k) \curvearrowright \text{Root}_K(f)$ 可迁.

$$\begin{array}{ccc} K & \xrightarrow[\sim]{\delta} & K \\ \uparrow & & \uparrow \\ k(\alpha) & \xrightarrow[\sim]{\sigma: \alpha \mapsto \beta} & k(\beta) \\ \uparrow & & \uparrow \\ k & \xrightarrow{\text{Id}_k} & k \end{array}$$

(\Leftarrow) 若 $f = gh$ 可约, $\deg(g), \deg(h) \geq 1$, 则由 $f(x)$ 无重根知 $\text{Root}_K(g) \cap \text{Root}_K(h) = \emptyset$, 因此 $\text{Aut}(K/k) \curvearrowright \text{Root}_K(f)$ 不混合 g 和 h 的根集, 故不可迁, 矛盾. \square

定义 4.5.23 设 $G \curvearrowright X, x \in X$. 定义 x 的稳定化子 $G_x = \{g \in G : g \cdot x = x\}$.

注记 4.5.24 $G_x \leq G$ 为子群.

引理 4.5.25 设 $G \curvearrowright X, x, y \in X$. 若存在 $h \in G$ 使得 $x = h \cdot y$, 则 $G_x = hG_yh^{-1}$. 故同一轨道中的稳定化子是互相共轭的.

注记 4.5.26 再由练习 4.3.8 可知, 有群同构 $G_x \simeq G_y$.

例 4.5.27 将地球表面看作 \mathbb{S}^2 . 地球绕南北极的自转可看作 $\text{SO}(2)$ 在 \mathbb{S}^2 上的作用, 其轨道就是纬线. 在南北极点的稳定化子是 $\{\text{Id}\}$; 在南北极点的稳定化子是 $\text{SO}(2)$.

例 4.5.28 $\text{GL}(n, \mathbb{R})$ 在 \mathbb{R}^n 上的自然作用的轨道有 $\{0\}$ 和 $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ 两个. 在 0 点的稳定化子是 $\text{GL}(n, \mathbb{R})$, 在 e_1 点的稳定化子是

$$\left\{ \begin{pmatrix} 1 & \alpha \\ 0 & A \end{pmatrix} \in \text{GL}(n, \mathbb{R}) : A \in \text{GL}(n-1, \mathbb{R}), \alpha \in \mathbb{R}^{n-1} \right\}.$$

例 4.5.29 $\mathrm{SO}(n)$ 在 \mathbb{R}^n 上的作用的轨道是 $\{x \in \mathbb{R}^n : |x| = r\}, r \geq 0$. 当 $r > 0$ 时, 在 $r\mathbf{e}_1$ 点的稳定化子是 $\{\mathrm{diag}(1, A) : A \in \mathrm{SO}(n-1)\}$.

例 4.5.30 根据例 4.4.7, S_{n-1} 可看作 S_n 的子群. $S_n \curvearrowright n$ 在 n 的稳定化子为 S_{n-1} .

例 4.5.31 $\mathrm{GL}(n, \mathbb{C})$ 在 $M_n(\mathbb{C})$ 上相似作用的轨道是 $\mathcal{O}_J = \{TJT^{-1} : T \in \mathrm{GL}(n, \mathbb{C})\}$, 其中 J 是某个 Jordan 标准形, 而 J 的稳定化子为 $\{A \in \mathrm{GL}(n, \mathbb{C}) : AJ = JA\}$.

定理 4.5.32 (轨道-稳定化子定理) 设 $G \curvearrowright X, x \in X$, 则存在双射

$$\begin{aligned} f : G/G_x &\xrightarrow{\sim} \mathcal{O}_x \\ gG_x &\longmapsto g \cdot x. \end{aligned}$$

特别地, 我们有轨道-稳定化子公式

$$|\mathcal{O}_x| = |G/G_x| = [G : G_x] \quad \text{即} \quad |G| = |\mathcal{O}_x| |G_x|.$$

注记 4.5.33 对集合间双射 $f : Y \rightarrow Z$ 与群作用 $G \curvearrowright Y, G \curvearrowright Z$, 称 f 与 G -作用相容, 若

$$f(g \cdot y) = g \cdot f(y), \quad \forall g \in G, y \in Y.$$

在定理 4.5.32 中, 从 $G \curvearrowright X$ 可得左诱导作用 $G \curvearrowright (G/G_x)$ (参见例 4.5.12 (1)) 与限制作用 $G \curvearrowright \mathcal{O}_x$. 由于

$$f(h \cdot gG_x) = h \cdot f(gG_x), \quad \forall g, h \in G,$$

双射 f 与 G -作用相容.

例 4.5.34 在例 4.4.23 中, 有 $\Sigma(\square) \curvearrowright 4$. 由于 $\mathcal{O}_1 = 4$ 而 $\Sigma(\square)_1 = \{\mathrm{Id}, (24)\}$, 根据定理 4.5.32, $|\Sigma(\square)| = 4 \cdot 2 = 8$.

定理 4.5.35 (Burnside 引理) 设 G 是有限群, X 是有限 G -集. 对于 $g \in G$, 考虑 $X^g = \{x \in X : g \cdot x = x\}$, 则有

$$|X/G| = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} |X^g|.$$

证明 通过将 X 拆分为轨道的并, 可不妨设 $G \curvearrowright X$ 是可迁的, 从而只需证 $|G| = \sum_{g \in G} |X^g|$. 定义函数 $f : G \times X \rightarrow \mathbb{R}$ 如下:

$$f(g, x) = \begin{cases} 1, & \text{若 } g \cdot x = x, \\ 0, & \text{若 } g \cdot x \neq x. \end{cases}$$

下面用两种方式来计算 $S = \sum_{(g,x) \in G \times X} f(g, x)$:

◇ 对任意 $x \in X$, 由定理 4.5.32, $|G_x| = \frac{|G|}{|\mathcal{O}_x|} = \frac{|G|}{|X|}$. 因此 $S = |X| |G_x| = |G|$.

◇ 对任意 $g \in G$, $\sum_{x \in X} f(g, x) = |X^g|$, 因此 $S = \sum_{g \in G} |X^g|$.

比较这两个等式即得 $|G| = \sum_{g \in G} |X^g|$. □

注记 4.5.36 换言之, 轨道的个数是群中各个元素不动点个数的平均值.

定义 4.5.37 设 G 为群, X 为 G -集. 称作用 $G \curvearrowright X$ 为自由的, 若对任意 $x \in X$ 都有 $G_x = \{1_G\}$.

注记 4.5.38 由定理 4.5.32, $G \curvearrowright X$ 是自由的 $\iff |\mathcal{O}_x| = |G|, \forall x \in X$. 此时 $|G| \mid |X|$.

例 4.5.39 例 4.5.12 (3) 的左正则作用 $G \curvearrowright G : (g, a) \mapsto ga$ 是自由的.

例 4.5.40 设 $H \leq G$, 则限制左正则作用 $H \curvearrowright G : (h, x) \mapsto hx$ 是自由的. 由注记 4.5.38, $|H| \mid |G|$, 这便是定理 4.1.18.

定义 4.5.41 设 G 为群, X 为 G -集. 称作用 $G \curvearrowright X$ 为平凡的, 若对任意 $g \in G$ 与 $x \in X$ 均有 $g \cdot x = x$.

注记 4.5.42 $G \curvearrowright X$ 是平凡的 $\iff G_x = G, \forall x \in X \iff \mathcal{O}_x = \{x\}, \forall x \in X$.

例 4.5.43 设 $G \curvearrowright X$, 记 X 的不动点集为 $X^G = \{x \in X : g \cdot x = x, \forall g \in G\}$. 若 $X^G \neq \emptyset$, 则 $G \curvearrowright X^G$ 是平凡的.

定义 4.5.44 设 G 为群, 称作用 $G \curvearrowright X = G : (g, x) \mapsto gxg^{-1}$ 为共轭作用.

注记 4.5.45 (1) G 是 Abel 群 $\iff G \curvearrowright X$ 是平凡的. 故仅考虑非 Abel 群共轭作用.

(2) 共轭作用下的 x 的轨道即 G 中 x 所在的共轭类 C_x (定义 4.4.15).

定义 4.5.46 定义 $x \in G$ 的中心化子 $Z(x)$ 为 x 在共轭作用下的稳定化子, 即

$$Z(x) = \{g \in G : gx = xg\} \leq G.$$

注记 4.5.47 (1) $Z(G) \subset Z(x), (x) \subset Z(x), \forall x$.

(2) 定理 4.5.32 在共轭作用下可表述为 $|G| = |C_x||Z(x)|$. 特别地, $|C_x| \mid |G|$.

(3) $C_x = \{x\} \iff x \in Z(G) \iff Z(x) = G$.

例 4.5.48 在练习 4.4.40 中, 我们看到 A_4 中 $|C_{(123)}| = 4$. 这也可由注记 4.5.47 (2) 公式 $|G| = |C_x||Z(x)|$, 化为求 $Z((123)) = \{\sigma \in A_4 : \sigma(123)\sigma^{-1} = (123)\}$. 由引理 4.4.12,

$$\sigma(123)\sigma^{-1} = (\sigma(1)\sigma(2)\sigma(3)) = (123) \implies \sigma = \text{Id}, (123), (132).$$

$$\text{故 } |C_{(123)}| = \frac{|A_4|}{|Z((123))|} = \frac{12}{3} = 4.$$

由注记 4.5.47 (3) 可得

命题 4.5.49 (类等式) $|G| = |Z(G)| + \sum_{C_x : |C_x| > 1} |C_x|$.

注记 4.5.50 表 4.1, 4.2, 4.3 分别给出了 S_3, S_4, A_4 的类等式.

定义 4.5.51 设 p 为素数. 有限群 G 称为 p -群, 若 $|G| = p^n, n \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$.

注记 4.5.52 p -群未必是 Abel 群, 如练习 4.1.16 的 8 阶群 $\Sigma(\square)$ 是非 Abel 群.

命题 4.5.53 设 G 为非平凡的 p -群, 则 $Z(G) \neq \{1_G\}$.

证明 由命题 4.5.49 及注记 4.5.47 (2), $p \mid |Z(G)|$. □

注记 4.5.54 若 G 为非平凡 p -群, 由练习 4.3.6, 商群 $G/Z(G)$ 是阶数更小的 p -群, 可以此递归研究 p -群的结构. 下面的定理 4.5.55 与后面的例 5.3.6 (5) 即为二例.

定理 4.5.55 对任意非平凡 p -群 G , 存在 $H \triangleleft G$ 使得 $[G : H] = p$.

证明 设 $|G| = p^n$, 对 n 归纳. 由推论 4.2.12, $n = 1$ 时结论显然成立. 下设结论对 $k < n$ ($n \geq 2$) 成立. 由命题 4.5.53, $Z(G) \neq \{1_G\}$, 即 $Z(G)$ 亦为非平凡 p -群. 由定理 4.6.11, 存在 p 阶元 $a \in Z(G)$. 令 $H = \langle a \rangle \leq Z(G)$, 则 $H \triangleleft G$. 由于 $|G/H| = p^{n-1}$, 由归纳假设, G/H 有指数为 p 的正规子群, 由定理 4.3.21 与定理 4.3.22, 它对应于 G 中包含 H 的正规子群, 且由定理 4.3.22 给出的群同构可知此正规子群指数为 p . \square

命题 4.5.56 设 p 为素数, G 为 p^2 阶群, 则 G 为 Abel 群, 且 $G \simeq \mu_{p^2}$ 或 $G \simeq \mu_p \times \mu_p$.

证明 由命题 4.5.53, 可取 $g \in Z(G) \setminus \{1_G\}$. 由 $\text{ord}(g) \mid |G|$ 知 $\text{ord}(g) = p$ 或 p^2 .

◇ 若 $\text{ord}(g) = p^2$, 由命题 4.2.11 及命题 4.2.7, G 为循环群且 $G \simeq \mu_{p^2}$.

◇ 若 $\text{ord}(g) = p$, $H = \langle g \rangle \subset Z(G)$. 可取 $g' \in G \setminus H$, 并不妨设 $\text{ord}(g') = p$ (否则, $\text{ord}(g') = p^2$, $G \simeq \mu_{p^2}$). 记 $K = \langle g' \rangle$, 则由 $g \in Z(G)$ 可得 $KH = HK \leq G$. 由定理 4.1.18, $|HK| \mid |G|$, 但由 $H \subsetneq HK$ 知 $|HK| \geq p+1$, 因此 $|HK| = p^2$, $G = HK$ 为 Abel 群. 考虑群同态

$$H \times K \rightarrow G, \quad (h, k) \mapsto hk.$$

由 $HK = G$ 知这是满同态, 而 $|H \times K| = p^2 = |G|$, 因此这是群同构, $G \simeq H \times K$. 而 $H \times K \simeq \mu_p \times \mu_p$, 故 $G \simeq \mu_p \times \mu_p$. \square

练习 4.5.57 设 G 为群, p 是 $|G|$ 的最小素因子. 若 p 阶子群 $A \triangleleft G$, 则 $A \leq Z(G)$.

证明 因为 $A \triangleleft G$, 所以 G 在 A 上有共轭作用. 由此可得群同态

$$\rho : G \rightarrow S(A) = S_p.$$

注意到 $\text{Im } \rho \leq \text{Aut}(A) \simeq \text{Aut}(\mathbb{Z}_p) \simeq \mathbb{Z}_{p-1}$. 由定理 4.1.18, $|\text{Im } \rho| \mid (p-1)$. 另一方面, 由定理 4.3.16, $G/\text{Ker } \rho \simeq \text{Im } \rho$, 因此 $|\text{Im } \rho| \mid |G|$, 但 $|G|$ 的最小素因子是 p , 故 $|\text{Im } \rho| = 1$, 进而 $G = \text{Ker } \rho$. 这表明 $A \subset Z(G)$.

$\text{Aut}(\mathbb{Z}_p) \simeq \mathbb{Z}_{p-1}$ **补证** 注意到有群同构

$$\text{Aut}(\mathbb{Z}_p) \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}_p^\times, \quad f \mapsto f(\overline{1}).$$

由定理 4.2.14 知 \mathbb{Z}_p^\times 为循环群, 再由命题 4.2.7, $\mathbb{Z}_p^\times \simeq \mathbb{Z}_{p-1}$. 故 $\text{Aut}(\mathbb{Z}_p) \simeq \mathbb{Z}_{p-1}$. \square

例 4.5.58 设 $H \leq G$, 记 $X_H = \{H' \leq G : H' \text{ 共轭于 } H\} \ni H$, 则有共轭作用

$$G \curvearrowright X_H : (g, H') \mapsto gH'g^{-1}.$$

定义 H 的正规化子 $N_G(H)$ 为 H 在 $G \curvearrowright X_H$ 下的稳定化子, 即

$$N_G(H) = \{g \in G : gHg^{-1} = H\} = \{g \in G : gH = Hg\}.$$

◇ $H \triangleleft N_G(H) \leq G$.

◇ 定理 4.5.32 在共轭作用 $G \curvearrowright X_H$ 下可表述为 $|G| = |N_G(H)||X_H|$.

$$\diamond N_G(H) = G \iff H \triangleleft G \iff X_H = \{H\}.$$

例 4.5.59 共轭作用 $G \curvearrowright X = G$ 在 G 中元素 x 的轨道 (即共轭类) 上有限制作用 $G \curvearrowright C_x$. 例如 S_4 共轭作用于共轭类 (见表 4.2)

$$X = \{A = (12)(34), B = (13)(24), C = (14)(23)\}.$$

由此可得群同态

$$\rho : S_4 \rightarrow S(X) \simeq S_3.$$

由引理 4.4.12, 对 $\sigma \in S_4$,

$$\sigma A \sigma^{-1} = (\sigma(1)\sigma(2))(\sigma(3)\sigma(4)),$$

$$\sigma B \sigma^{-1} = (\sigma(1)\sigma(3))(\sigma(2)\sigma(4)),$$

$$\sigma C \sigma^{-1} = (\sigma(1)\sigma(4))(\sigma(2)\sigma(3)).$$

由此可计算得群同态 ρ 的如下信息:

像	纤维
Id	Id, (12)(34), (13)(24), (14)(23)
(12)	(14), (23), (1243), (1342)
(13)	(13), (24), (1234), (1432)
(23)	(12), (34), (1324), (1423)
(123)	(124), (132), (143), (234)
(132)	(123), (134), (142), (243)

特别地, ρ 为满射, 且 $\text{Ker } \rho = \{\text{Id}, A, B, C\} = K_4$ (见注记 4.4.25). 由定理 4.3.16, 有群同构

$$S_4/K_4 \simeq S_3.$$

练习 4.5.60 设 $G \curvearrowright X$ 可迁, $N \triangleleft G$, 则 X 在 N 作用下的每个轨道有同样多的元素.

证明 由于 $G \curvearrowright X$ 可迁, 存在 $a \in X$ 使 $X = Ga$. 对任意 $x \in X$, 设 $x = ga, g \in G$, 则

$$\begin{aligned} N_x &= \{n \in N : nx = x\} = \{n \in N : nga = ga\} \\ &= \{n \in N : g^{-1}ng \in G_a\} = N \cap gG_ag^{-1}. \end{aligned}$$

由于 $N \triangleleft G$, $N_x = N \cap gG_ag^{-1} = g(N \cap G_a)g^{-1} = gN_ag^{-1}$. 由定理 4.5.32,

$$|Nx| = \frac{|N|}{|N_x|} = \frac{|N|}{|gN_ag^{-1}|} = \frac{|N|}{|N_a|} = |Na|.$$

即 X 在 N 作用下的每个轨道有同样多的元素. □

4.6 Sylow 定理

定义 4.6.1 设 G 为 n 阶有限群, p 为素数. 设 $p^r \parallel n$, 满足 $|H| = p^r$ 的子群 H 称为 G 的 Sylow p -子群.

定理 4.6.2 (Sylow 定理) 设 G 为有限群, p 为任意素数.

- (1) G 含有 Sylow p -子群.
- (2) G 的任两个 Sylow p -子群 P, P' 皆共轭 (从而同构).
- (3) 设 $|G| = p^r m, p \nmid m$, 则 G 中 Sylow p -子群的个数是 m 的因子, 且形如 $kp + 1$.
- (4) 任意 p -子群 $H \leq G$ 皆包含于某个 Sylow p -子群.

注记 4.6.3 由 (2) 可知, G 中存在正规的 Sylow p -子群当且仅当 G 有唯一的 Sylow p -子群.

我们仅对 (1) 作出证明.

证明 (1) 设 $|G| = p^r m, p \nmid m$, 考虑

$$X = \{U \subset G : |U| = p^r\} \subset \mathcal{P}(G).$$

由例 4.5.12 (3) 的左正则作用与例 4.5.6, 有群作用 $G \curvearrowright \mathcal{P}(G) : (g, U) \mapsto gU$, 而 $|gU| = |U|$, 故此作用可限制在 X 上, 得到 $G \curvearrowright X : (g, U) \mapsto gU$. 由于

$$|X| = \binom{p^r m}{p^r} = \frac{p^r m (p^r m - 1) \cdots (p^r m - p^r + 1)}{p^r (p^r - 1) \cdots 1},$$

注意到 i 与 $p^r m - p^r + i$ 所含 p 的幂次相同 ($1 \leq i \leq p^r$), 因此 $p \nmid |X|$. 设 X 有 G -轨道分解 $X = \bigsqcup_U \mathcal{O}_U$, 则存在 $U \in X$ 使得 $p \nmid |\mathcal{O}_U|$. 由定理 4.5.32, $|G_U| |\mathcal{O}_U| = |G| = p^r m$, 因此 $|G_U| = p^r m'$, 其中 $m' \mid m$. 另一方面, 按定义 $G_U = \{g \in G : gU = U\}$, 因此另有群作用 $G_U \curvearrowright U : (g, u) \mapsto gu$. 由于此作用是自由的, 由注记 4.5.38, $|G_U| \mid |U| = p^r$. 故 $m' = 1, |G_U| = p^r$ 即为所求. \square

以下再给出定理 4.6.2 (1) 的另一个证明, 此证明依赖于下述引理:

引理 4.6.4 设 G 为有限群, $H \leq G$. 若 G 有 Sylow p -子群 S , 则 H 亦有 Sylow p -子群. 更具体地, 存在 $g \in G$ 使 $gSg^{-1} \cap H$ 为 H 的 Sylow p -子群.

证明 考虑左诱导作用 $H \curvearrowright (G/S) : (h, gS) \mapsto hgS$. 由于 S 为 Sylow p -子群, 因此 $p \nmid |G/S|$, 此作用有某个轨道 \mathcal{O}_{gS} , 满足 $p \nmid |\mathcal{O}_{gS}|$. 由定理 4.5.32, $|H| = |\mathcal{O}_{gS}| |H_{gS}|$, 因此 $|H|$ 与 $|H_{gS}|$ 所含 p 的幂次相同. 而

$$H_{gS} = \{h \in H : hgS = gS\} = \{h \in H : g^{-1}hg \in S\} = \{h \in H : h \in gSg^{-1}\} = gSg^{-1} \cap H,$$

由 $H_{gS} \leq gSg^{-1}$ 知 H_{gS} 为 p -群, 又 $|H|$ 与 $|H_{gS}|$ 所含 p 的幂次相同, 故 H_{gS} 为 H 的 Sylow p -子群. \square

以下便是定理 4.6.2 (1) 的另证.

证明 设 $n = |G| = p^r m$. 由例 4.5.12 (3) 的左正则作用可得群嵌入 $G \hookrightarrow S(G) \simeq S_n$. 而 S_n 亦可嵌入 $\text{GL}(n, \mathbb{F}_p)$ 中: $\sigma \in S_n, (\mathbf{e}_i)_{1 \leq i \leq n}$ 是 \mathbb{F}_p^n 的基, 我们将 σ 映为线性变换 $\mathbf{e}_i \mapsto \mathbf{e}_{\sigma(i)}$ 对应的方阵. 注意到

$$|\text{GL}(n, \mathbb{F}_p)| = (p^n - 1)(p^n - p) \cdots (p^n - p^{n-1}) \quad (\text{逐行考虑}),$$

其中 p 的幂次为 $1 + 2 + \cdots + (n-1) = \frac{n(n-1)}{2}$. 考虑对角线上元素均为 1 的上三角方阵的集合 H , 则 $H \leq \text{GL}(n, \mathbb{F}_p)$ 且 $|H| = p^{\frac{n(n-1)}{2}}$, 因此 H 为 $\text{GL}(n, \mathbb{F}_p)$ 的 Sylow p -子群. 由于 $G \hookrightarrow S_n \hookrightarrow \text{GL}(n, \mathbb{F}_p)$, 由引理 4.6.4 即知 G 有 Sylow p -子群. \square

例 4.6.5 考虑 S_4 , $|S_4| = 3^1 \cdot 2^3$.

(Sylow 3-子群) 由推论 4.2.12 与表 4.2 易见即为如下 4 个 3 阶子群.

$$\{\text{Id}, (123), (132)\}, \quad \{\text{Id}, (124), (142)\}, \quad \{\text{Id}, (134), (143)\}, \quad \{\text{Id}, (234), (243)\}.$$

(Sylow 2-子群) 由例 4.4.33 可知 S_4 无 8 阶正规子群, 再由注记 4.6.3 即得 S_4 的 Sylow 2-子群个数 > 1 , 根据定理 4.6.2 (3) 即知 S_4 恰有 3 个 Sylow 2-子群. 由定理 4.6.2 (4), Klein 四元群 K_4 包含于某个 Sylow 2-子群, 而由练习 4.4.24 的解答 (4) 知 $K_4 \triangleleft S_4$, 它对共轭封闭, 因此由定理 4.6.2 (2) 即知 K_4 包含于 S_4 的所有 Sylow 2-子群. 由定理 4.6.2 (2) 及定理 4.4.19, 这 3 个子群分别包含 K_4 , 2 个 $1^2 2^1$ 型置换与 2 个 4^1 型置换. 注意到两个相交对换之积是 3-轮换, 但 8 阶群不含 3-轮换, 因此每个子群中恰含有 2 个不相交对换. 最后由 2^2 型置换与对换之积生成 4-轮换. 结果如下:

$$\begin{aligned} \{\text{Id}, (12)(34), (13)(24), (14)(23), (12)(34), (1324), (1423)\} &= (K_4, (12)), \\ \{\text{Id}, (12)(34), (13)(24), (14)(23), (13)(24), (1234), (1432)\} &= (K_4, (13)), \\ \{\text{Id}, (12)(34), (13)(24), (14)(23), (14)(23), (1243), (1342)\} &= (K_4, (14)). \end{aligned}$$

这与练习 4.4.24 一致.

例 4.6.6 考虑 A_4 , $|A_4| = 3^1 \cdot 2^2$.

(Sylow 3-子群) 由推论 4.2.12 与表 4.3 易见即为如下 4 个 3 阶子群.

$$\{\text{Id}, (123), (132)\}, \quad \{\text{Id}, (124), (142)\}, \quad \{\text{Id}, (134), (143)\}, \quad \{\text{Id}, (234), (243)\}.$$

(Sylow 2-子群) 由表 4.3 可知 K_4 是 A_4 的 2 个共轭类之并, 因此 $K_4 \triangleleft A_4$. 由注记 4.6.3, K_4 是 A_4 唯一的 Sylow 2-子群.

命题 4.6.7 35 阶群必同构于 \mathbb{Z}_{35} .

证明 设 G 为 35 阶群, 由定理 4.6.2 (2) 即知 G 有唯一的 5 阶子群 P 和 7 阶子群 Q , 再由注记 4.6.3, $P \triangleleft G, Q \triangleleft G$. 由推论 4.2.12, $P \simeq \mathbb{Z}_5, Q \simeq \mathbb{Z}_7$, 进而 $P \cap Q = \{1_G\}$. 由练习 4.3.28, $pq = qp, \forall p \in P, q \in Q$. 由此可验证映射

$$P \times Q \rightarrow G, \quad (p, q) \mapsto pq$$

是群同态 (由可换性), 且是单的, 进而为群同构, $G \simeq P \times Q \simeq \mathbb{Z}_5 \times \mathbb{Z}_7$. 由练习 4.1.35, 对 $(\bar{1}, \bar{1}) \in \mathbb{Z}_5 \times \mathbb{Z}_7$, $\text{ord}(\bar{1}, \bar{1}) = \text{lcm}(5, 7) = 35$. 再由命题 4.2.11 知 G 为循环群, 由命题 4.2.7 即得 $G \simeq \mathbb{Z}_{35}$. \square

命题 4.6.8 108 阶群总不是单群.

证明 设群 G 满足 $|G| = 108 = 2^2 \cdot 3^3$. 由定理 4.6.2 (1) 即知 G 有 27 阶子群 H . 由例 4.5.12 (1), 有左诱导作用 $G \curvearrowright (G/H) : (g, aH) \mapsto gaH$, 因此存在群同态 $\rho : G \rightarrow S(G/H)$. 由定理 4.3.16, $G/\text{Ker } \rho \simeq \text{Im } \rho$, 而 $\text{Im } \rho \neq \{\text{Id}\}$, 因此 $\text{Ker } \rho \triangleleft G$. 又 $|\text{Im } \rho| \leq |S(G/H)| = |S_4| = 24$, 因此 $|\text{Ker } \rho| \neq 1, \text{Ker } \rho \neq \{1_G\}$. 故 $\text{Ker } \rho$ 是 G 的非平凡正规子群, 即 G 非单群. \square

命题 4.6.9 设 G 为有限 Abel 群, $|G| = p_1^{s_1} \cdots p_r^{s_r}$, 其中 p_1, \cdots, p_r 为互异的素数. 则 G 的 Sylow p_i -子群 P_i 唯一 ($1 \leq i \leq r$), 且 $G \simeq P_1 \times \cdots \times P_r$.

证明 由于 G 的 Sylow p_i -子群是 Abel 群, 在共轭作用下不变, 由定理 4.6.2 (2) 即知唯一性. 由 P_i ($1 \leq i \leq r$) 均为 Abel 群可知映射

$$P_1 \times \cdots \times P_r \rightarrow G, \quad (g_1, \cdots, g_r) \mapsto g_1 \cdots g_r$$

是群同态. 记 $H = P_1 \cdots P_r \leq G$, 则 $P_i \leq H$ ($1 \leq i \leq r$), 由定理 4.1.18, $p_i^{s_i} \mid |H|$ ($1 \leq i \leq r$), 而 $|H| \mid |G| = p_1^{s_1} \cdots p_r^{s_r}$, 因此 $H = G$. 故上述群同态是满的, 进而为群同构, $G \simeq P_1 \times \cdots \times P_r$. \square

注记 4.6.10 有限 Abel 群的结构问题归结于 Abel p -群的结构问题.

定理 4.6.11 (Cauchy 定理) 设 G 为有限群, 素数 $p \mid |G|$, 则 G 中存在 p 阶元, 即 G 含有 p 阶子群.

证明 由定理 4.6.2 (1), G 含有 Sylow p -子群 P , 设 $|P| = p^r$. 任取 $g \in G \setminus \{1_G\}$, 则 $\text{ord}(g) = p^s$, 其中 $1 \leq s \leq r$. 此时 $\text{ord}(g^{p^{s-1}}) = p$. \square

练习 4.6.12 设 G 是一个 n 阶群, 素数 $p \mid n$. 证明: 方程 $x^p = 1$ 在群 G 中解的个数是 p 的倍数.

练习 4.6.13 设 N 是有限群 G 的一个正规子群. 若 p 和 $|G/N|$ 互素, 则 N 包含 G 的所有 Sylow p -子群.

练习 4.6.14 设 G 为有限群, $N \triangleleft G$, P 是 G 的一个 Sylow p -子群. 证明:

- (1) $N \cap P$ 是 N 的 Sylow p -子群.
- (2) PN/N 是 G/N 的 Sylow p -子群.
- (3) $(N_G(P)N)/N \simeq N_{G/N}(PN/N)$.

练习 4.6.15 设 P 是 G 的 Sylow p -子群, $N_G(P) \triangleleft G$. 证明: $P \triangleleft G$.

4.7 自由群与群的展示

定义 4.7.1 考虑非空集合 X , 添加其形式逆 $X^{-1} = \{x^{-1} : x \in X\}$, 称 $X \sqcup X^{-1}$ 为字母集.

- (1) 定义字 $w = x_1 x_2 \cdots x_n$, 其中 $x_i \in X \sqcup X^{-1}$. 称两个字相等, 若相应位置完全相等. 若 $n = 0$ 则称为空字, 记为 1.
- (2) 称字是既约的, 若 $x_i \neq x_{i+1}^{-1}, \forall i$.

注记 4.7.2 每个字均能约化为唯一的既约字.

定义 4.7.3 定义集合 X 上的自由群 $\mathbf{F}(X) = \{\text{以 } X \sqcup X^{-1} \text{ 为字母表得到的字}\}$, 其上的乘法定义为字的连接并约化, 幺元为空字 1, 求逆操作为 $(x_1 x_2 \cdots x_n)^{-1} = x_n^{-1} \cdots x_2^{-1} x_1^{-1}$. 若 $|X| < +\infty$, 则称 $\mathbf{F}(X)$ 为有限生成自由群.

例 4.7.4 若 $X = \{a\}$, 则 $\mathbf{F}(X) = \{1, a^k, a^{-k}, k \geq 1\} \simeq \mathbb{Z}$.

例 4.7.5 若 $X = \{a, b\}$, 则 $\mathbf{F}(X)$ 中长度为 0 的字有 1 个, 长度为 1 的字有 4 个, 长度为 2 的字有 $4 \cdot 3$ 个, 长度为 3 的字有 $4 \cdot 3^2$ 个……

约定 4.7.6 有时将 $\mathbf{F}(\{x_1, \cdots, x_n\})$ 简记为 $\mathbf{F}(x_1, \cdots, x_n)$.

命题 4.7.7 (自由群的泛性质) 设 G 为群, X 为集合, 则任意映射 $f: X \rightarrow G$ 可唯一延拓为群同态 $\tilde{f}: \mathbf{F}(X) \rightarrow G$, 使得下图交换:

$$\begin{array}{ccc} & & G \\ & \nearrow f & \uparrow \tilde{f} \\ X & & \\ & \searrow \text{inc} & \downarrow \\ & & \mathbf{F}(X) \end{array}$$

命题 4.7.8 任何群 G 均为自由群的商群.

证明 在命题 4.7.7 中取 $X = G$ 即得群的满同态 $\rho: \mathbf{F}(G) \rightarrow G$. 由定理 4.3.16 即知 $\mathbf{F}(G)/\text{Ker } \rho \simeq G$. \square

定义 4.7.9 群 G 的有限展示是指

$$G = \langle x_1, \dots, x_n \mid r_1, \dots, r_m \rangle, \quad r_i \in \mathbf{F}(x_1, \dots, x_n).$$

这里等号右边意指

$$\mathbf{F}(x_1, \dots, x_n)/N(r_1, \dots, r_m),$$

其中 $N(r_1, \dots, r_m)$ 为包含 r_1, \dots, r_m 的 $\mathbf{F}(x_1, \dots, x_n)$ 的最小正规子群. 称 x_i 为生成元, r_i 为生成关系.

注记 4.7.10 由于在商映射下 r_1, \dots, r_m 的像均为 1_G , 有时也记

$$G = \langle x_1, \dots, x_n \mid r_1 = 1, \dots, r_m = 1 \rangle.$$

命题 4.7.11 在定义 4.7.9 中, $N(r_1, \dots, r_m)$ 是由 $\{\omega r_i \omega^{-1} : \omega \in \mathbf{F}(x_1, \dots, x_n), 1 \leq i \leq m\}$ 生成的子群.

例 4.7.12 $\langle x \mid x^n \rangle \simeq \mu_n = \{1, \omega, \dots, \omega^{n-1}\}$, 其中 $\omega = e^{\frac{2\pi i}{n}}$. 这有两种看法:

(看法一) 由例 4.7.4 知 $\mathbf{F}(x) \simeq \mathbb{Z}$ 为循环群, 因此 $\mathbf{F}(x)$ 的子群均正规, $N(x^n) \simeq n\mathbb{Z}$. 故 $\langle x \mid x^n \rangle = \mathbf{F}(x)/N(x^n) \simeq \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \simeq \mu_n$.

(看法二) 设 $f: \{x\} \rightarrow \mu_n, x \mapsto \omega$. 由命题 4.7.7, f 可唯一延拓为群同态

$$\begin{aligned} \tilde{f}: \mathbf{F}(x) &\rightarrow \mu_n \\ x^m &\mapsto \omega^m. \end{aligned}$$

由 $\tilde{f}(x^n) = \omega^n = 1$ 可知 $N(x^n) \subset \text{Ker } \tilde{f}$. 由定理 4.3.16, $\mathbf{F}(x)/N(x^n) \twoheadrightarrow \mathbf{F}(x)/\text{Ker } \tilde{f} \simeq \mu_n$. 又 $|\mathbf{F}(x)/N(x^n)| = n = |\mu_n|$, 因此 $\langle x \mid x^n \rangle = \mathbf{F}(x)/N(x^n) \simeq \mu_n$.

命题 4.7.13 (泛性质) 设 $G = \langle x_1, \dots, x_n \mid r_1, \dots, r_m \rangle$, H 为群, 则映射 $f: X = \{x_1, \dots, x_n\} \rightarrow H$ 可(唯一)延拓至群同态 $G \rightarrow H$ 当且仅当元素 $f(x_i) \in H$ 满足关系 r_i ($1 \leq i \leq m$).

证明 (\Rightarrow) 是显然的, 下证 (\Leftarrow) . 由命题 4.7.7, f 可唯一延拓为群同态

$$\begin{aligned} \phi: \mathbf{F}(X) &\rightarrow H \\ x_i &\mapsto f(x_i). \end{aligned}$$

由于 $f(x_i) \in H$ 满足关系 r_i , 因此 $\phi(r_i) = 1_H$ ($1 \leq i \leq m$), $N(r_1, \dots, r_m) \leq \text{Ker } \phi$. 由定理 4.3.16,

$$G = \mathbf{F}(X)/N(r_1, \dots, r_m) \twoheadrightarrow \mathbf{F}(X)/\text{Ker } \phi \simeq \text{Im } \phi \xrightarrow{\text{inc}} H. \quad \square$$

例 4.7.14 考虑 $S_3 = \{\text{Id}, (12), (13), (23), (123), (132)\}$ 与 $G = \langle a, b \mid a^2, b^2, (ab)^3 \rangle$. 注意到 $(12)(13) = (123)$, 因此由 $(12), (13)$ 生成的群阶为 6 的倍数, 进而 $S_3 = ((12), (13))$. 考虑映射

$$f: \{a, b\} \rightarrow S_3, \quad a \mapsto (12), \quad b \mapsto (13),$$

由命题 4.7.13, f 可延拓为群的满同态 $\tilde{f}: G \twoheadrightarrow S_3$, 故 $|G| \geq |S_3| = 6$. 观察到 G 中有如下辫子关系 (参考笔记 4.4.28):

$$\boxed{a^2 = 1} \quad \boxed{b^2 = 1} \\ ababab = 1 \implies abab^{-1}a^{-1}b^{-1} = 1 \implies \boxed{aba = bab}$$

这里的 a, b 实为商群中的 \bar{a}, \bar{b} . 因此 G 中的元素共有以下三类 (注意 $a^{-1} = a, b^{-1} = b$):

- ◇ 1.
- ◇ 第一位为 a : a, ab, aba (往后 $abab = babb = ba, \dots$).
- ◇ 第一位为 b : b, ba, bab (往后 $baba = abaa = ab, \dots$).

于是 $|G| \leq 6$, 从而 $|G| = 6, G \simeq S_3$.

练习 4.7.15 在例 4.7.14 中, G 另有展示 $G = \langle a, b \mid a^2, b^2, abab^{-1}a^{-1}b^{-1} \rangle$.

例 4.7.16 正 n 边形的对称群 D_n (称为二面体群) 阶为 $2n$ (n 个旋转与 n 个镜面对称), 有展示

$$D_n \simeq \langle x, y \mid x^n, y^2, (xy)^2 \rangle.$$

练习 4.7.17 另有展示 $D_n \simeq \langle s, t \mid s^2, t^2, (st)^n \rangle$. 因此当 $n = 3$ 时, 我们得到 $D_3 \simeq S_3$ (参考例 4.7.14).

群的展示可用来构造群的同态, 以下是构造群同态 $D_4 \hookrightarrow S_4$ 的例子 (参考例 4.4.23).

例 4.7.18 由例 4.7.16, $D_4 = \langle x, y \mid x^4, y^2, (xy)^2 \rangle$. 定义映射 ϕ 满足 $\phi(x) = (1234), \phi(y) = (13)$, 则

$$\phi(x)^4 = \text{Id}, \quad \phi(y)^2 = \text{Id}, \quad [\phi(x)\phi(y)]^2 = [(14)(23)]^2 = \text{Id}.$$

由命题 4.7.13, ϕ 可延拓为群同态 $\tilde{\phi}: D_4 \rightarrow S_4$. 由 $(1234) \in \text{Im } \tilde{\phi}$ 可知 $|\text{Im } \tilde{\phi}| \geq 4$, 又 $(13) \in \text{Im } \tilde{\phi} \setminus ((1234))$, 因此 $|\text{Im } \tilde{\phi}| > 4$. 而 $|\text{Im } \tilde{\phi}| = |D_4 / \text{Ker } \tilde{\phi}|$ 是 $|D_4| = 8$ 的因子, 因此 $|\text{Im } \tilde{\phi}| = 8, |\text{Ker } \tilde{\phi}| = 1$. 从而 $D_4 \simeq \text{Im } \tilde{\phi} \hookrightarrow S_4$.

例 4.7.19 (四元数代数) 考虑以 $1, i, j, k$ 为基的实向量空间 $\mathbb{H} := \mathbb{R}1 \oplus \mathbb{R}i \oplus \mathbb{R}j \oplus \mathbb{R}k$. 其上具有良定的乘法使得 \mathbb{H} 成环并满足:

- ◇ 乘法 $(x, y) \mapsto xy$ 是 \mathbb{H} 上的双线性映射.
- ◇ 1 是乘法单位元.
- ◇ $i^2 = j^2 = -1$.
- ◇ $ij = k = -ji$.

由此可以推导出 $k^2 = -1, jk = i = -kj, ki = j = -ik$. \mathbb{H} 是非交换可除环 (体). 考虑四元数群

$$Q_8 = \{\pm 1, \pm i, \pm j, \pm k\} \leq \mathbb{H}^\times,$$

可知 $|Q_8| = |D_4|$, 但 $Q_8 \not\simeq D_4$, 因为 Q_8 中每个元素均为 4 阶元.

练习 4.7.20 $Q_8 \simeq \langle a, b \mid a^4, a^2b^{-2}, bab^{-1}a \rangle = \langle a, b \mid a^4 = 1, b^2 = a^2, ba = a^3b \rangle$. [提示] $a \mapsto j, b \mapsto i$.

练习 4.7.21 设 $D_\infty = \langle s, t \mid s^2, t^2 \rangle$. 问是否有 $|D_\infty| = +\infty$?

4.8 有限生成 Abel 群

约定 4.8.1 两加法群 A, B 的直积通常记为直和 $A \oplus B = A \times B$.

例 4.8.2 秩 n 的自由 Abel 群 $\mathbb{Z}^n = \mathbb{Z} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}$ 有标准基 $(\mathbf{e}_i)_{1 \leq i \leq n}$.

定义 4.8.3 设 A 是加法群, 有限集合 $S \subset A$ 称为 A 的有限基, 若

- (1) S 生成 A .
- (2) S 是 \mathbb{Z} -线性无关的.

注记 4.8.4 不是所有的加法群都有基, 如 \mathbb{Z}_n 就没有基, 因为对任意 $v \in \mathbb{Z}_n, nv = \bar{0}$.

命题 4.8.5 (\mathbb{Z}^n 的泛性质) 对任意加法群 A 与 $v_1, \dots, v_n \in A$, 存在唯一的群同态 $f: \mathbb{Z}^n \rightarrow A$ 使得 $f(\mathbf{e}_i) = v_i (1 \leq i \leq n)$.

命题 4.8.6 $\mathbb{Z}^n \simeq \langle x_1, \dots, x_n \mid x_i x_j x_i^{-1} x_j^{-1}, \forall i \neq j \rangle = \langle x_1, \dots, x_n \mid x_i x_j = x_j x_i, \forall i \neq j \rangle$.

证明 构造映射 $f: \{x_1, \dots, x_n\} \rightarrow \mathbb{Z}^n, x_i \mapsto \mathbf{e}_i$, 则 $f(x_i) + f(x_j) = f(x_j) + f(x_i), \forall i \neq j$. 由命题 4.7.13, f 可唯一延拓为群同态 $\tilde{f}: G \rightarrow \mathbb{Z}^n$.

◇ 由于 $\tilde{f}(x_1^{a_1} \cdots x_n^{a_n}) = a_1 \mathbf{e}_1 + \cdots + a_n \mathbf{e}_n = (a_1, \dots, a_n)$, \tilde{f} 是满射.

◇ 若 $\tilde{f}(x_1^{a_1} \cdots x_n^{a_n}) = \mathbf{0}$, 则 $a_1 = \cdots = a_n = 0$, 因此 \tilde{f} 为单射.

故 \tilde{f} 为群同构, $\mathbb{Z}^n \simeq \langle x_1, \dots, x_n \mid x_i x_j = x_j x_i, \forall i \neq j \rangle$. □

注记 4.8.7 自由 Abel 群 \mathbb{Z}^n 是自由群当且仅当 $n = 1$.

命题 4.8.8 有限生成 Abel 群 A 是自由 Abel 群当且仅当 A 有一组基.

命题 4.8.9 设 A 为有限生成 Abel 群, 则存在正整数 n 与 $K \leq \mathbb{Z}^n$, 使得 $A \simeq \mathbb{Z}^n / K$.

证明 取 A 的一个生成元集 $S = \{v_1, \dots, v_n\}$, 定义映射 $f: \{x_1, \dots, x_n\} \rightarrow S, x_i \mapsto v_i$, 则 $f(x_i) + f(x_j) = f(x_j) + f(x_i), \forall i \neq j$. 由命题 4.7.13 与命题 4.8.6, f 可唯一延拓为群同态 $\tilde{f}: \mathbb{Z}^n \rightarrow A$. 由定理 4.3.16, $\mathbb{Z}^n / \text{Ker } \tilde{f} \simeq A$. □

例 4.8.10 \mathbb{Z}_n 可由 $\{\bar{1}\}$ 生成, $\mathbb{Z}_n \simeq \mathbb{Z} / n\mathbb{Z}$.

命题 4.8.11 设 $K \leq \mathbb{Z}^n$, 则 K 是有限生成的.

证明 对 n 归纳.

◇ 当 $n = 1$ 时, 由命题 4.2.8 (1), \mathbb{Z} 的子群形如 $d\mathbb{Z}$, 其中 $d \geq 0$, 它是循环群, 因此是有限生成的.

◇ 当 $n = 2$ 时, 由 $K \leq \mathbb{Z}^2$ 知 $(K \cap \mathbb{Z}\mathbf{e}_1) \leq \mathbb{Z}\mathbf{e}_1 \simeq \mathbb{Z}$, 由命题 4.2.8 (1), $K \cap \mathbb{Z}\mathbf{e}_1$ 为循环群. 由定理 4.3.23 (3) 得

$$K / (K \cap \mathbb{Z}\mathbf{e}_1) \simeq (\mathbb{Z}\mathbf{e}_1 + K) / \mathbb{Z}\mathbf{e}_1 \leq \mathbb{Z}^2 / \mathbb{Z}\mathbf{e}_1 \simeq \mathbb{Z}\mathbf{e}_2,$$

因此 $K / (K \cap \mathbb{Z}\mathbf{e}_1)$ 是循环群, 再由下面的练习 4.8.12 知 K 是有限生成的.

◇ 余下情形类似. □

练习 4.8.12 设 G 为群, $N \triangleleft G$ 是有限生成的, 且 G/N 也是有限生成的. 证明: G 是有限生成的.

证明 设 $\{\bar{g}_1, \dots, \bar{g}_n\}$ 是 G/N 的生成元集, 其中 $g_1, \dots, g_n \in G$, 又设 $\{h_1, \dots, h_m\}$ 是 N 的生成元集. 由 $G = (g_1, \dots, g_n)N = (g_1, \dots, g_n)(h_1, \dots, h_m)$ 知 $(g_i h_j : 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m)$ 是 G 的生成元集. □

命题 4.8.13 存在双射

$$M_{n \times m}(\mathbb{Z}) \xrightarrow{1:1} \text{Hom}(\mathbb{Z}^m, \mathbb{Z}^n), \quad A \mapsto \phi_A,$$

其中

$$\begin{aligned} \phi_A : \mathbb{Z}_{\text{col}}^m &\rightarrow \mathbb{Z}_{\text{col}}^n \\ \mathbf{v} &\mapsto A\mathbf{v}. \end{aligned}$$

命题 4.8.14 若 $\mathbb{Z}^n \simeq \mathbb{Z}^m$, 则 $n = m$.

证明 沿用命题 4.8.13 中的记号, 存在 $A \in M_{m \times n}(\mathbb{Z})$ 与 $B \in M_{n \times m}(\mathbb{Z})$ 使得 $\phi_A \in \text{Hom}(\mathbb{Z}^n, \mathbb{Z}^m)$, $\phi_B \in \text{Hom}(\mathbb{Z}^m, \mathbb{Z}^n)$, 且 $\phi_B \circ \phi_A = \text{Id}_{\mathbb{Z}^n}$, $\phi_A \circ \phi_B = \text{Id}_{\mathbb{Z}^m}$, 也即 $AB = I_m$, $BA = I_n$. 于是 $n = \text{tr}(BA) = \text{tr}(AB) = m$. □

定义 4.8.15 设 $f: A \rightarrow B$ 是 Abel 群之间的同态, 则称商群 $B/\text{Im } f$ 为 f 的余核, 记作 $\text{Coker } f$.

注记 4.8.16 与核是用来刻画同态的单性 ($\text{Ker } f = 1 \iff f$ 是单射) 相对应, 余核是用来刻画同态的满性 ($\text{Coker } f = 1 \iff f$ 是满射).

命题 4.8.17 设 G 为有限生成 Abel 群, 则存在整数矩阵 A , 使得 $G \simeq \text{Coker}(\phi_A)$.

证明 由命题 4.8.9, 存在 $K \leq \mathbb{Z}^n$ 使得 $G \simeq \mathbb{Z}^n/K$, 再由命题 4.8.11, K 是有限生成的, 故存在 $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_m \in K$ 使得 $K = \mathbb{Z}\mathbf{v}_1 + \dots + \mathbb{Z}\mathbf{v}_m$. 取 $A = (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_m) \in M_{n \times m}(\mathbb{Z})$, 则 $\text{Im}(\phi_A) = K$, 得证. □

下面考虑可逆整方阵 $\text{GL}(n, \mathbb{Z}) = \{A \in M_n(\mathbb{Z}) : \det(A) = \pm 1\}$.

练习 4.8.18 设 $A \in M_n(\mathbb{Z})$, 则 $A \in \text{GL}(n, \mathbb{Z}) \iff \phi_A \in \text{Aut}(\mathbb{Z}^n)$.

定义 4.8.19 称 $A, B \in M_{n \times m}(\mathbb{Z})$ 为 \mathbb{Z} -相抵的, 若存在 $P \in \text{GL}(n, \mathbb{Z})$ 与 $Q \in \text{GL}(m, \mathbb{Z})$ 使得 $B = PAQ$.

注记 4.8.20 \mathbb{Z} -相抵是 $M_{n \times m}$ 上的等价关系.

命题 4.8.21 设 $A, B \in M_{n \times m}(\mathbb{Z})$ 是 \mathbb{Z} -相抵的, 则 $\text{Coker}(\phi_A) \simeq \text{Coker}(\phi_B)$.

证明 设 $B = P^{-1}AQ$, 其中 $P \in \text{GL}(n, \mathbb{Z})$, $Q \in \text{GL}(m, \mathbb{Z})$, 则有如下左半交换图 ($\phi_A \circ \phi_Q = \phi_P \circ \phi_B$):

$$\begin{array}{ccccc} \mathbb{Z}^m & \xrightarrow{\phi_A} & \mathbb{Z}^n & \xrightarrow{\text{can}} & \text{Coker}(\phi_A) \\ \uparrow \phi_Q & & \uparrow \phi_P & & \uparrow \wr \\ \mathbb{Z}^m & \xrightarrow{\phi_B} & \mathbb{Z}^n & \xrightarrow{\text{can}} & \text{Coker}(\phi_B) \end{array}$$

由此可见 $\phi_P(\text{Im}(\phi_B)) = \text{Im}(\phi_A)$, 由练习 4.3.25 即得 $\mathbb{Z}^n/\text{Im}(\phi_B) \simeq \mathbb{Z}^n/\text{Im}(\phi_A)$. □

定理 4.8.22 (Smith 标准形) 设 $A \in M_{n \times m}(\mathbb{Z})$, 则存在 $P \in \text{GL}(n, \mathbb{Z})$ 与 $Q \in \text{GL}(m, \mathbb{Z})$ 使得

$$P^{-1}AQ = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_r, O),$$

其中 $r = \text{rank}(A)$, 正整数 $d_1 \mid d_2 \mid \cdots \mid d_r$.

例 4.8.23 $A := \begin{pmatrix} 2 & 4 \\ 6 & 5 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 2 & 4 \\ 0 & 7 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 7 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 7 & 7 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 1 & 7 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 7 \\ 2 & 0 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 14 \end{pmatrix} =: B$. 由命题 4.8.21, $\text{Coker}(\phi_A) \simeq \text{Coker}(\phi_B)$, 即

$$\mathbb{Z}^2 / \left\{ \begin{pmatrix} 2a+4b \\ 6a+5b \end{pmatrix} : a, b \in \mathbb{Z} \right\} \simeq \mathbb{Z}^2 / (\mathbb{Z} \times 14\mathbb{Z}) \simeq (\mathbb{Z}/\mathbb{Z}) \times (\mathbb{Z}/14\mathbb{Z}) \simeq \{0\} \times \mathbb{Z}_{14} \simeq \mathbb{Z}_{14}.$$

其中第二处同构用到了练习 4.8.24.

练习 4.8.24 设 G_1, G_2 为群, $N_1 \triangleleft G_1, N_2 \triangleleft G_2$, 则 $(N_1 \times N_2) \triangleleft (G_1 \times G_2)$, 且 $(G_1 \times G_2)/(N_1 \times N_2) \simeq (G_1/N_1) \times (G_2/N_2)$.

定理 4.8.25 (有限生成 Abel 群结构定理) 设 G 为有限生成 Abel 群, 则存在群同构

$$G \simeq (\mathbb{Z}_{d_1} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{d_r}) \oplus \mathbb{Z}^s,$$

其中 $s \geq 0$, 正整数 $d_1 \mid \cdots \mid d_r$ 称为 G 的不变因子. 特别地, 当 G 为有限群时, $s = 0$, 从而

$$G \simeq \mathbb{Z}_{d_1} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{d_r}.$$

证明 由命题 4.8.17, 存在 $A \in M_{n \times m}(\mathbb{Z})$ 使得 $G \simeq \text{Coker}(\phi_A)$. 设 A 相抵于 $B = \text{diag}(d_1, \dots, d_r, 0)$, 由命题 4.8.21 与练习 4.8.24,

$$\text{Coker}(\phi_A) \simeq \text{Coker}(\phi_B) = \mathbb{Z}^n / (d_1\mathbb{Z} \times \cdots \times d_r\mathbb{Z} \times 0\mathbb{Z} \times \cdots \times 0\mathbb{Z}) \simeq (\mathbb{Z}/d_1\mathbb{Z}) \times \cdots \times (\mathbb{Z}/d_r\mathbb{Z}) \times \mathbb{Z}^{n-r},$$

记 $s = n - r$, 则

$$G \simeq (\mathbb{Z}_{d_1} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{d_r}) \oplus \mathbb{Z}^s. \quad \square$$

推论 4.8.26 设 $A \in M_n(\mathbb{Z})$, 则 $\text{Coker}(\phi_A)$ 有限当且仅当 $\det(A) \neq 0$. 此时, $|\text{Coker}(\phi_A)| = |\det(A)|$.

推论 4.8.27 设 $K \leq \mathbb{Z}^n$, 则

(1) 存在 \mathbb{Z}^n 的一组基 $\{\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n\}$, 以及正整数 $d_1 \mid d_2 \mid \cdots \mid d_r$, 使得 $\{d_1\mathbf{e}_1, \dots, d_r\mathbf{e}_r\}$ 恰为 K 的基. 特别地, K 是自由 Abel 群, $\text{rank}(A) = r \leq n$.

(2) $\mathbb{Z}^n/K \simeq \mathbb{Z}_{d_1} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{d_r} \oplus \mathbb{Z}^{n-r}$.

证明 取 K 的一个生成元集 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_m\} \subset \mathbb{Z}^n$, 令 $A = (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_m)$, 其 Smith 标准形为 $B = P^{-1}AQ = \text{diag}(d_1, \dots, d_r, 0)$, 其中 $P \in \text{GL}(n, \mathbb{Z}), Q \in \text{GL}(m, \mathbb{Z})$. 在命题 4.8.21 证明的交换图中, 取 \mathbb{Z}^n 的标准正交基 $\{\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_n\}$, 则 $\{d_1\mathbf{f}_1, \dots, d_r\mathbf{f}_r\}$ 为 $\text{Im}(\phi_B)$ 的基. 而 $\phi_P(\text{Im}(\phi_B)) = \text{Im}(\phi_A) = K$, 令 $\mathbf{e}_i = \phi_P(\mathbf{f}_i)$, 则 $\{d_1\mathbf{e}_1, \dots, d_r\mathbf{e}_r\}$ 为 K 的基. \square

定义 4.8.28 定义 Abel 群 G 的扭子群 $t(G) = \{g \in G : g \text{ 有限阶}\} = \{g \in G : \text{存在 } n > 0 \text{ 使 } ng = 0_G\}$.

注记 4.8.29 $t(G) \leq G$.

用扭子群的概念可以将定理 4.8.25 内蕴表述为以下定理.

定理 4.8.30 设 G 为有限生成 Abel 群, 则存在内直和分解 $G = t(G) \oplus F$, 使得 F 为有限生成自由 Abel 群 (称其为 $t(G)$ 的补), $|t(G)| < +\infty$, 且 $t(G) \simeq \mathbb{Z}_{d_1} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{d_r}$.

证明 由定理 4.8.25, 设存在群同构 $\theta: (\mathbb{Z}_{d_1} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{d_r}) \oplus \mathbb{Z}^s \xrightarrow{\sim} G$. 记 $U = \mathbb{Z}_{d_1} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{d_r}$, $V = \mathbb{Z}^s$, 则 $U \simeq \theta(U) \leq G$, $V \simeq \theta(V) \leq G$. 由 $|\theta(U)| < +\infty$ 即知 $\theta(U) \subset t(G)$, 而 $V \simeq \theta(V)$ 中的元素显然为无限阶的, 因此 $\theta(U) = t(G)$. 取 $F = \theta(V)$ 即得证. \square

注记 4.8.31 (1) 此分解中 F 不唯一, 但在同构意义下唯一, $F \simeq G/t(G)$.

(2) 若 $F \simeq \mathbb{Z}^s$, 则称 s 为 G 的秩, 记为 $\text{rank}(G)$.

不变因子与初等因子 在定理 4.8.25 中, 当 G 为有限群时, $G \simeq \mathbb{Z}_{d_1} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{d_r}$, 其中 $d_1 \mid \cdots \mid d_r$ 为 G 的不变因子. 对这些不变因子进行标准素分解:

$$d_i = p_1^{s_{1i}} \cdots p_t^{s_{ti}}, \quad s_{1i}, \cdots, s_{ti} \geq 0.$$

对互异的素数 p_1, \cdots, p_t , 由定理 2.8.4 可得环同构 $\mathbb{Z}_{p_1^{s_{1i}} \cdots p_t^{s_{ti}}} \simeq \mathbb{Z}_{p_1^{s_{1i}}} \times \cdots \times \mathbb{Z}_{p_t^{s_{ti}}}$, 仅保留加法结构便得到群同构 $\mathbb{Z}_{p_1^{s_{1i}} \cdots p_t^{s_{ti}}} \simeq \mathbb{Z}_{p_1^{s_{1i}}} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{p_t^{s_{ti}}}$. 因此

$$\begin{aligned} G &\simeq \left(\mathbb{Z}_{p_1^{s_{11}}} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{p_t^{s_{t1}}} \right) \oplus \cdots \oplus \left(\mathbb{Z}_{p_1^{s_{1r}}} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{p_t^{s_{tr}}} \right) \\ &\simeq \underbrace{\left(\mathbb{Z}_{p_1^{s_{11}}} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{p_1^{s_{1r}}} \right)}_{\text{Sylow } p_1\text{-子群}} \oplus \cdots \oplus \underbrace{\left(\mathbb{Z}_{p_t^{s_{t1}}} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{p_t^{s_{tr}}} \right)}_{\text{Sylow } p_t\text{-子群}}, \end{aligned}$$

其中 $s_{11} \leq \cdots \leq s_{1r}, \cdots, s_{t1} \leq \cdots \leq s_{tr}$. 我们将第一个分解中的 $p_1^{s_{11}} \cdots p_t^{s_{t1}}, \cdots, p_1^{s_{1r}} \cdots p_t^{s_{tr}}$ 称为 G 的初等因子. 回顾线性代数知识, 这里第一种分解可类比于 Jordan 块, 第二种分解可类比于根子空间分解.

例 4.8.32 分类 1500 阶 Abel 群.

解答 设群 G 满足 $|G| = 1500 = 2^2 \cdot 3^1 \cdot 5^3$, 则

◇ G 的 Sylow 2-子群在同构意义下有 $\mathbb{Z}_4, \mathbb{Z}_2 \oplus \mathbb{Z}_2$ 共 2 种.

◇ G 的 Sylow 3-子群在同构意义下有 \mathbb{Z}_3 共 1 种.

◇ G 的 Sylow 5-子群在同构意义下有 $\mathbb{Z}_{125}, \mathbb{Z}_5 \oplus \mathbb{Z}_{25}, \mathbb{Z}_5 \oplus \mathbb{Z}_5 \oplus \mathbb{Z}_5$ 共 3 种.

故 G 共有 $2 \cdot 1 \cdot 3 = 6$ 种可能. \square

例 4.8.33 在例 4.8.32 中, 若 $G \simeq \mathbb{Z}_4 \oplus \mathbb{Z}_3 \oplus \mathbb{Z}_5 \oplus \mathbb{Z}_{25}$, 则 G 的初等因子 (按降序) 为 $2^2 \cdot 3^1 \cdot 5^2, 2^0 \cdot 3^0 \cdot 5^1$; 若 $G \simeq \mathbb{Z}_2 \oplus \mathbb{Z}_2 \oplus \mathbb{Z}_3 \oplus \mathbb{Z}_5 \oplus \mathbb{Z}_{25}$, 则 G 的初等因子 (按降序) 为 $2^1 \cdot 3^1 \cdot 5^2, 2^1 \cdot 3^0 \cdot 5^1$.

练习 4.8.34 设 Abel 群 $A \simeq B$, 整数 $m \mid n$, 则 $mA/nA \simeq mB/nB$. 特别地, $A/nA \simeq B/nB$.

下面的命题表明不变因子与初等因子均由群 G 唯一确定.

命题 4.8.35 设 p 为素数, $\mathbb{Z}_{p^{s_1}} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{p^{s_n}} \simeq \mathbb{Z}_{p^{t_1}} \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}_{p^{t_m}}$, 其中 $1 \leq s_1 \leq \cdots \leq s_n, 1 \leq t_1 \leq \cdots \leq t_m$, 则 $n = m, s_i = t_i (1 \leq i \leq n)$.

证明 记 $A = \text{LHS}, B = \text{RHS}$. 由练习 4.8.24,

$$A/pA \simeq (\mathbb{Z}_{p^{s_1}}/p\mathbb{Z}_{p^{s_1}}) \oplus \cdots \oplus (\mathbb{Z}_{p^{s_n}}/p\mathbb{Z}_{p^{s_n}}).$$

注意到对 $1 \leq i \leq n$, $\mathbb{Z}_{p^{s_i}}/p\mathbb{Z}_{p^{s_i}}$ 是循环群的商群, 因此均为循环群, 且 $\text{ord}(\bar{1}) = p$, 因此 $\mathbb{Z}_{p^{s_i}}/p\mathbb{Z}_{p^{s_i}} \simeq \mathbb{Z}_p$, 从而 $A/pA \simeq (\mathbb{Z}_p)^n$. 同理可得 $B/pB \simeq (\mathbb{Z}_p)^m$, 由练习 4.8.34 即知 $(\mathbb{Z}_p)^n \simeq (\mathbb{Z}_p)^m$, 从而 $n = m$. 再次运用

练习 4.8.24 可得

$$pA/p^2A \simeq (p\mathbb{Z}_{p^{s_1}}/p^2\mathbb{Z}_{p^{s_1}}) \oplus \cdots \oplus (p\mathbb{Z}_{p^{s_n}}/p^2\mathbb{Z}_{p^{s_n}}) \simeq (\mathbb{Z}_p)^{\#\{1 \leq i \leq n: s_i \geq 2\}}.$$

同理 $pB/p^2B \simeq (\mathbb{Z}_p)^{\#\{1 \leq j \leq m: t_j \geq 2\}}$, 由练习 4.8.34 即知 $\#\{1 \leq i \leq n: s_i \geq 2\} = \#\{1 \leq j \leq m: t_j \geq 2\}$, 结合 $n = m$ 及 $1 \leq s_1 \leq \cdots \leq s_n, 1 \leq t_1 \leq \cdots \leq t_m$ 即得 $s_1 = t_1$. 余下类似可证. \square

练习 4.8.36 证明: 有限生成 Abel 群 G 是自由 Abel 群当且仅当 G 的每个非零元都是无限阶元素.

练习 4.8.37 设 A 为有限 Abel 群, 证明: 对于 $|A|$ 的每个正因子 d , A 均有 d 阶子群和 d 阶商群.

练习 4.8.38 设 H 是有限 Abel 群 A 的子群, 证明: A 有同构于 A/H 的子群.

练习 4.8.39 若有限 Abel 群 A 不是循环群, 则存在素数 p 使得 A 有同构于 $\mathbb{Z}_p^2 = \mathbb{Z}_p \oplus \mathbb{Z}_p$ 的子群.

练习 4.8.40 证明: 当 $(m, n) = 1$ 时, $\mathbb{Z}_m \oplus \mathbb{Z}_n$ 的不变因子为 $\{mn\}$; 而当 $(m, n) > 1$ 时, $\mathbb{Z}_m \oplus \mathbb{Z}_n$ 的不变因子为 $\{(m, n), [m, n]\}$.

练习 4.8.41 求 $\mathbb{Z}_2 \oplus \mathbb{Z}_9 \oplus \mathbb{Z}_{35}$ 的初等因子和不变因子.

4.9 群的合成列

定义 4.9.1 群 G 的递降子群链

$$G = G_0 \supset G_1 \supset \cdots \supset G_n = \{1_G\}$$

如满足 $G_{i+1} \triangleleft G_i, \forall 0 \leq i < n$, 则称之为正规列, 而群族

$$G_i/G_{i+1}, \quad i = 0, \cdots, n-1$$

称为该列的子商.

定义 4.9.2 若群 G 的正规列 $G = G_0 \supset G_1 \supset \cdots \supset G_n = \{1_G\}$ 满足子商皆为单群, 则称之为合成列. 我们称整数 n 为该合成列的长度.

注记 4.9.3 在合成列中, 群 G 由子商“拼成”.

例 4.9.4 群 G 为单群当且仅当 $G \supset \{1_G\}$ 为合成列.

引理 4.9.5 有限群 G 必有合成列.

证明 若 $|G| = 1$, 取平凡合成列. 若 G 为非平凡单群, 取合成列 $G \supset \{1_G\}$. 对余下情形, 对 $|G|$ 归纳: 取 G 的阶最大的正规的真子群 N , 则 G/N 为单群. 由于 $|N| < |G|$, 归纳假设给出了 N 的合成列 (N_i) , 取 (G, N_0, N_1, \cdots) 作为 G 的合成列即可. \square

注记 4.9.6 无限群未必有合成列, 例如 \mathbb{Z} .

例 4.9.7 (合成列未必唯一) 由例 4.4.33 与例 4.3.12 可得合成列 $S_4 \supset A_4 \supset K_4 \supset \{1, \sigma_i\} \supset \{\text{Id}\}$, 其中

$$\sigma_1 = (12)(34), \quad \sigma_2 = (13)(24), \quad \sigma_3 = (14)(23).$$

由于 i 可任选为 1, 2 或 3, 因此上述合成列的选取并不唯一.

定义 4.9.8 设 $G = G_0 \supset \cdots$ 为正规列, 我们视其子商 $(G_i/G_{i+1})_{i \geq 0}$ 为不计顺序, 但计入重数的集合. 如果两个正规列长度相同, 而且其子商在上述意义下相等, 则称两正规列等价.

定义 4.9.9 考虑一系列同态

$$\cdots \xrightarrow{f_0} G_1 \xrightarrow{f_1} G_2 \xrightarrow{f_2} \cdots \xrightarrow{f_i} G_{i+1} \rightarrow \cdots,$$

长度或有限或无限. 若对所有 i 都有

$$\text{Im}(f_i) = \text{Ker}(f_{i+1}),$$

则称此列正合. 我们经常把 $\{1\}$ 简写为 1 , 或用加性符号记为 0 .

例 4.9.10 (1) 对于任意同态 $\varphi: G \rightarrow G'$, 列 $G \rightarrow G' \rightarrow 1$ 正合当且仅当 φ 是满的, 列 $1 \rightarrow G \rightarrow G'$ 正合当且仅当 φ 是单的.

(2) 我们恒有正合列

$$1 \rightarrow \text{Ker}(\varphi) \rightarrow G \xrightarrow{\varphi} \text{Im}(\varphi) \rightarrow 1$$

其中 $\text{Ker}(\varphi) \rightarrow G$ 是自然的包含映射.

定理 4.9.11 (Jordan-Hölder 定理) 群 G 的任两个合成列皆等价.

证明 设 $(G_i)_{0 \leq i \leq n}$ 为群 G 的合成列, 对每个单群 S , 记 $n(G, (G_i), S)$ 为在同构意义下 S 在 G 的全体子商中出现的次数, 只需证 $n(G, (G_i), S)$ 与合成列 (G_i) 的选取无关. 注意到若 $H \leq G$, 则通过定义 $H_i = G_i \cap H$, 正规列 (G_i) 诱导出 H 的正规列 (H_i) . 类似地, 若 $N \triangleleft G$, 则 $(G/N)_i = G_i/(G_i \cap N)$ 定义出 G/N 的正规列 $((G/N)_i)$. 正合列 $1 \rightarrow N \rightarrow G \rightarrow G/N \rightarrow 1$ 诱导出正合列

$$1 \rightarrow N_i/N_{i+1} \rightarrow G_i/G_{i+1} \rightarrow (G/N)_i/(G/N)_{i+1} \rightarrow 1.$$

由于 (G_i) 为合成列, 从而 G_i/G_{i+1} 均为单群, 因此 N_i/N_{i+1} 必为 1 或 G_i/G_{i+1} . 据此, 我们将指标集 $I = \{0, \cdots, n-1\}$ 分为两部分

$$I_1 = \{i : N_i/N_{i+1} = G_i/G_{i+1}\}, \quad I_2 = \{i : N_i/N_{i+1} = 1\}.$$

分别利用 I_1 和 I_2 作为指标集, 我们得到 N 和 G/N 上的合成列, 且 $|I_1| + |I_2| = n$. 为证明定理, 我们对合成列的长度 n 进行归纳. 当 $n \leq 1$ 时, 不证自明. 现假定 $n \geq 2$, 则 G 不是平凡群也不是单群, 因此可取 G 的一个非平凡正规真子群 N . 根据上述讨论, $|I_1|$ 和 $|I_2|$ 都小于 n , 从而可以对 N 以及 G/N 用归纳假设, 这表明 $n(N, (N_i)_{i \in I_1}, S)$ 和 $n(G/N, ((G/N)_i)_{i \in I_2}, S)$ 与合成列的选取无关. 又因为

$$n(G, (G_i), S) = n(N, (N_i)_{i \in I_1}, S) + n(G/N, ((G/N)_i)_{i \in I_2}, S),$$

所以 $n(G, (G_i), S)$ 与合成列的选取无关. □

因此, 一旦群 G 有合成列, 则其子商在定义 4.9.8 的意义下无关合成列的选取.

定义 4.9.12 假设群 G 有合成列, 定义其合成因子或 Jordan-Hölder 因子集 $\text{JH}(G)$ 为其任意合成列的全体子商 (不计顺序, 计入重数), 并将合成列的长度称为群 G 的长度, 记作 $\ell(G)$. 如果一个群没有合成列, 我们约定其长度为 ∞ .

命题 4.9.13 设 G 为有限群, 则 G 为可解群当且仅当 $\text{JH}(G)$ 中任一合成因子均为素数阶循环群.

证明 (\Rightarrow) 由练习 4.4.35 立得.

(\Leftarrow) 循环群是 Abel 群. □

练习 4.9.14 证明: 若群 G 有合成列, $N \triangleleft G$, 则 N 亦有合成列. 若 $N \leq G$, 结论是否成立?

定义 4.9.15 设 G 为群, 对于 $x, y \in G$, 定义换位子 $[x, y] = xyx^{-1}y^{-1}$.

注记 4.9.16 $xy = yx$ 当且仅当 $[x, y] = 1_G$.

定义 4.9.17 设 G 为群, 对任意子集 $A, B \subset G$, 定义 $[A, B] \triangleleft G$ 为由 $\{[a, b] : a \in A, b \in B\}$ 生成的最小正规子群. 我们称 $G_{\text{der}} := [G, G]$ 为 G 的导出子群或换位子群, 而 $G_{\text{ab}} := G/G_{\text{der}}$ 称为 G 的 Abel 化.

注记 4.9.18 (1) G_{der} 亦可直接定义为由群 G 中换位子生成的子群, 可证它是正规子群.

(2) 若 G 是 Abel 群, 则 $G_{\text{der}} = \{1_G\}$.

(3) G_{ab} 是 Abel 群.

按照定义, 我们有

命题 4.9.19 设 G 为群, $H \leq G$, 则以下等价:

(1) $H \supset G_{\text{der}}$.

(2) $H \triangleleft G$ 且 G/H 为 Abel 群.

例 4.9.20 考虑例 4.7.19 中的 Q_8 , 由练习 4.7.20, $[b, a] = bab^{-1}a^{-1} = (bab^{-1}a)a^{-2} = a^{-2}a^4 = a^2 \in (Q_8)_{\text{der}}$. 而 $\{1, a^2\} \triangleleft Q_8$, 由命题 4.9.19, $(Q_8)_{\text{der}} = \{1, a^2\}$.

例 4.9.21 设 G 为非 Abel 单群, 则 $G_{\text{der}} = G$.

练习 4.9.22 对 $n \geq 3$, 有 $(S_n)_{\text{der}} = A_n$.

证明 由命题 4.9.19, $(S_n)_{\text{der}} \subset A_n$. 而由例 4.4.7, 当 $n \geq 3$ 时, S_n 是非 Abel 群, 因此 $(S_n)_{\text{der}} \neq \{\text{Id}\}$.

◇ 若 $n = 3$, 由例 4.4.31 中 S_3 的子群格, A_3 仅有平凡子群, 因此 $(S_3)_{\text{der}} = A_3$.

◇ 若 $n = 4$, 由表 4.3 可见 A_4 的正规子群为 $\{\text{Id}\}, K_4, A_4$. 由于 $(12)(13)(12)^{-1}(13)^{-1} = (123) \notin K_4$, 因此 $(S_4)_{\text{der}} = A_4$.

◇ 若 $n \geq 5$, 由定理 4.4.36, A_n 为单群, 因此 $(S_n)_{\text{der}} = A_n$. □

定义 4.9.23 设 G 为群, 递归地定义 G 的导出列:

$$G^{(0)} = G, \quad G^{(i+1)} = [G^{(i)}, G^{(i)}], \quad i \geq 0.$$

定理 4.9.24 群 G 为可解群当且仅当存在正整数 n , 使得 $G^{(n)} = \{1_G\}$.

证明 (\Leftarrow) 由于 $G^{(i)}/G^{(i+1)}$ 是 $G^{(i)}$ 的 Abel 化, 因此正规列 $G = G^{(0)} \supset G^{(1)} \supset \cdots \supset G^{(n)} = \{1_G\}$ 的每个子商均为 Abel 群, 从而 G 为可解群.

(\Rightarrow) 设正规列 $G \supset G_1 \supset G_2 \supset \cdots \supset G_n = \{1_G\}$ 中每个子商均为 Abel 群. 由命题 4.9.19, $G_1 \supset G^{(1)}, G_2 \supset G_1^{(1)} \supset (G^{(1)})^{(1)} = G^{(2)}, \dots, G_n \supset G^{(n)}$, 从而 $G^{(n)} = 1_G$. □

定理 4.9.25 (Burnside) $p^a q^b$ 阶群是可解群, 其中 p, q 为素数, a, b 为非负整数.

定理 4.9.26 (Feit-Thompson) 奇数阶群是可解群.

4.10 半直积

定义 4.10.1 设 H, N 为群, 并给定同态 $\rho: H \rightarrow \text{Aut}(N)$. 相应的半直积 $N \rtimes_{\rho} H$ 为如下定义的群 (下标 ρ 经常略去):

- ◇ 作为集合, $N \rtimes H$ 无非是积集 $N \times H$;
- ◇ 二元运算是 $(n, h)(n', h') = (n\rho(h)(n'), hh')$, 其中 $n, n' \in N, h, h' \in H$.

注记 4.10.2 (1) 若 $\rho(h) = \text{Id}_N, \forall h \in H$, 则 $N \rtimes_{\rho} H = N \times H$.

(2) 么元是 $(1_N, 1_H)$.

(3) $(n, h)^{-1} = (\rho(h^{-1})(n^{-1}), h^{-1})$.

(4) 透过单同态 $h \mapsto (1, h)$ 和 $n \mapsto (n, 1)$ 可将 H 和 N 都视为 $N \rtimes H$ 的子群. 从二元运算的定义立得 $N \triangleleft (N \rtimes H)$.

定理 4.10.3 设 G 为群, $N \triangleleft G, H \leq G, N \cap H = \{1_G\}, NH = G$. 定义

$$\rho: H \rightarrow \text{Aut}(N), \quad h \mapsto (n \mapsto hnh^{-1}),$$

则有群同构

$$N \rtimes_{\rho} H \xrightarrow{\sim} G, \quad (n, h) \mapsto nh.$$

例 4.10.4 考虑 $A_3 \triangleleft S_3, H = ((12)) \leq S_3$, 以及群同态 $\rho: H \rightarrow \text{Aut}(A_3), h \mapsto (n \mapsto hnh^{-1})$ (易验证这是群同态), 由于 $A_3 \cap H = \{\text{Id}\}, A_3 \times H = S_3$, 由定理 4.10.3, $S_3 \simeq A_3 \rtimes_{\rho} H \simeq C_3 \rtimes_{\rho} C_2$.

练习 4.10.5 考虑练习 4.7.20 中的 Q_8 , 证明不存在 Q_8 的真子群 H 与 $N \triangleleft Q_8$, 使得 $N \cap H = \{1\}$ 且 $Q_8 = N \rtimes H$.

证明 用反证法, 假设存在, 则 $|N| = 2$ 或 4 .

- ◇ 若 $|N| = 4$, 则 $|H| = 2$, 而 Q_8 中只有一个 2 阶元 a^2 , 因此 $H = \{1, a^2\}$. 而此时 Q_8/N 为 2 阶群, 即 $Q_8/N \simeq C_2$, 因此 $(aN)^2 = a^2N = N$, 即 $a^2 \in N$, 这与 $N \cap H = \{1\}$ 矛盾.
- ◇ 若 $|N| = 2$, 则 $|H| = 4, [Q_8 : H] = 2$, 由例 4.3.12 知 $H \triangleleft Q_8$. 又 $N \cap H = \{1\}$, 由练习 4.3.28 即知 $Q_8 = NH \simeq N \times H$ 为 Abel 群, 矛盾. \square

第五章

Galois 理论

5.1 Galois 扩张

设 K 为域, $G \leq \text{Aut}(K)$, 则有 $G \curvearrowright K : (\sigma, v) \mapsto \sigma(v)$, 其不动点集 $K^G = \{v \in K : \sigma(v) = v, \forall \sigma \in G\}$ 称为 G -不动子域. 我们有如下事实:

- ◇ K^G 是 K 的子域.
- ◇ 若 $H \leq G$, 则有 $K^G \hookrightarrow K^H \hookrightarrow K = K^{\{\text{Id}_K\}}$. (群越小, 不动子域越大.)
- ◇ 考虑域扩张 K/k , 且 $H \leq \text{Gal}(K/k)$, 则有 $k \hookrightarrow K^H \hookrightarrow K$. 特别地, $k \hookrightarrow K^{\text{Gal}(K/k)} \hookrightarrow K$.
- ◇ $G \leq \text{Gal}(K/K^G)$.

定理 5.1.1 若 $G \leq \text{Aut}(K)$ 是有限子群, 则 $[K : K^G] = |G| < +\infty$ 且 $G = \text{Gal}(K/K^G)$.

证明 令 $n = |G|$, $k = K^G$, 断言 $[K : k] \leq n$. 若断言已证, 则由

$$n = |G| \leq |\text{Gal}(K/k)| \leq [K : k] \leq n$$

即得欲证. 下面采用反证法证明断言, 假设 $[K : k] \geq n + 1$, 则存在 $\{e_1, \dots, e_{n+1}\} \subset K$ 是 k -线性无关的. 设 $G = \{\sigma_0 = \text{Id}, \sigma_1, \dots, \sigma_{n-1}\}$, 令

$$A = \begin{pmatrix} e_1 & \cdots & e_{n+1} \\ \sigma_1(e_1) & \cdots & \sigma_1(e_{n+1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n-1}(e_1) & \cdots & \sigma_{n-1}(e_{n+1}) \end{pmatrix} \in M_{n \times (n+1)}(K),$$

并记 $V = \{\mathbf{v} \in K^{n+1} : A\mathbf{v} = \mathbf{0}\}$ 为 K^{n+1} 的线性子空间, 由 $\text{rank}(A) \leq n < n+1$ 知 $V \neq \{\mathbf{0}\}$. 考虑群作用 $G \curvearrowright K^{n+1} : (\sigma, (\lambda_1, \dots, \lambda_{n+1})^\top) \mapsto (\sigma(\lambda_1), \dots, \sigma(\lambda_{n+1}))^\top$. 对任意 $\mathbf{v} = (\lambda_1, \dots, \lambda_{n+1})^\top \in V$, 由 $A\mathbf{v} = \mathbf{0}$ 可得

$$\sum_{k=1}^{n+1} \lambda_k \sigma_i(e_k) = 0, 0 \leq i \leq n-1 \implies \sum_{k=1}^{n+1} \sigma_j(\lambda_k) \sigma_j \circ \sigma_i(e_k) = 0, 0 \leq i, j \leq n-1$$

$$\implies \sum_{k=1}^{n+1} \sigma_j(\lambda_k) \sigma_i(e_k) = 0, 0 \leq i, j \leq n-1 \xrightarrow{\tau=\sigma_j} \tau \cdot \mathbf{v} \in V, \forall \tau \in G.$$

取 $\mathbf{v} = (\lambda_1, \dots, \lambda_{n+1})^T \in V \setminus \{0\}$ 使其非 0 分量最少. 观察到 \mathbf{v} 至少有 2 个非 0 分量 (否则, 不妨设仅有 $\lambda_1 \neq 0$, 则由 $A\mathbf{v} = 0$ 得 $\lambda_1 e_1 = 0$, 但 $\lambda_1, e_1 \neq 0$, 矛盾). 因此不妨设 $\lambda_1 \lambda_2 \neq 0$, 进而可不妨设 $\lambda_1 = 1$, 即 $\mathbf{v} = (1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n+1})^T$, 其中 $\lambda_2 \neq 0$. 注意到 \mathbf{v} 的分量不全在 k 中, 否则由 $A\mathbf{v} = 0$ 知 $\lambda_1 e_1 + \dots + \lambda_{n+1} e_{n+1} = 0$, 与 e_1, \dots, e_{n+1} 是 k -线性无关的矛盾. 不妨设 $\lambda_2 \notin k = K^G$, 则存在 $\tau \in G$ 使 $\tau(\lambda_2) \neq \lambda_2$. 由 $\tau \cdot \mathbf{v} \in V$ 知 $\mathbf{v} - \tau \cdot \mathbf{v} \in V$, 但由 $\tau(0) = 0, \tau(1) = 1$ 可见 $\mathbf{v} - \tau \cdot \mathbf{v} \in V$ 的非 0 分量比 \mathbf{v} 更少, 矛盾. \square

定义-定理 5.1.2 设 K/k 为有限维域扩张, $G = \text{Gal}(K/k)$, 则以下等价:

- (1) $k = K^G$.
- (2) $|G| = [K : k]$.
- (3) 对任意 $\alpha \in K$, α 在 k 上的最小多项式无重根, 且在 K 上分裂.
- (4) 存在可分多项式 $f(x) \in k[x]$ 使得 $K = (k, f(x))$.

此时称 K/k 为有限 Galois 扩张.

证明 (1) \Leftrightarrow (2) 由定理 3.2.4 与定理 5.1.1 得

$$[K : k] = [K^G : k][K : K^G] = [K^G : k] \cdot |G|,$$

$$\text{因此 } |G| = [K : k] \iff [K^G : k] = 1 \iff k = K^G.$$

(2) \Rightarrow (3) 任取 $\alpha \in K$, 设 α 在 k 上的最小多项式为 $g(x)$. 由引理 3.3.1,

$$|G| = |\text{Gal}(K/k)| \leq |\text{Root}_K(g(x))| \cdot [K : k(\alpha)] \leq \deg(g(x)) \cdot [K : k(\alpha)] = [K : k],$$

而由 (2), $|G| = [K : k]$, 因此上式中均取等号, 因此 $|\text{Root}_K(g(x))| = \deg(g(x))$.

(3) \Rightarrow (4) 由定理 3.2.11, 可设 $K = k(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$, 其中 $\alpha_i \in K$ 在 k 上的最小多项式为 $g_i(x)$. 由 (3), $g_i(x)$ 无重根, 且在 K 上分裂. 令 $f(x) = g_1(x) \cdots g_n(x) \in k[x]$, 则 $f(x)$ 可分且 $K = (k, f(x))$.

(4) \Rightarrow (2) 这是定理 3.3.30. \square

注记 5.1.3 (1)(2)(4) 是整体性质, (3) 是局部性质.

例 5.1.4 考虑 $\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \omega) = E$.

- ◇ E/\mathbb{Q} 是 Galois 扩张, $E = (\mathbb{Q}, x^3 - 2)$ (例 3.3.7).
- ◇ $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})/\mathbb{Q}$ 不是 Galois 扩张 (例 3.3.29).
- ◇ $E/\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$ 是 Galois 扩张 (例 3.2.7).

定理 5.1.5 (绝对版本的有限 Galois 对应) 对任意域 K , 存在双射

$$\{\text{有限子群 } G \leq \text{Aut}(K)\} \xleftrightarrow{1:1} \{\text{子域 } k \subset K : K/k \text{ 为有限 Galois 扩张}\}$$

$$\begin{array}{ccc} G & \longrightarrow & K^G \\ \text{Gal}(K/k) & \longleftarrow & k \end{array}$$

证明 映射的良好性由定义-定理 5.1.2 (1)(2) 可见, 互逆性由定理 5.1.1 与定义-定理 5.1.2 (1) 可见. \square

定理 5.1.6 (相对版本的有限 Galois 对应) 设 K/k 为有限 Galois 扩张, 则存在双射

$$\{\text{子群 } H \leq \text{Gal}(K/k)\} \xleftrightarrow{1:1} \{K/k \text{ 的中间域}\}$$

$$\begin{array}{ccc} H & \longrightarrow & K^H \\ \text{Gal}(K/E) & \longleftarrow & E \end{array}$$

证明 互逆性在于:

- ◇ 由定理 5.1.1, $H = \text{Gal}(K/K^H)$.
- ◇ 若 E 是 K/k 的中间域, 则由定义-定理 5.1.2 (4), K/E 亦为有限 Galois 扩张, 再由定义-定理 5.1.2 (1) 知 $E = K^{\text{Gal}(K/E)}$. \square

从例 5.1.4 可见, Galois 扩张的中间域关于底层的域不一定是 Galois 扩张:

$$\begin{array}{ccccc} \mathbb{Q} & \xrightarrow{\text{非 Galois 扩张}} & \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) & \xrightarrow{\text{Galois 扩张}} & \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \omega) \\ & \searrow & & \nearrow & \\ & \text{Galois 扩张} & & & \end{array}$$

关于这一现象, 我们有如下命题.

命题 5.1.7 设 K/k 是有限 Galois 扩张, E 是 K/k 的中间域, 则 E/k 是 Galois 扩张当且仅当 $\sigma(E) = E, \forall \sigma \in \text{Gal}(K/k)$.

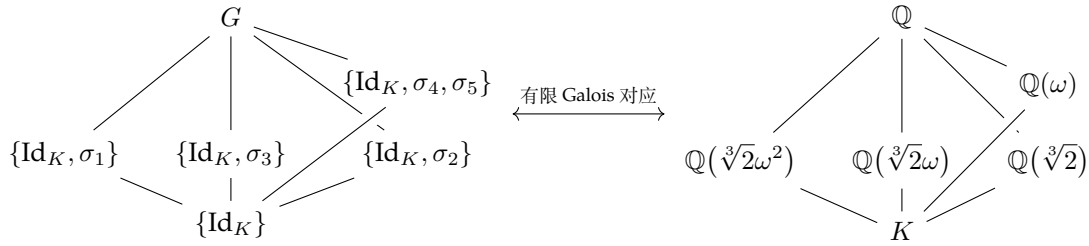
证明 (\Rightarrow) 由定义-定理 5.1.2 (4), 可设 $E = k(\beta_1, \dots, \beta_n)$, $g(x) = (x - \beta_1) \cdots (x - \beta_n) \in k[x]$. 对任意 $\sigma \in \text{Gal}(K/k)$, 有 $\sigma(E) = k(\sigma(\beta_1), \dots, \sigma(\beta_n))$, 而由 $g(x) \in k[x]$ 知 $\sigma(\beta_i) \in \{\beta_1, \dots, \beta_n\}$ ($1 \leq i \leq n$), 因此 $\sigma(E) \subset E$. 同理可得 $\sigma^{-1}(E) \subset E$, 即 $E \subset \sigma(E)$. 故 $\sigma(E) = E$.

(\Leftarrow) 任取 $b \in E$, 设 b 在 k 上的最小多项式为 $g(x) \in k[x]$. 由于 K/k 是有限 Galois 扩张, 由定义-定理 5.1.2 (3), 可设 $g(x) = (x - \beta_1) \cdots (x - \beta_n)$, 其中 $\beta_1 = b, \beta_2, \dots, \beta_n \in K$ 两两不同. 由引理 3.3.1, 对 $1 \leq i \leq n$, 存在域同构 $\sigma_i: k(b) \xrightarrow{\sim} k(\beta_i)$ 使得 $\sigma_i(b) = \beta_i$. 再由定理 3.3.13, σ_i 可进一步延拓为 $\delta: K \xrightarrow{\sim} K$, 即 $\delta \in \text{Gal}(K/k)$. 由条件, $\beta_i = \delta(b) \in \delta(E) = E$, 从而 $g(x)$ 无重根且在 E 上分裂, 由定义-定理 5.1.2 (3), E/k 是 Galois 扩张. \square

例 5.1.8 考虑 $\mathbb{Q} \subset K = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \omega) = (\mathbb{Q}, x^3 - 2)$, 记 $G = \text{Gal}(K/\mathbb{Q})$, 例 3.2.7 已得 $[K : \mathbb{Q}] = 6$, 因此 $|G| = 6$. 考虑 $G \curvearrowright \text{Root}_K(x^3 - 2)$, 由练习 4.5.8, 存在群的同态 $G \hookrightarrow S(\text{Root}_K(x^3 - 2)) \simeq S_3$, 而 $|S_3| = 6 = |G|$, 因此这是群同构. 记 $a = \sqrt[3]{2}, b = \sqrt[3]{2}\omega, c = \sqrt[3]{2}\omega^2$, 利用 S_3 可得 G 中元素:

S_3	G
Id	Id $_K$
(ab)	$\sigma_1: \sqrt[3]{2} \mapsto \sqrt[3]{2}\omega, \sqrt[3]{2}\omega \mapsto \sqrt[3]{2}, \sqrt[3]{2}\omega^2 \mapsto \sqrt[3]{2}\omega^2$
(bc)	$\sigma_2: \sqrt[3]{2} \mapsto \sqrt[3]{2}, \sqrt[3]{2}\omega \mapsto \sqrt[3]{2}\omega^2, \sqrt[3]{2}\omega^2 \mapsto \sqrt[3]{2}\omega$
(ca)	$\sigma_3: \sqrt[3]{2} \mapsto \sqrt[3]{2}\omega^2, \sqrt[3]{2}\omega \mapsto \sqrt[3]{2}\omega, \sqrt[3]{2}\omega^2 \mapsto \sqrt[3]{2}$
(abc)	$\sigma_4: \sqrt[3]{2} \mapsto \sqrt[3]{2}\omega, \sqrt[3]{2}\omega \mapsto \sqrt[3]{2}\omega^2, \sqrt[3]{2}\omega^2 \mapsto \sqrt[3]{2}$
(acb)	$\sigma_5: \sqrt[3]{2} \mapsto \sqrt[3]{2}\omega^2, \sqrt[3]{2}\omega \mapsto \sqrt[3]{2}, \sqrt[3]{2}\omega^2 \mapsto \sqrt[3]{2}\omega$

结合例 4.4.31, 可得 G 的子群格, 并由定理 5.1.6 得到 K 的子域格:



现重述定理 3.4.21 如下.

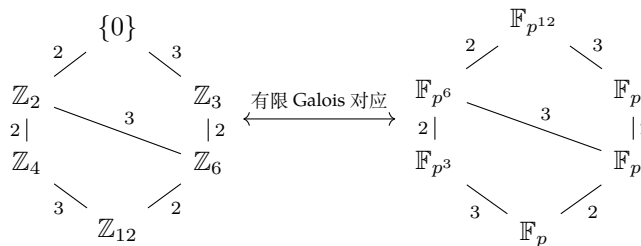
例 5.1.9 (有限域的 Galois 对应) 设 E 为有限域, $|E| = p^n$. 由注记 3.4.16 知 E/\mathbb{F}_p 是 Galois 扩张. 再由注记 3.4.20 可知 $\text{Gal}(E/\mathbb{F}_p)$ 子群的形式. 故存在双射

$$\begin{aligned} \{\text{子群 } H \leq \text{Gal}(E/\mathbb{F}_p)\} &\xleftrightarrow{1:1} \{E/\mathbb{F}_p \text{ 的中间域}\} \\ (\sigma^d) &\longleftrightarrow \text{Root}_E(x^{p^d} - x) \end{aligned}$$

由于 $\text{Gal}(E/\mathbb{F}_p) = \text{Aut}(E)$, 对于有限域, 定理 5.1.5 与定理 5.1.6 两个版本的 Galois 对应是统一的.

练习 5.1.10 画出 $\mathbb{F}_{p^{12}}/\mathbb{F}_p$ 的 Hasse 图, 这里 p 为素数.

解答 由定理 3.4.19, $\text{Gal}(\mathbb{F}_{p^{12}}/\mathbb{F}_p) = \{\text{Id}, \sigma, \sigma^2, \dots, \sigma^{11}\} \simeq \mathbb{Z}_{12}$.



□

例 5.1.11 (任何有限群均可视为 Galois 扩张的 Galois 群) 对任意有限群 G , 由定理 4.5.13, 存在正整数 n 使得 G 同构于 S_n 的子群, 考虑 $S_n \curvearrowright K = k(t_1, \dots, t_n)$, $(\sigma, t_i) \mapsto t_{\sigma(i)}$, 则 G 可视为 $\text{Aut}(K)$ 的子群. 由定理 5.1.1, $G \simeq \text{Gal}(K/K^G)$. 故任何有限群 (在同构意义下) 都是某一 Galois 扩张的 Galois 群.

5.2 Galois 对应

定义 5.2.1 偏序集意指资料 (L, \leq) , 其中 L 是集合而 \leq 是 L 上的二元关系 (偏序), 满足

- ▷ 反身性 $x \leq x, \forall x \in L$;
- ▷ 传递性 $(x \leq y) \wedge (y \leq z) \implies x \leq z$;
- ▷ 反称性 $(x \leq y) \wedge (y \leq x) \implies x = y$.

例 5.2.2 记 $\mathbb{N}_+ = \{1, 2, 3, \dots\}$, 有如下两个偏序集:

- (1) (\mathbb{N}_+, \leq) , 其中 \leq 为自然数间的正常大小关系.
- (2) (\mathbb{N}_+, \preceq) , 其中 $a \preceq b \iff a \mid b$.

例 5.2.3 设 G 为群, 则 $\text{Sub}(G) := \{H : H \leq G\}$ 在集合的包含关系下构成偏序集.

例 5.2.4 对于域扩张 K/k , $\text{Lat}(K/k) := \{K/k \text{ 的中间域}\}$ 在集合的包含关系下构成偏序集.

例 5.2.5 (反偏序集) 设 (L, \leq) 为偏序集, 则称 $L^{\text{op}} = (L, \leq^{\text{op}})$ 为 L 的反偏序集, 其中 $a \leq^{\text{op}} b \iff b \leq a$.

定义 5.2.6 设 (L, \leq) 为偏序集.

(1) 对任意 $a, b \in L$, 称 $a \vee b \in L$ 为 a, b 的最小上界, 若

$$\diamond a \leq (a \vee b) \text{ 且 } b \leq (a \vee b).$$

$$\diamond \text{ 若 } c \in L \text{ 使得 } a \leq c \text{ 且 } b \leq c, \text{ 则 } (a \vee b) \leq c.$$

(2) 对任意 $a, b \in L$, 称 $a \wedge b \in L$ 为 a, b 的最大下界, 若

$$\diamond (a \wedge b) \leq a \text{ 且 } (a \wedge b) \leq b.$$

$$\diamond \text{ 若 } c \in L \text{ 使得 } c \leq a \text{ 且 } c \leq b, \text{ 则 } c \leq (a \wedge b).$$

注记 5.2.7 最小上界与最大下界若存在, 则唯一.

定义 5.2.8 偏序集 (L, \leq) 称为格, 若对任意 $a, b \in L$, $a \vee b$ 与 $a \wedge b$ 均存在.

例 5.2.9 集合 $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ 在整除关系下构成偏序集, 但不构成格, 例如 $2 \vee 3$ 不存在.

例 5.2.10 设 G 为群, 则 $\text{Sub}(G)$ 是格.

$$\diamond \text{ 若 } H_1, H_2 \leq G, \text{ 则 } H_1 \vee H_2 = (H_1 \cup H_2), H_1 \wedge H_2 = H_1 \cap H_2.$$

$$\diamond \text{ 若 } H \leq G, N \triangleleft G, \text{ 则 } H \vee N = HN = NH.$$

例 5.2.11 考虑域扩张 K/k , 则 $\text{Lat}(K/k)$ 是格. 若 E, F 均为 K/k 的中间域, 则 $E \wedge F = E \cap F$, $E \vee F$ 即由 $E \cup F$ 生成的域.

例 5.2.12 设 L 是格, 则其反格 L^{op} 也是格, 因为 $a \vee^{\text{op}} b = a \wedge b$, $a \wedge^{\text{op}} b = a \vee b$.

定义 5.2.13 设 L, L' 为偏序集, 称 $f : L \rightarrow L'$ 为 (偏序集) 同态, 若 $f(a) \leq f(b), \forall a \leq b$. 若 $f : L \rightarrow L'$ 为同态, 且为双射, f^{-1} 亦为同态, 则称 f 为 (偏序集) 同构.

注记 5.2.14 偏序集同态即“保序映射”.

例 5.2.15 记 $[5] = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, $\text{Id} : ([5], \preceq) \rightarrow ([5], \leq)$ 是同态, 且是双射, 但不是同构. 这里 \preceq 表示整除关系, \leq 表示正常大小关系.

引理 5.2.16 设 L, L' 是格, $f : L \rightarrow L'$ 为同构, 则

$$f(a \vee b) = f(a) \vee f(b), \quad f(a \wedge b) = f(a) \wedge f(b), \quad \forall a, b \in L.$$

例 5.2.17 对正整数 n , $L_n = \{n \text{ 的正因子}\}$ 在整除关系下构成格. 对 $d_1, d_2 \in L_n$, $d_1 \vee d_2 = \text{lcm}(d_1, d_2)$, $d_1 \wedge d_2 = \text{gcd}(d_1, d_2)$. 考虑 n 阶循环群 $C_n = \langle g \mid g^n = 1 \rangle = \{1, g, \dots, g^{n-1}\}$, 有格同构

$$L_n \xrightarrow{\sim} \text{Sub}(C_n), \quad d \mapsto (g^{\frac{n}{d}}).$$

定理 5.2.18 (Galois 理论基本定理) 设 K/k 为有限 Galois 扩张, $G = \text{Gal}(K/k)$, 则存在格同构

$$\begin{aligned} \text{Sub}(G) &\xrightarrow{\sim} \text{Lat}(K/k)^{\text{op}} \\ H &\longmapsto K^H \\ \text{Gal}(K/E) &\longleftarrow E \end{aligned}$$

证明 在定理 5.1.6 的基础上, 再注意到

$$H \leq H' \implies K^{H'} \subset K^H, \quad E \subset F \implies \text{Gal}(K/F) \subset \text{Gal}(K/E). \quad \square$$

注记 5.2.19 对任意 $H \leq G$, 由定理 4.1.18, $|G| = |H|[G:H]$; 由定理 3.2.4, $[K:k] = [K:K^H][K^H:k]$; 由定义-定理 5.1.2 (2), $|G| = [K:k]$; 由定理 5.1.1, $|H| = [K:K^H]$, 因此 $[G:H] = [K^H:k]$.

推论 5.2.20 设 K/k 为有限 Galois 扩张, $G = \text{Gal}(K/k)$, 则

- (1) 若 $H_1, H_2 \leq G$, 则 $K^{H_1 \vee H_2} = K^{H_1} \cap K^{H_2}$, $K^{H_1 \wedge H_2} = K^{H_1} \vee K^{H_2}$.
- (2) 若 E_1, E_2 均为 K/k 的中间域, 则 $\text{Gal}(K/E_1 \vee E_2) = \text{Gal}(K/E_1) \cap \text{Gal}(K/E_2)$, $\text{Gal}(K/E_1 \cap E_2) = \text{Gal}(K/E_1) \vee \text{Gal}(K/E_2)$.
- (3) 有限 Galois 扩张 K/k 仅有有限个中间域.

格结构上的群作用 在定理 5.2.18 中同构的两个格上, 各存在如下群作用:

$$\begin{aligned} \diamond G \curvearrowright \text{Sub}(G), (\sigma, H) &\mapsto \sigma H \sigma^{-1}. \\ \diamond G \curvearrowright \text{Lat}(K/k), (\sigma, E) &\mapsto \sigma(E). \end{aligned}$$

事实上, 这两个作用是相容的, 我们有如下命题.

命题 5.2.21 定理 5.2.18 的 Galois 对应保持上述 G -作用, 即对任意 $\sigma \in G$, $H \leq G$, 以及 K/k 的中间域 E , 有

$$K^{\sigma H \sigma^{-1}} = \sigma(K^H), \quad \sigma \text{Gal}(K/E) \sigma^{-1} = \text{Gal}(K/\sigma(E)).$$

证明 我们有

$$\begin{aligned} K^{\sigma H \sigma^{-1}} &= \{\lambda \in K : \sigma h \sigma^{-1}(\lambda) = \lambda, \forall h \in H\} = \{\lambda \in K : h \sigma^{-1}(\lambda) = \sigma^{-1}(\lambda), \forall h \in H\} \\ &= \{\lambda \in K : \sigma^{-1}(\lambda) \in K^H\} = \sigma(K^H), \end{aligned}$$

及

$$\begin{aligned} \text{Gal}(K/\sigma(E)) &= \{\delta \in \text{Aut}(K) : \delta \circ \sigma(e) = \sigma(e), \forall e \in E\} = \{\delta \in \text{Aut}(K) : \sigma^{-1} \circ \delta \circ \sigma|_E = \text{Id}_E\} \\ &= \sigma \text{Gal}(K/E) \sigma^{-1}. \end{aligned} \quad \square$$

注记 5.2.22 $\text{Sub}(G)$ 与 $\text{Lat}(K/k)$ 在 G -作用下的不动点集是相对应的, 它们分别为

$$\text{Sub}(G)^G = \{H \leq G : \sigma H \sigma^{-1} = H\} = \{H \triangleleft G\},$$

与

$$\text{Lat}(K/k)^G = \{K/k \text{ 的中间域 } E : \sigma(E) = E, \forall \sigma \in G\}$$

命题 5.1.7 $\{K/k \text{ 的中间域 } E : E/k \text{ 为有限 Galois 扩张}\}.$

我们将注记 5.2.22 表述为如下命题.

命题 5.2.23 设 K/k 为有限 Galois 扩张, E 为 K/k 的中间域, 则 E/k 为有限 Galois 扩张当且仅当 $\text{Gal}(K/E) \triangleleft G$. 此时, 存在群同构 $G/\text{Gal}(K/E) \simeq \text{Gal}(E/k)$.

证明 仅需证明最后的断言. 由命题 5.1.7, $\sigma(E) = E, \forall \sigma \in \text{Gal}(K/k)$, 因此有群同态

$$G \rightarrow \text{Gal}(E/k), \quad \sigma \mapsto \sigma|_E,$$

满性在于 $\text{Gal}(E/k) \leq \text{Gal}(K/k)$ (利用引理 3.3.1 进行延拓), 而其核为 $\text{Gal}(K/E)$, 由定理 4.1.18 即得 $G/\text{Gal}(K/E) \simeq \text{Gal}(E/k)$. \square

例 5.2.24 在例 4.4.31 的 Hasse 图中, $\{\{\text{Id}, (12)\}, \{\text{Id}, (13)\}, \{\text{Id}, (23)\}\}$ 是 S_3 -作用下的一个轨道, A_3 是 S_3 作用下的不动点. 在例 5.1.8 中的 Hasse 图中, $\{\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}\omega^2), \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}\omega), \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})\}$ 是 $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \omega)/\mathbb{Q})$ -作用下的一个轨道, $\mathbb{Q}(\omega)/\mathbb{Q}$ 为有限 Galois 扩张.

定理 5.2.25 (Steinitz) 设 K/k 为有限维域扩张, 则 K/k 为单扩张当且仅当 K/k 仅有有限个中间域.

证明 (\Rightarrow) 设 $K = k(\alpha)$, α 在 k 上的最小多项式为 $f(x) \in k[x]$. 对任意 K/k 的中间域 E , 设 α 在 E 上的最小多项式为 $g(x) = x^m + c_1x^{m-1} + \cdots + c_m \in E[x]$. 记 $B = k(c_1, \dots, c_m) \subset E$, 则 $g(x)$ 在 E 上亦不可约, 因此 $g(x)$ 是 α 在 B 上的最小多项式. 由定理 3.2.4, $[K : E] = \deg(g(x)) = [K : B]$, 因此 $B = E$. 故 K/k 的中间域 E 被 $g(x)$ 完全确定, 但 $f(x)$ 仅有有限个因式, 因此 K/k 仅有有限个中间域.

(\Leftarrow) 若 k 为有限域, 由命题 3.4.13 即得 K/k 为单扩张. 下设 $|k| = +\infty$, $K = k(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$. 由归纳法, 只需证 $K = k(\alpha, \beta)$ 是单扩张. 对任意 $\lambda \in k$, 考虑 $E_\lambda = k(\alpha + \lambda\beta)$, 由于 K/k 仅有有限个中间域, 必存在互异的 $\lambda_1, \lambda_2 \in k$ 使得 $E_{\lambda_1} = E_{\lambda_2}$, 于是 $(\alpha + \lambda_1\beta) - (\alpha + \lambda_2\beta) = (\lambda_1 - \lambda_2)\beta \in E_{\lambda_1}$, 由 $\lambda_1 - \lambda_2 \in k^\times$ 即得 $\beta \in E_{\lambda_1}$, 进而 $\alpha = (\alpha + \lambda_1\beta) - \beta \in E_{\lambda_1}$, $k(\alpha, \beta) \subset E_{\lambda_1}$. 故 $K = k(\alpha, \beta) = k(\alpha + \lambda_1\beta)$ 为单扩张. \square

推论 5.2.26 (1) 若 K/k 为有限维单扩张, E 是 K/k 的中间域, 则 E/k 为单扩张.

(2) 有限 Galois 扩张是单扩张.

练习 5.2.27 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \omega) = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2} + \omega)$. 提示 由例 5.1.8 的 Hasse 图可见, 包含 $\sqrt[3]{2} + \omega$ 的最小子域只能为 $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \omega)$.

定义 5.2.28 称代数扩张 K/k 为可分扩张, 若 K 中每个元素在 k 上的最小多项式均可分.

定义 5.2.29 设 K/k 为有限维域扩张, 若 $u \in K$ 满足 $K = k(u)$, 则称 u 为 K/k 的本原元.

定理 5.2.30 (本原元定理) 设 K/k 为有限维可分扩张, 则 K/k 为单扩张.

证明 设 $K = k(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$, α_i 在 k 上的最小多项式为 $g_i(x)$, 则 $g_1(x), \dots, g_n(x)$ 均可分. 设 $g(x) = g_1(x) \cdots g_n(x) \in k[x]$, 则 $g(x)$ 亦可分. 考虑 $k \subset K \subset (K, g(x)) = E$, 由定义-定理 5.1.2 (3), E/k 为有限 Galois 扩张, 再由推论 5.2.26 (2) 与 (1) 知 K/k 为单扩张. \square

作为 Galois 理论的应用, 我们证明代数基本定理.

定理 3.2.20 \mathbb{C} 是代数闭域.

证明 在假定分析中的中值定理成立的前提下, 我们有如下事实:

- (1) 每个正实数 r 有实平方根. (设 $f(x) = x^2 - r$, 则 $f(1+r) > 0$ 且 $f(0) < 0$.)
- (2) 任意 2 次多项式 $g(x) \in \mathbb{C}[x]$ 有复根. (我们有求根公式.)
- (3) \mathbb{C} 无二次扩张, 即若有域扩张 $\mathbb{C} \subset K$, 则 $[K : \mathbb{C}] \neq 2$. (否则 K 中有元素在 \mathbb{C} 上的最小多项式为 2 次, 与 (2) 矛盾.)
- (4) 奇数次多项式 $f(x) \in \mathbb{R}[x]$ 必有实根. ($f(-\infty) = -\infty, f(+\infty) = +\infty$.)
- (5) 若有域扩张 $\mathbb{R} \subsetneq K$, 则 $[K : \mathbb{R}]$ 非奇数. (由 (4), 对任意 $\alpha \in K \setminus \mathbb{R}$, $[\mathbb{R}(\alpha) : \mathbb{R}]$ 为偶数.)

下面证明任意非常值多项式 $f(x) \in \mathbb{C}[x]$ 有复根. 对 $f(x) = \sum a_i x^i \in \mathbb{C}[x]$, 定义 $\bar{f}(x) = \sum \bar{a}_i x^i$. 设 $f(x)\bar{f}(x) = \sum c_k x^k$, 则 $c_k = \sum_{i+j=k} a_i \bar{a}_j$, 由此可见 $\bar{c}_k = c_k$ 即 $c_k \in \mathbb{R}$, 因此 $f(x)\bar{f}(x) \in \mathbb{R}[x]$. 由于 $f(x)$ 有复根当且仅当 $f(x)\bar{f}(x)$ 有复根, 只需证每个实多项式有复根.

设 $p(x) \in \mathbb{R}[x]$ 不可约, 并设 E/\mathbb{R} 为 $(x^2 + 1)p(x)$ 的分裂域, 则 $E \supset \mathbb{C}$. 由 $\text{char}(R) = 0$ 知 E/\mathbb{R} 为有限 Galois 扩张, 记 $G = \text{Gal}(E/\mathbb{R})$. 若 $|G| = 2^m k$, 其中 k 为奇数, 则由定理 4.6.2 (1), G 有 2^m 阶子群 H , 令 $B = E^H$. 由注记 5.2.19, $[B : \mathbb{R}] = [G : H] = k$, 这与前述事实 (3) 矛盾. 故 $k = 1$ 即 G 为 2-群. 假设 $E \supsetneq \mathbb{C}$, 则 $\text{Gal}(E/\mathbb{C}) \leq G$ 为非平凡 2-群, 由定理 4.5.55, 存在 $F \leq \text{Gal}(E/\mathbb{C})$ 使得 $[\text{Gal}(E/\mathbb{C}) : F] = 2$. 由注记 5.2.19, $[E^F : \mathbb{C}] = 2$, 这与前述事实 (3) 矛盾. 故 $E = \mathbb{C}$, 即 $p(x)$ 在 \mathbb{C} 中有根. \square

5.3 根式扩张

定义 5.3.1 称域扩张 E/k 为 m 型根式扩张, 若 $E = k(\alpha)$, 其中 $\alpha^m \in k$, 这里 m 为正整数.

定义 5.3.2 称域扩张塔 $k = E_0 \subset E_1 \subset \cdots \subset E_n$ 为根式扩张塔, 若每个 E_{i+1}/E_i 均为根式扩张.

定义 5.3.3 称 $f(x) \in k[x]$ 为根式可解的, 若存在根式扩张塔 $k = E_0 \subset E_1 \subset \cdots \subset E_n$, 使得 $f(x)$ 在 E_n 中分裂, 即 $E_n \supset (k, f(x))$.

例 5.3.4 设 $f(x) = x^2 + bx + c \in \mathbb{C}[x]$, $k = \mathbb{Q}(b, c)$, $E = k(\sqrt{b^2 - 4c})$, 则 E/k 为 2-型根式扩张, 且 $E = (k, f(x))$, 因此 $f(x)$ 为根式可解的.

讨论一 当根式扩张不是 Galois 扩张时略显棘手, 我们先讨论如下情形. 设 $E = k(\alpha)$, $\alpha^m = a \in k$.

- ◇ 若 k 中有 m 次本原单位根 ω , 则由 $x^m - a = (x - \alpha)(x - \omega\alpha) \cdots (x - \omega^{m-1}\alpha)$ 知 $E = (k, x^m - a)$ 是 k 上可分多项式的分裂域, 因此 E/k 为 Galois 扩张, 且有群嵌入

$$\text{Gal}(E/k) \hookrightarrow (\mathbb{Z}_m, +), \quad \sigma_i \mapsto \bar{i},$$

其中 $\sigma_i(\alpha) = \alpha\omega^i$ ($0 \leq i \leq m-1$), 因此 $\text{Gal}(E/k)$ 为 Abel 群.

- ◇ 若 $\text{char}(k) = 0$, 取 $E' = (E, x^m - 1)$. 由定理 4.2.14, $\text{Root}_{E'}(x^m - 1) \leq (E')^\times$ 为循环群, 且由 $\text{char}(k) = 0$ 知其阶恰为 m (参考引理 3.3.25 的证明), 故 E' 中存在 m 次本原单位根 ω .

$$\begin{array}{ccc} k & \xleftarrow{m \text{ 型根式扩张}} & E = k(\alpha) \\ \downarrow x^m-1 \text{ 的分裂域} & & \downarrow x^m-1 \text{ 的分裂域} \\ k' = k(\omega) & \xleftarrow{m \text{ 型根式扩张}} & E' = k'(\alpha) \end{array}$$

由上一种情形知 $\text{Gal}(E'/k') \hookrightarrow (\mathbb{Z}_m, +)$ 为 Abel 群. 而由 $k' = (k, x^m - 1)$ 知 $\text{Gal}(k'/k) \hookrightarrow U(\mathbb{Z}_m)$ 亦为 Abel 群. 注意到 $E' = (k, x^m - a)$, 因此 E'/k 为 Galois 扩张, 又 k'/k 亦为 Galois 扩张, 由命题 5.2.23 知 $\text{Gal}(E'/k') \triangleleft \text{Gal}(E'/k)$, 且 $\text{Gal}(E'/k)/\text{Gal}(E'/k') \simeq \text{Gal}(k'/k)$.

$$\begin{array}{ccccc} & & \text{Abel 群} & & \\ & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \\ \text{Gal}(E'/k') & \xleftarrow{\text{正规子群}} & \text{Gal}(E'/k) & \longrightarrow & \text{Gal}(k'/k) \\ & & \uparrow & & \\ & & \{\sigma \in \text{Gal}(E'/k) : \sigma(E) = E\} & & \\ & & \downarrow & & \\ & & \text{Gal}(E/k) & & \end{array}$$

讨论二 我们再进行如下观察.

- ◇ 若 $\text{char}(k) = 0$, 则从 k 出发的任何根式扩张塔 $k = E_0 \subset E_1 \subset \cdots \subset E_n$ 均可扩充为新的根式扩张塔 $k = E_0 \subset E_1 \subset \cdots \subset E_n \subset \cdots \subset E_m$, 使得 E_m/E_0 为 Galois 扩张.

证明 设 $E_n = k(\alpha_1, \cdots, \alpha_l)$, 其中 α_i 在 k 上的最小多项式为 $f_i(x)$. 令 $f(x) = f_1(x) \cdots f_l(x) \in k[x] \subset E_n[x]$, 取 $K = (E_n, f(x))$. 由根式扩张定义可知 $f(x)$ 为 E_n 上的可分多项式, 因此 K/E_n 为 Galois 扩张, 设 $\text{Gal}(K/E_n) = \{\sigma_0 = \text{Id}_K, \sigma_1, \cdots, \sigma_p\}$, 则有根式扩张塔

$$\begin{aligned} k &\subset \boxed{E_n \subset E_n \vee \sigma_1(E_n)} \subset E_n \vee \sigma_1(E_n) \vee \sigma_2(E_n) \subset \cdots \\ &\subset E_n \vee \sigma_1(E_n) \vee \cdots \vee \sigma_p(E_n) = K =: E_m. \end{aligned}$$

以框中部分为例说明这是根式扩张:

$$\boxed{E_n} \stackrel{\textcircled{1}}{\subset} E_n \vee \sigma_1(E_1) \stackrel{\textcircled{2}}{\subset} E_n \vee \sigma_1(E_2) \subset \cdots \subset \boxed{E_n \vee \sigma_1(E_n)},$$

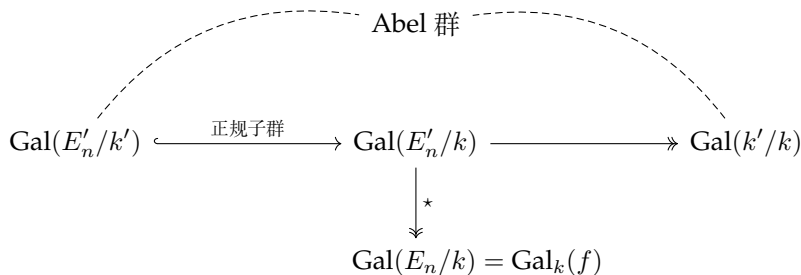
由 $k \subset E_1$ 为根式扩张知 ① 为根式扩张, 由 $E_1 \subset E_2$ 为根式扩张知 ② 为根式扩张, 以此类推. \square

- ◇ 现假设 k 有充分多的单位根. 根据上一点, 可设根式扩张塔 $k = E_0 \subset \cdots \subset E_{n-1} \subset E_n$ 满足 E_n/k 为 Galois 扩张, 且由于 k 有充分多的单位根, 根据讨论一的第一点, 每个 E_i/E_{i-1} 均为 Galois 扩张, 每个 $\text{Gal}(E_i/E_{i-1})$ 均为 Abel 群. 结合定理 5.1.6 与命题 5.2.23 即得

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Gal}(E_n/E_0) & \triangleleft & \text{Gal}(E_n/E_1) & \triangleleft & \text{Gal}(E_n/E_2) & \triangleleft & \cdots \triangleleft \text{Gal}(E_n/E_{n-1}) \text{ 为 Abel 群} \\ \text{Gal}(E_1/E_0) \text{ 为 Abel 群} & & \text{Gal}(E_2/E_1) \text{ 为 Abel 群} & & & & \end{array}$$

若 $f(x)$ 根式可解, $(k, f(x)) \subset E_n$, 则有满射 $\text{Gal}(E_n/k) \twoheadrightarrow \text{Gal}((k, f(x))/k) = \text{Gal}_k(f)$.

- ◇ 下面解释上一点“ k 有充分多的单位根”这一技术性条件并不难达成. 设 $\text{char}(k) = 0$, 且有根式扩张塔 $k = E_0 \subset \cdots \subset E_{n-1} \subset E_n$, 其中 E_n/k 为 Galois 扩张. 设 E_i/E_{i-1} 为 m_i 型根式扩张 ($1 \leq i \leq n$), 令 $M = \text{lcm}(m_1, \cdots, m_n)$, 取 $E' = (E, x^M - 1)$. 同讨论一的第二点可知 E' 中存在 M 次本原单位根 ω , 进而 E' 中有 m_1, \cdots, m_n 次本原单位根, 这就实现了“有充分多的单位根”.



* 处满射得自 E_n/k 为 Galois 扩张, 由命题 5.1.7, $\sigma(E_n) = E_n, \forall \sigma \in \text{Gal}(E'_n/k)$.

定义 5.3.5 设 G 为群, 若存在正规列 $G = G_0 \supset G_1 \supset \cdots \supset G_n = \{1_G\}$ 使得每个子商均为 Abel 群, 则称 G 为可解群.

例 5.3.6 (1) 若 $G_1 \triangleleft G$, G_1 与 G/G_1 均为 Abel 群, 则 G 为可解群, 因为 $G \supset G_1 \supset \{1_G\}$.

(2) Abel 群 G 是可解群, 因为 $G \supset \{1_G\}$.

(3) 若 G 是可解群, 则 $H \leq G$ 也是可解群.

证明 由 G 是可解群, 存在正规列 $G = G_0 \supset G_1 \supset \cdots \supset G_n = \{1_G\}$, 使得每个子商均为 Abel 群, 由定理 4.3.23 (2) 知 $H \supset H \cap G_1 \supset H \cap G_2 \supset \cdots \supset H \cap G_n$ 是正规列, 且每个子商均为 Abel 群. \square

(4) 设 $N \triangleleft G$, 则 G 是可解群当且仅当 N 与 G/N 均为可解群. 故可解群的子群和商群均为可解群.

证明 (\Rightarrow) 由 (3), 仅需证 G/N 为可解群. 由 G 是可解群, 存在正规列 $G = G_0 \supset G_1 \supset \cdots \supset G_n = \{1_G\}$, 使得每个子商均为 Abel 群. 由 $N \triangleleft G$ 可得正规列 $G/N \supset G_1N/N \supset G_2N/N \supset \cdots \supset G_nN/N$, 且由定理 4.3.22, $(G_iN/N)/(G_{i+1}N/N) \simeq G_iN/G_{i+1}N$ 为 Abel 群.

(\Leftarrow) 设正规列 $G/N = G^* = G_0^* \supset G_1^* \supset \cdots \supset G_n^* = \{1_{G^*}\}$ 满足每个子商均为 Abel 群, 由定理 4.3.21, 存在正规列 $G = G_0 \supset G_1 \supset \cdots \supset G_m = N$ 满足每个子商均为 Abel 群. 由于 N 是可解群, 存在正规列 $H = H_0 \supset H_1 \supset \cdots \supset H_m = \{1_H\}$ 满足每个子商均为 Abel 群. 将这两个正规列相接即得 G 为可解群. \square

(5) p -群 G 是可解群.

证明 对 $|G|$ 归纳. 若 $|G| \neq 1$, 由命题 4.5.53, $Z(G) \neq \{1_G\}$. 若 $Z(G) = G$, 则 G 是 Abel 群, 由 (2) 知 G 是可解群. 若 $Z(G) \neq G$, 则 $G/Z(G)$ 是阶 $< |G|$ 的 p 群, 由归纳假设知其为可解群. 由于 $Z(G) \triangleleft G$, $Z(G)$ 与 $G/Z(G)$ 均为可解群, 由 (4) 即得 G 为可解群. \square

(6) S_3 是可解群, 因为 $S_3 \supset A_3 \supset \{\text{Id}\}$.

(7) S_4 是可解群, 因为 $S_4 \supset A_4 \supset K_4 \supset \{\text{Id}\}$ (例 4.4.33).

(8) S_n ($n \geq 5$) 不是可解群, 否则由 (3), $A_n \triangleleft S_n$ 亦为可解群, 但由定理 4.4.36, A_n ($n \geq 5$) 是单群, 而非 Abel 群, 矛盾.

引理 5.3.7 设 A 为 Abel 群, 素数 $p \mid |A|$, 则存在 $A' \leq A$ 使得 $A/A' \simeq C_p$.

证明 由练习 4.8.37, 存在 $A' \leq A$ 使得 $|A/A'| = p$, 再由推论 4.2.12 即得证. \square

引理 5.3.8 设 K/k 为有限 Galois 扩张, $\text{Gal}(K/k) \simeq C_p = \langle \sigma \rangle$, 其中 p 为素数. 若 k 中有 p 次本原单位根, 则 K/k 为 p 型根式扩张.

证明 如练习 3.1.7, $\sigma : K \rightarrow K$ 可视为 k -线性自同构. 由 $\langle \sigma \rangle = C_p$ 可知 $x^p - 1$ 是 σ 的最小多项式, 而 $[K : k] = |\text{Gal}(K/k)| = p$, 因此 $x^p - 1$ 是 σ 的特征多项式. 由于 p 次本原单位根 $\omega \in k$ 满足 $\omega^p - 1 = 0$, 因此 ω 是 σ 的特征值, 设 β 是 ω 对应的特征向量, 则 $\sigma(\beta) = \omega\beta$, 因此 $\beta \notin k$ 且 $\sigma(\beta^p) = [\sigma(\beta)]^p = (\omega\beta)^p = \beta^p$, 由命题 5.1.7 即知 $\beta^p \in k$. 考虑域扩张塔 $k \subsetneq k(\beta) \subset K$, 由定理 3.2.4, $[k(\beta) : k] \mid [K : k]$, 而 $[k(\beta) : k] > 1$, $[K : k] = p$, 因此 $K = k(\beta)$. 故 K/k 为 p 型根式扩张. \square

定理 5.3.9 (Galois 大定理) 设 k 为域, $\text{char}(k) = 0$, $f(x) \in k[x]$, 则 $f(x)$ 根式可解当且仅当 $\text{Gal}_k(f)$ 为可解群.

证明 (\Rightarrow) 在前面讨论二的第二点中已经看到, 若 $f(x)$ 根式可解, 则 $\text{Gal}(E'_n/k)$ 的正规子群 $\text{Gal}(E'_n/k')$ 与相应的商群 $\text{Gal}(k'/k)$ 均为 Abel 群, 从而为可解群, 由例 5.3.6 (4) 知 $\text{Gal}(E'_n/k)$ 为可解群. 而 $\text{Gal}_k(f)$ 同构于可解群 $\text{Gal}(E'_n/k)$ 的商群, 由例 5.3.6 (4) 即知 $\text{Gal}_k(f)$ 为可解群.

(\Leftarrow) 若 $G = \text{Gal}_k(f)$ 为可解群, 取 $G_1 \trianglelefteq G$ 使得 G/G_1 为 Abel 群. 设素数 $p \mid |G|$, 则由引理 5.3.7, 存在 G/G_1 的子群 H/G_1 , 使得 $(G/G_1)/(H/G_1) \simeq C_p$, 进而由定理 4.3.22 知 $H \triangleleft G$ 且 $G/H \simeq C_p$. 令 $K = (k, f(x))$, 由于 $\text{Gal}(K/K^H) = H \triangleleft G$, 由命题 5.2.23, K^H/k 为 Galois 扩张, 且 $\text{Gal}(K^H/k) \simeq G/H \simeq C_p$. 而由例 5.3.6 (4), $\text{Gal}(K/K^H) = H \triangleleft G$ 为可解群, 如上操作可得 $H' \triangleleft H$, 使得 $H/H' \simeq C_{p'}$, 其中 $p' \mid |H|$ 为素数.

$$\begin{array}{ccccccc} k & \xrightarrow{\text{Galois 扩张}} & K^H & \xrightarrow{\text{Galois 扩张}} & K^{H'} & \cdots \text{如前} \cdots & K \\ \parallel & & \parallel & & \parallel & & \nearrow \\ E_0 & \xrightarrow{\text{Gal}(E_1/E_0) \simeq C_p} & E_1 & \xrightarrow{\text{Gal}(E_2/E_1) \simeq C_{p'}} & E_2 & \cdots & \end{array}$$

◇ 若 k 有 $|G|$ 次本原单位根 (存在性由 $\text{char}(k) = 0$ 确保), 则对任意素数 $p \mid |G|$, k 亦有 p 次本原单位根. 由引理 5.3.8, 上图中每个 E_{i+1}/E_i 均为根式扩张, 最终便得到根式扩张塔 $k = E_0 \subset E_1 \subset E_2 \subset \cdots \subset K = (k, f(x))$, 即 $f(x)$ 根式可解.

◇ 对于一般情形, 记 ω 为 $|G|$ 次本原单位根, 令 $k^* = k(\omega)$, $K^* = K(\omega)$, 其中 ω 为 $|G|$ 次本原单位根. 由 $K = (k, f(x))$ 知 $K^* = (k^*, (x^{|G|} - 1)f(x))$, 因此 K^*/k^* 为 Galois 扩张, 进而 K^*/k^* 亦为 Galois 扩张. 令 $G^* = \text{Gal}(K^*/k^*)$, 考虑群同态的复合

$$\rho : G^* = \text{Gal}(K^*/k^*) \hookrightarrow \text{Gal}(K^*/k) \twoheadrightarrow G = \text{Gal}(K/k),$$

其中第二个箭头的良定性来自命题 5.1.7: 由于 K^*/k 为 Galois 扩张, K/k 亦为 Galois 扩张, 因此 $\sigma(K) = K, \forall \sigma \in \text{Gal}(K^*/k)$. 由于

$$\begin{aligned} \text{Ker } \rho &= \{\sigma \in \text{Aut}(K^*) : \sigma|_K = \text{Id}_K, \sigma|_{k^*} = \text{Id}_{k^*}\} \\ &= \{\sigma \in \text{Aut}(K^*) : \sigma|_K = \text{Id}_K, \sigma|_{k^*} = \text{Id}_{k^*}, \sigma(\omega) = \omega\} \\ &= \{\sigma \in \text{Aut}(K^*) : \sigma|_{K(\omega)} = \text{Id}_{K(\omega)}\} = \{\text{Id}_{K^*}\}, \end{aligned}$$

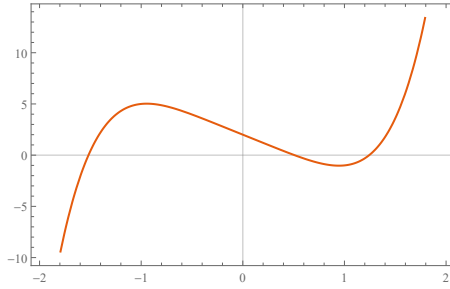
由定理 4.3.16, G^* 同构于可解群 G 的子群, 由例 5.3.6 (3), G^* 为可解群. 由于 $|G^*| \mid |G|$, k^* 中有

$|G^*|$ 次本原单位根, 根据上一类情形, 结合 k^*/k 为根式扩张, 可得根式扩张塔

$$k \subset k^* = E_0^* \subset E_1^* \subset E_2^* \subset \cdots \subset K^*.$$

由于 $K^* \supset K = (k, f(x))$, $f(x)$ 根式可解. □

例 5.3.10 考虑 $f(x) = x^5 - 4x + 2 \in \mathbb{Q}[x]$, 易知 $f(x)$ 有 3 个实根, 2 个虚根.



记 $\text{Root}_{\mathbb{C}}(f) = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5\}$, 其中 $\alpha_1, \alpha_2 \notin \mathbb{R}$. 由练习 4.5.8 可得群的单同态 $\theta: \text{Gal}_{\mathbb{Q}}(f) \hookrightarrow S_5$. 由于 f 恰有 2 个虚根, 复共轭 $\sigma \in \text{Gal}_{\mathbb{Q}}(f)$, 因此 $(12) \in \text{Im } \theta$. 由 Eisenstein 判别法知 $f(x) \in \mathbb{Q}[x]$ 不可约, 因此 $[\mathbb{Q}(\alpha_1) : \mathbb{Q}] = \deg(f) = 5$, 从而由定理 3.2.4 与定义-定理 5.1.2 (2) 知 $5 \mid [(\mathbb{Q}, f) : \mathbb{Q}] = |\text{Gal}_{\mathbb{Q}}(f)|$. 由定理 4.6.11 即知 $\text{Gal}_{\mathbb{Q}}(f)$ 中有 5 阶元, 即 $\text{Im } \theta$ 中有 5-轮换. 故由练习 5.3.11 知 $\text{Im } \theta = S_5$, 即 $\text{Gal}_{\mathbb{Q}}(f) \simeq S_5$ 非可解群.

练习 5.3.11 设 p 为素数, 则 S_p 可由 (12) 与任一 p -轮换生成.

证明 这等价于证明 S_p 可由 $\tau = (1a)$ 与 $c = (12 \cdots p)$ 生成, 其中 $a \in \{2, \dots, p\}$. 首先, 由引理 4.4.12,

$$c\tau c^{-1} = (c(1)c(a)) = (2, a+1) \quad (\text{这里 } a+1 \text{ 在模 } p \text{ 意义下考虑}),$$

重复此操作可得所有形如 $(k, k+a)$ 的对换, 因此可以生成 $(p, a), (a, 2a), (2a, 3a), \dots, ((a^{-1}-1)a, 1)$, 这里 a^{-1} 在模 p 意义下考虑. 再次利用引理 4.4.12 可得

$$\begin{aligned} (a, 2a)(p, a)(a, 2a) &= (p, 2a), \\ (2a, 3a)(p, 2a)(2a, 3a) &= (p, 3a), \\ &\vdots \\ ((a^{-1}-1)a, 1)(p, (a^{-1}-1)a)((a^{-1}-1)a, 1) &= (p, 1), \\ c(p, 1)c^{-1} &= (c(p)c(1)) = (12), \\ c(12)c^{-1} &= (c(1)c(2)) = (23), \\ &\vdots \\ c(p-2, p-1)c^{-1} &= (c(p-2)c(p-1)) = (p-1, p). \end{aligned}$$

由引理 4.4.27, $(12), (23), \dots, (p-1, p)$ 可生成 S_p . □

定理 5.3.12 (Abel-Ruffini) 考虑域 k 上的 n 元有理函数域 $F = k(t_1, \dots, t_n)$, 则多项式

$$f(x) = x^n - t_1 x^{n-1} + t_2 x^{n-2} + \cdots + (-1)^n t_n \in F[x]$$

不可约, 且 $\text{Gal}_F(f) \simeq S_n$. 特别地, 当 $n \geq 5$ 时 f 无法用根式求解.

注记 5.3.13 这里取系数 t_1, \dots, t_n 为独立变元, 意蕴在于考虑 F 上“一般的” n 次首一多项式. 在这个意义下, “一般的” 五次以上多项式方程无根式解.

证明 考虑 n 元多项式环 $k[x_1, \dots, x_n]$, 其上有左 S_n -作用: $(\sigma, f) \mapsto f(x_{\sigma(1)}, \dots, x_{\sigma(n)})$. 由 Vieta 定理, n 元初等对称多项式

$$e_k := \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} x_{i_1} \cdots x_{i_k}, \quad 1 \leq k \leq n$$

由

$$\prod_{i=1}^n (X - x_i) = X^n - e_1 X^{n-1} + \dots + (-1)^n e_n$$

刻画, 这里 X 为变元. 对称多项式基本定理给出同构

$$F = k(t_1, \dots, t_n) \xrightarrow{\sim} k(x_1, \dots, x_n)^{S_n} = k(e_1, \dots, e_n), \quad t_i \mapsto e_i.$$

借此视 $k(x_1, \dots, x_n)$ 为 $k(t_1, \dots, t_n)$ 的扩张. 由 $k(x_1, \dots, x_n)^{S_n} = F$ 及定义-定理 5.1.2(1) 知 $k(x_1, \dots, x_n)/F$ 为 Galois 扩张, Galois 群实现为 S_n 在 $\{x_1, \dots, x_n\}$ 上的自然作用. 而 $\{x_1, \dots, x_n\}$ 恰为 f 的根集, 因此 $k(x_1, \dots, x_n)$ 是 f 的分裂域, $\text{Gal}_F(f) \simeq S_n$, 再结合引理 4.5.22 即知 f 不可约. 当 $n \geq 5$ 时, 由例 5.3.6(8) 知 f 无法用根式求解. \square

5.4 判别式

定义 5.4.1 设 $\text{char}(k) = 0$, $f(x) \in k[x]$, $\deg(f) = n$. 若 $f(x)$ 在 $K = (k, f(x))$ 上分裂为

$$f(x) = c(x - \alpha_1) \cdots (x - \alpha_n),$$

定义其判别式

$$D(f) = \Delta^2 := \left(\prod_{i < j} (\alpha_i - \alpha_j) \right)^2 \in k.$$

注记 5.4.2 (1) $D(f) = \frac{(-1)^{\frac{n(n-1)}{2}}}{c} \text{Res}(f, f')$.

(2) $D(f) \neq 0 \iff f$ 无重根.

例 5.4.3 若 $f(x) = ax^2 + bx + c$ ($a \neq 0$), 则 $D(f) = -\frac{1}{a} \begin{vmatrix} a & b & c \\ 2a & b & \\ & 2a & b \end{vmatrix} = b^2 - 4ac$.

例 5.4.4 若 $f(x) = x^3 + qx + r$, 则

$$D(f) = - \begin{vmatrix} 1 & 0 & q & r \\ & 1 & 0 & q \\ 3 & 0 & q & \\ & 3 & 0 & q \end{vmatrix} = -4q^3 - 27r^2.$$

引理 5.4.5 设 $f(x) \in \mathbb{Q}[x]$ 无重根, $\deg(f) = n$, $E = (\mathbb{Q}, f(x))$, $G = \text{Gal}(E/\mathbb{Q})$, 由练习 4.5.8, $G \hookrightarrow S_n$. 令 $H = G \cap A_n$, 由定理 4.3.23 (2), $H \triangleleft G$ 且 $G/H \hookrightarrow S_n/A_n \simeq C_2$. 我们有以下结论:

(1) $E^H = \mathbb{Q}(\Delta)$, 这里 $\Delta = \sqrt{D}$.

(2) $\Delta = \sqrt{D} \in \mathbb{Q}$ 当且仅当 $H = G$ (即 $G \hookrightarrow A_n$, G 中元素均为偶置换).

证明 对任意 $\sigma \in S_n$, $\sigma(\Delta) = \text{sgn}(\sigma)\Delta$, 而 $H \leq A_n$, 因此 $\Delta \in E^H$, 进而 $\mathbb{Q}(\Delta) \subset E^H$, $[E^H : \mathbb{Q}] = [G : H] \leq 2$.

◇ 若 $[G : H] = 1$, 则 $G = H$, $\mathbb{Q}(\Delta) \subset E^H = E^G = \mathbb{Q}$, 因此 $\Delta \in \mathbb{Q}$, $E^H = \mathbb{Q}(\Delta)$.

◇ 若 $[G : H] = 2$, 则存在 $\sigma \in G \setminus A_n$, 使得 $\sigma(\Delta) = -\Delta$. 由 $\sigma|_{\mathbb{Q}} = \text{Id}_{\mathbb{Q}}$ 即知 $\Delta \notin \mathbb{Q}$, 考虑 $\mathbb{Q} \subsetneq \mathbb{Q}(\Delta) \subset E^H$, 由 $[E^H : \mathbb{Q}] \leq 2$ 与 $[\mathbb{Q}(\Delta) : \mathbb{Q}] \geq 2$ 即知 $E^H = \mathbb{Q}(\Delta)$. \square

定理 5.4.6 设 $f(x) \in \mathbb{Q}[x]$ 不可约, $\deg(f) = 3$, $G = \text{Gal}_{\mathbb{Q}}(f)$, $D = D(f) \neq 0$, 则

(1) $f(x)$ 恰有 1 个实根当且仅当 $D(f) < 0$, 此时 $G \simeq S_3$.

(2) $f(x)$ 恰有 3 个实根当且仅当 $D(f) > 0$, 此时若 $\sqrt{D} \in \mathbb{Q}$, 则 $G \simeq A_3 \simeq \mathbb{Z}_3$, 若 $\sqrt{D} \notin \mathbb{Q}$, 则 $G \simeq S_3$.

证明 令 $E = (\mathbb{Q}, f(x))$. 由 $f(x) \in \mathbb{Q}[x]$ 不可约即知 $D \neq 0$. 由练习 4.5.8, $G \hookrightarrow S_3$, 再设 $f(x) = (x - \alpha_1)(x - \alpha_2)(x - \alpha_3)$, 则由 $\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(\alpha_1) \subset E$ 可知 $3 = \deg(f) = [\mathbb{Q}(\alpha_1) : \mathbb{Q}] \mid [E : \mathbb{Q}] = |G|$, 因此 $G \simeq A_3$ 或 S_3 .

(1) 若 $f(x)$ 恰有 1 个实根 α 与两个虚根 $\beta = u + iv, \bar{\beta} = u - iv$, 则

$$\Delta = (\alpha - \beta)(\alpha - \bar{\beta})(\beta - \bar{\beta}) = (\alpha - \beta)(\overline{\alpha - \beta})(\beta - \bar{\beta}) = 2iv|\alpha - \beta|^2,$$

从而 $D = \Delta^2 = -4v^2|\alpha - \beta|^4 < 0$. 此时 $E \neq \mathbb{Q}(\alpha)$, 因此 $|G| > 3$, 即 $G \simeq S_3$.

(2) 若 $f(x)$ 有 3 个实根, 则 $\Delta \in \mathbb{R}$, 从而 $D = \Delta^2 > 0$, $\sqrt{D} \in \mathbb{R}$. 由引理 5.4.5, 若 $\sqrt{D} \in \mathbb{Q}$, 则 $G \hookrightarrow A_3$, 即 $G \simeq A_3 \simeq \mathbb{Z}_3$; 若 $\sqrt{D} \notin \mathbb{Q}$, 则 $G \simeq S_3$. \square

例 5.4.7 (1) $\text{Gal}_{\mathbb{Q}}(x^3 - 2) \simeq S_3$.

(2) $\text{Gal}_{\mathbb{Q}}(x^3 - 4x + 2) \simeq S_3$.

(3) $\text{Gal}_{\mathbb{Q}}(x^3 - x + \frac{1}{3}) \simeq A_3 \simeq \mathbb{Z}_3$.

第二部分

往年真题

第六章

期中考试题目

6.1 2020 春期中考试

1. 考虑 Gauss 整数环 $R = \mathbb{Z}[i]$.

- (1) 设 p 为奇素数. 试证明: $x^n - p \in R[x]$ 总是不可约的.
- (2) 在 R 中将 $81 + 8i$ 分解为不可约元的乘积.
- (3) 求不定方程 $x^2 + y^2 = 585$ 的所有整数解.
- (4) 考虑商环 $R_1 = R/(3)$ 以及 $R_2 = R/(5)$. 计算 $\text{Aut}(R_1)$ 与 $\text{Aut}(R_2)$ 的阶.

2. 考虑多项式环 $\mathbb{Q}[x]$, 设 S 为其包含 \mathbb{Q} 以及 x^2, x^3 的最小子环.

- (1) 证明: $S \simeq \mathbb{Q}[y, z]/(y^2 - z^3)$.
- (2) 证明: $S \not\simeq \mathbb{Q}[x]$.
- (3) 证明: $\text{Frac}(S) \simeq \mathbb{Q}(x)$.

3. 设 E 为 $f(x) = x^4 - 2 \in \mathbb{Q}[x]$ 在 \mathbb{Q} 上的分裂域.

- (1) 计算 $[E : \mathbb{Q}]$.
- (2) 列出 $\text{Aut}(E)$ 中的元素.
- (3) 设 $K = \mathbb{Q}(\sqrt[4]{2})$. 试给出 $\text{Aut}(K)$ 中的元素, 并给出 K 的所有非平凡子域.
- (4) 设 $u = \sqrt[4]{2} + i$. 试求 u 在 \mathbb{Q} 上的最小多项式.

4. 设 (R, ϕ) 的 Euclid 整环, $a \in R$ 是 R 中所有非零非单位元素中 $\phi(a)$ 取值最小的.

- (1) 试证明: $R/(a) = \{\bar{r} : r = 0 \text{ 或 } r \in U(R)\}$, 这里 $\bar{r} = r + (a)$ 表示其模 (a) 同余类.
- (2) 试证明: $R = \mathbb{Z}\left[\frac{1+\sqrt{-19}}{2}\right]$ 不是 Euclid 整环.

6.2 2022 春期中考试

1. 设 $R = \mathbb{Z}[i]$, $K = \mathbb{Q}(i)$, 域扩张 E/K 使得 E 为 $x^4 + x^3 + x^2 + x + 1 \in K[x]$ 的分裂域.

- (1) 证明: $K \simeq \text{Frac}(R)$.
- (2) 列出 R 的所有子环, 并指出哪些是 UFD.
- (3) 在 R 中计算 $\gcd(4 + 7i, 4 - 3i)$.
- (4) 计算商环 $R/(4 + 7i, 4 - 3i)$ 的阶.
- (5) 分类商环 $R/(4 - 3i)$ 的所有理想, 并指出哪些是素理想.
- (6) 判断并论证 $x^4 + x^3 + x^2 + x + 1 \in K[x]$ 的可约性.
- (7) 计算 $[E : \mathbb{Q}]$.
- (8) 判断并论证 $\text{Aut}(E)$ 是否为 Abel 群.

解答 (1) 由 $R \subset \mathbb{Q}(i) \subset \text{Frac}(R)$ 再取分式域即得 $K \simeq \text{Frac}(R)$.

(2) 由练习 2.2.34, R 的子环恰为 \mathbb{Z} 和 $\mathbb{Z}[ni]$, 其中 n 为正整数. 由于 \mathbb{Z} 与 $\mathbb{Z}[i]$ 均为 ED, 它们都是 UFD. 对 $n \geq 2$, 注意到 $\text{Frac}(\mathbb{Z}[ni]) = \mathbb{Q}(i)$, $i \in \mathbb{Q}(i)$ 是首一整系数方程 $x^2 + 1 = 0$ 的解, 但 $i \notin \mathbb{Z}[ni]$, 由命题 2.5.16, UFD 是整闭环, 因此 $\mathbb{Z}[ni]$ ($n \geq 2$) 不是 UFD.

(3) 有素分解 $4 + 7i = -(1 - 2i)(2 - 3i)$, $4 - 3i = i(1 - 2i)^2$, 因此 $\gcd(4 + 7i, 4 - 3i)$ 相伴于 $1 - 2i$.

(4) 由 (3), $R/(4 + 7i, 4 - 3i) = R/(1 - 2i)$. 由练习 2.6.26, $R/(1 - 2i) \simeq \mathbb{F}_5$, 故其阶为 5.

(5) 由例 2.2.27 对应定理, $\{R/(4 - 3i) \text{ 的理想} \} \xrightarrow{1:1} R$ 中包含 $(4 - 3i)$ 的理想, 而 R 为 PID, 若 $(4 - 3i) \subset (a)$, 则 $a \mid (4 - 3i)$. 由素分解 $4 - 3i = i(1 - 2i)^2$ 即知 R 中包含 $(4 - 3i)$ 的理想恰为 $(i) = R, (1 - 2i), (4 - 3i)$. 故 $R/(4 - 3i)$ 的理想恰为 $R/(4 - 3i), (1 - 2i)/(4 - 3i), \{0\}$. 由练习 2.3.35 (3), 其中素理想为 $(1 - 2i)/(4 - 3i)$.

(6) 由练习 2.7.46 (2) 与命题 2.7.34, 等价于判定

$$(x + 1)^4 + (x + 1)^3 + (x + 1)^2 + (x + 1) + 1 = x^4 + 5x^3 + 10x^2 + 5x + 1 \in R[x]$$

的可约性. 利用 Gauss 素数 $1 - 2i$ 的 Eisenstein 判别法即知其不可约.

(7) 由于 $E = K(\zeta_5, \zeta_5^2, \zeta_5^3, \zeta_5^4) = K(\zeta_5)$, 由定理 3.1.23 (1), $[E : K] = 4$. 由定理 3.2.4, $[E : \mathbb{Q}] = [E : K][K : \mathbb{Q}] = 4 \cdot 2 = 8$.

(8) $E = \mathbb{Q}(i, \zeta_5) = \mathbb{Q}(\zeta_{\text{lcm}(4,5)}) = \mathbb{Q}(\zeta_{20})$. 由定理 3.5.21, $\text{Aut}(E) = \text{Aut}(\mathbb{Q}(\zeta_{20})) \simeq U(\mathbb{Z}_{20})$ 是 Abel 群. \square

2. 考虑八元域 $\mathbb{F}_8 = \mathbb{F}_2[x]/(x^3 + x + \bar{1})$, 记 $u = \bar{x}$. 于是 \mathbb{F}_8 中元素均形如 $a + bu + cu^2$, 其中 $a, b, c \in \mathbb{F}_2$. 自然视 \mathbb{F}_2 为 \mathbb{F}_8 的子域.

- (1) 分类 \mathbb{F}_8 的所有子环.
- (2) \mathbb{F}_8 中共有多少个首一 2 次不可约多项式?
- (3) 将多项式 $x^3 + x + \bar{1}$ 在 $\mathbb{F}_8[x]$ 中进行不可约分解.
- (4) 将多项式 $x^{16} + x$ 在 $\mathbb{F}_8[x]$ 中进行不可约分解.
- (5) 计算 $(u^2 + \bar{1})^{-1}$.

(6) 考虑商环 $R = \mathbb{F}_2[y]/(y^3 + y^2 + \bar{1})$, 论证并具体构造环同构 $R \simeq \mathbb{F}_8$.

解答 (1) 由练习 2.1.26, \mathbb{F}_8 的子环即 \mathbb{F}_8 的子域. 由命题 3.4.10, \mathbb{F}_8 的子域即 \mathbb{F}_2 与 \mathbb{F}_8 .

(2) $\mathbb{F}_8[x]$ 中首一 2 次多项式共有 $8 \cdot 8 = 64$ 个, 其中可约多项式形如 $(x - \alpha)(x - \beta)$, 共有 $\binom{8}{2} + 8 = 36$ 个. 因此 \mathbb{F}_8 中首一不可约 2 次多项式共有 $64 - 36 = 28$ 个.

(3) 由于 u 是根, 由命题 3.4.15, $x^3 + x + \bar{1} = (x - u)(x - u^2)(x - u^4) = (x + u)(x + u^2)(x + u^2 + u)$.

(4)

(5) 待定系数得 $u(u^2 + \bar{1}) = \bar{1} \implies (u^2 + \bar{1})^{-1} = u$.

(6) 由于 $y^3 + y^2 + \bar{1} \in \mathbb{F}_2[y]$ 不可约, 因此 E 是八元域. 记 $v = \bar{y}$, 则 $R = \mathbb{F}_2(v)$. 设 $\theta: R \rightarrow \mathbb{F}_8$ 为环同态, 则 θ 由 $\theta(v)$ 唯一决定. 由于 $v \in R$ 是 $x^3 + x^2 + \bar{1} \in R[x]$ 的根, 因此 $\theta(v) \in \mathbb{F}_8$ 是 $x^3 + x^2 + \bar{1}$ 的根, 从而 $\theta(v) = u + \bar{1}$ 或 $u^2 + \bar{1}$ 或 $u^2 + u + \bar{1}$. 考虑赋值同态

$$\text{ev}_{u+\bar{1}}: \mathbb{F}_2[y] \rightarrow \mathbb{F}_8, \quad f(y) \mapsto f(u + \bar{1}).$$

由于 $(y^3 + y^2 + \bar{1}) \subset \text{Ker}(\text{ev}_{u+\bar{1}})$. 因此 $\text{ev}_{u+\bar{1}}$ 诱导环嵌入 $\theta: R \hookrightarrow \mathbb{F}_8$ 使得 $v \mapsto u + \bar{1}$. 又因为 $|R| = |\mathbb{F}_8|$, θ 为环同构. \square

3. 设 $K = \mathbb{Q}(t)$, $E = \mathbb{Q}(t^4)$ 为 K 中包含 t^4 的最小子域.

(1) 证明 $E \simeq K$.

(2) 计算 $[K : E]$.

(3) 计算 $\text{Aut}(K/E)$ 的阶.

(4) 判断并论证 $\mathbb{Q}(t^2)$ 上的任何自同构是否均可延拓为 K 上的自同构.

4. 设 R 为整环, 记 $R^\times = R \setminus \{0_R\}$. 试证明以下等价:

(1) 环 R 为 PID.

(2) 存在映射 $\phi: R^\times \rightarrow \mathbb{N}$ 满足如下条件: 对任意 $a, b \in R^\times$, 要么 $b \mid a$, 要么存在适当的 $\delta, \gamma \in R$ 使得 $\phi(a\delta - b\gamma) < \phi(b)$. (注: 两种情况可能同时发生.)

6.3 2023 春期中考试

1. 设 $R = \mathbb{Z}[i]$, $S = \mathbb{Z}[2i]$, $K = \mathbb{Q}(i)$.

(1) 求不定方程 $x^2 + y^2 = 325$ 的所有整数解.

(2) 在 R 中计算 $\gcd(9 + 2i, 15 - 20i)$.

(3) 判定并论证 $x^4 - 2 \in K[x]$ 的可约性.

(4) 分类商环 $R/5R$ 的所有子环与所有理想. 这里 $5R$ 表示元素 5 在 R 中生成的主理想.

(5) 计算 $\text{Aut}(R/5R)$ 的阶.

(6) 计算商环 $S/(3 + 2i)$ 的阶, 判定其是否为域.

(7) 判断商环 $S/2S, \mathbb{Z}_4$ 与 $\mathbb{F}_2[y]/(y^2 + \bar{1})$ 三者之间是否有环同构.

(8) 判断整环 S 是否为 UFD.

解答 (1) $(\pm 1, \pm 18), (\pm 6, \pm 17), (\pm 10, \pm 15)$.

(2) 有素分解 $9 + 2i = (1 - 2i)(1 + 4i)$, $15 - 20i = -5(1 + 2i)^2$, 因此 $\gcd(9 + 2i, 15 - 20i)$ 相伴于 1.

(3) 由于 $K = \text{Frac}(R)$, $x^4 - 2 \in K[x]$ 本原, 由命题 2.7.34, 这等价于判断 $x^4 - 2 \in R[x]$ 的可约性.

(法一) 由于 $x^4 - 2$ 在 R 中无根, 若它可约, 只能分解为两个 2 次多项式乘积, 设为 $x^4 - 2 = (x^2 + ax + b)(x^2 + cx + d)$, 其中 $a, b, c, d \in \mathbb{Z}[i]$. 整理得

$$\begin{cases} a + c = 0, \\ b + ac + d = 0, \\ ad + bc = 0, \\ bd = 2. \end{cases} \implies \begin{cases} c = -a, \\ a^2 = b + d, \\ a(d - b) = 0, \\ bd = 2. \end{cases}$$

若 $a = 0$, 则 $d = -b$, $b^2 = -2$, 无解; 若 $a \neq 0$, 则 $b = d$, $b^2 = 2$, 无解. 故 $x^4 - 2 \in R[x]$ 不可约, 从而在 $K[x]$ 中也不可约.

(法二) 由练习 2.6.26, $R/(1 + 2i) \simeq \mathbb{F}_5$. 由模 p 约化, 为证 $x^4 - 2 \in R[x]$ 不可约, 只需证 $x^4 - \bar{2} \in \mathbb{F}_5[x]$ 不可约. 再由命题 3.4.8, 只需证 $\gcd_{\mathbb{F}_5[x]}(x^{5^2} - x, x^4 - \bar{2}) = \bar{1}$, 这来自

$$\begin{aligned} (x^4 - \bar{2}, x^{25} - x) &= (x^4 - \bar{2}, \bar{2}x^{21} - x) = (x^4 - \bar{2}, \bar{4}x^{17} - x) = (x^4 - \bar{2}, \bar{3}x^{13} - x) \\ &= (x^4 - \bar{2}, x^9 - x) = (x^4 - \bar{2}, \bar{2}x^5 - \bar{2}) = (x^4 - \bar{2}, \bar{4}x - \bar{2}) \\ &= (x^4 - \bar{2}, x + \bar{2}) = \bar{1}. \end{aligned}$$

(4) ① 由练习 2.2.30, $\{R/5R \text{ 的子环}\} \xleftrightarrow{1:1} \{R \text{ 中包含 } 5R \text{ 的子环}\}$, 而由练习 2.2.34 (2), R 中包含 $5R$ 的子环即 R 与 $\mathbb{Z}[5i]$, 故 $R/5R$ 的所有子环恰为 $R/5R$ 与 $\mathbb{Z}[5i]/5R$. ② 由例 2.2.27 对应定理, $\{R/5R \text{ 的理想}\} \xleftrightarrow{1:1} \{R \text{ 中包含 } 5R \text{ 的理想}\}$, 而 R 为 PID, 若 $5R \subset (a)$, 则 $a \mid 5$. 由素分解 $5 = (1 + 2i)(1 - 2i)$ 即知 R 中包含 $5R$ 的理想恰为 $(1) = R, (1 + 2i), (1 - 2i), (5) = 5R$. 故 $R/5R$ 的理想恰为 $R/5R, (1 + 2i)/5R, (1 - 2i)/5R, \{0\}$.

(5) 有环同构 (参考练习 2.6.9)

$$\begin{aligned} \mathbb{Z}[i]/(5) &\simeq (\mathbb{Z}[x]/(x^2 + 1))/(5) \simeq \mathbb{Z}[x]/(5, x^2 + 1) \simeq (\mathbb{Z}[x]/(5))/(x^2 + 1) \\ &\simeq (\mathbb{Z}/(5))[x]/(x^2 + \bar{1}) \simeq \mathbb{F}_5[x]/(x^2 + \bar{1}) \simeq \mathbb{F}_5[x]/((x - 2)(x - 3)) \\ &\stackrel{*}{\simeq} (\mathbb{F}_5[x]/(x - 2)) \times (\mathbb{F}_5[x]/(x - 3)) \simeq \mathbb{F}_5 \times \mathbb{F}_5, \end{aligned}$$

其中 \star 处的同构来自定理 2.8.4. 由注记 2.2.10 (3), $\text{Aut}(R/5R) \simeq \text{Aut}(\mathbb{F}_5 \times \mathbb{F}_5)$. 设 $\theta \in \text{Aut}(\mathbb{F}_5 \times \mathbb{F}_5)$, $\theta((1, 0)) = (a, b)$, 则

$$(a^2, b^2) = \theta((1, 0))^2 = \theta((1, 0)) = (a, b) \implies a = 0 \text{ 或 } 1, b = 0 \text{ 或 } 1.$$

若 $(a, b) = (0, 0)$ 或 $(1, 1)$, θ 均非单射, 排除. 而 $\phi: \mathbb{F}_5 \times \mathbb{F}_5 \rightarrow \mathbb{F}_5 \times \mathbb{F}_5, (x, y) \mapsto (y, x)$ 与 $\text{Id}_{\mathbb{F}_5 \times \mathbb{F}_5}$ 均为同构, 因此 $|\text{Aut}(\mathbb{F}_5 \times \mathbb{F}_5)| = 2$, 即 $|\text{Aut}(R/5R)| = 2$.

(6) 有环同构

$$\begin{aligned} \mathbb{Z}[2i]/(3 + 2i) &\simeq (\mathbb{Z}[x]/(x^2 + 4))/(3 + x) \simeq \mathbb{Z}[x]/(3 + x, x^2 + 4) \\ &\stackrel{*}{\simeq} (\mathbb{Z}[x]/(13))/(3 + x, x^2 + 4)/(13) \simeq \mathbb{F}_{13}[x]/(x + \bar{3}, x^2 + \bar{4}), \end{aligned}$$

其中 \star 处的同构来自例 2.2.27, 这里用到了 $(13) \subset (3+x, x^2+4)$, 这是因为

$$x(x+3) - (x^2+4) = 3x-4, \quad 3(x+3) - (3x-4) = 13.$$

而 $x^2 + \bar{4} = (x + \bar{3})(x + \bar{10})$, 由练习 2.4.26, $(x + \bar{3}, x^2 + \bar{4}) = (x + \bar{3})$, 进而

$$S/(3+2i) \simeq \mathbb{F}_{13}[x]/(x+\bar{3}, x^2+\bar{4}) \simeq \mathbb{F}_{13}[x]/(x+\bar{3}) \simeq \mathbb{F}_{13}.$$

故 $S/(3+2i)$ 为域, 其阶为 13.

(7) 有环同构

$$\begin{aligned} S/2S &\simeq (\mathbb{Z}[x]/(x^2+4))/\bar{2}(\mathbb{Z}[x]/(x^2+4)) \simeq \mathbb{Z}[x]/(2, x^2+4) \simeq \mathbb{Z}[x]/(2, x^2) \\ &\simeq \mathbb{F}_2[x]/(x^2) \xrightarrow[y=x+\bar{1}]{} \mathbb{F}_2[y]/(y^2+\bar{1}). \end{aligned}$$

由此可知 $\text{char}(S/2S) = 2 \neq 4$, 故 $S/2S \not\simeq \mathbb{Z}_4$.

(8) 假设 S 是 UFD, 由命题 2.5.16, S 是整闭环. 注意到 $\text{Frac}(S) = \mathbb{Q}(i)$, $i \in \mathbb{Q}(i)$ 是首一整系数方程 $x^2 + 1 = 0$ 的解, 由整闭性, $i \in S$, 矛盾. 故 S 不是 UFD. \square

2. 考虑商域 $K = \mathbb{F}_2[y]/(y^3 + y + \bar{1})$, 记 $u = \bar{y}$, 则 K 中元素均形如 $a + bu + cu^2$, 其中 $a, b, c \in \mathbb{F}_2$. 自然视 \mathbb{F}_2 为 K 的子域.

(1) 将多项式 $x^3 + x^2 + \bar{1}$ 在 $K[x]$ 中进行不可约分解.

(2) 在 K 中, 计算 $(u^4 + \bar{1})^{-1}$.

(3) 分类 K 的所有子环.

(4) 判断 $K[x]/(x^2 + (u + \bar{1})x + u^2)$ 是否为域.

(5) 考虑域 $E = \mathbb{F}_2[z]/(z^3 + z^2 + \bar{1})$. 试具体建立从 E 到 K 的环同构.

(6) 分别求从 \mathbb{Z}_8 到 K , 以及从 K 到 \mathbb{Z}_8 的 (保单位的) 环同态的个数.

解答 (1) $x^3 + x^2 + \bar{1} = (x + u^2 + \bar{1})(x + u + \bar{1})(x + u^2 + u + \bar{1})$.

(2) 待定系数得 $u^2(u^4 + \bar{1}) = (u^3)^2 + u^2 = (u + \bar{1})^2 + u^2 = \bar{1} \implies (u^4 + \bar{1})^{-1} = u^2$.

(3) 由于 K 的子环必包含 \mathbb{F}_2 , 而域上的有限维整环是域, K 的子环即 K 的子域. 由命题 3.4.10, K 的子域即 \mathbb{F}_2 与 K .

(4) 是. 只需证 $x^2 + (u + \bar{1})x + u^2 \in K[x]$ 不可约, 这由 Vieta 定理及表 6.1 易得.

(5) 由 (1) 知 $z^3 + z^2 + \bar{1} \in \mathbb{F}_2[z]$ 不可约, 因此 E 是八元域. 记 $v = \bar{z}$, 则 $E = \mathbb{F}_2(v)$. 设 $\theta: E \rightarrow K$ 为环同态, 则 θ 由 $\theta(v)$ 唯一决定. 由于 $v \in E$ 是 $x^3 + x^2 + \bar{1} \in E[x]$ 的根, 因此 $\theta(v) \in K$ 是 $x^3 + x^2 + \bar{1}$ 的根, 由 (1), $\theta(v) = u + \bar{1}$ 或 $u^2 + \bar{1}$ 或 $u^2 + u + \bar{1}$. 考虑赋值同态

$$\text{ev}_{u+\bar{1}}: \mathbb{F}_2[z] \rightarrow K, \quad f(z) \mapsto f(u + \bar{1}).$$

由 (1) 知 $(z^3 + z^2 + \bar{1}) \subset \text{Ker}(\text{ev}_{u+\bar{1}})$. 因此 $\text{ev}_{u+\bar{1}}$ 诱导环嵌入 $\theta: E \hookrightarrow K$ 使得 $v \mapsto u + \bar{1}$. 又因为 $|E| = |K|$, θ 为环同构.

(6) ① 从 \mathbb{Z}_8 到 K 的环同态 (若存在), 只能为

$$\mathbb{Z}_8 \rightarrow K, \quad \bar{0}, \bar{2}, \bar{4}, \bar{6} \mapsto \bar{0}, \quad \bar{1}, \bar{3}, \bar{5}, \bar{7} \mapsto \bar{1}.$$

可验证这的确是环同态. ② 为求从 K 到 \mathbb{Z}_8 的环同态 ϕ , 只需确定 $u \in K$ 的像. 由于 $\phi(u)$ 是方程 $x^3 + x + \bar{1}$ 的解, 但计算可知此方程在 \mathbb{Z}_8 中无解, 故不存在从 K 到 \mathbb{Z}_8 的环同态. \square

表 6.1: $\mathbb{F}_8 = \mathbb{F}_2[y]/(y^3 + y + \bar{1})$ 的乘法表

\times	$\bar{0}$	$\bar{1}$	u	$u + \bar{1}$	u^2	$u^2 + \bar{1}$	$u^2 + u$	$u^2 + u + \bar{1}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$
$\bar{1}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	u	$u + \bar{1}$	u^2	$u^2 + \bar{1}$	$u^2 + u$	$u^2 + u + \bar{1}$
u	$\bar{0}$	u	u^2	$u^2 + u$	$u + \bar{1}$	$\bar{1}$	$u^2 + u + \bar{1}$	$u^2 + \bar{1}$
$u + \bar{1}$	$\bar{0}$	$u + \bar{1}$	$u^2 + u$	$u^2 + \bar{1}$	$u^2 + u + \bar{1}$	u^2	$\bar{1}$	u
u^2	$\bar{0}$	u^2	$u + \bar{1}$	$u^2 + u + \bar{1}$	$u^2 + u$	u	$u^2 + \bar{1}$	$\bar{1}$
$u^2 + \bar{1}$	$\bar{0}$	$u^2 + \bar{1}$	$\bar{1}$	u^2	u	$u^2 + u + \bar{1}$	$u + \bar{1}$	$u^2 + u$
$u^2 + u$	$\bar{0}$	$u^2 + u$	$u^2 + u + \bar{1}$	$\bar{1}$	$u^2 + \bar{1}$	$u + \bar{1}$	u	u^2
$u^2 + u + \bar{1}$	$\bar{0}$	$u^2 + u + \bar{1}$	$u^2 + \bar{1}$	u	$\bar{1}$	$u^2 + u$	u^2	$u + \bar{1}$

3. 考虑商域 $F = \mathbb{Q}[y]/(y^3 + y + 1)$, 记 $u = \bar{y}$. 自然视 \mathbb{Q} 为 F 的子域.

- (1) 将 $x^3 + x + 1$ 在 $F[x]$ 上进行不可约分解.
- (2) 计算 $\text{Aut}(F)$ 的阶.
- (3) 将 $x^3 + x^2 + 1$ 在 $F[x]$ 上进行不可约分解.
- (4) 设 R 为 F 的子环, 且 $\mathbb{Q} \subset R$. 证明: $R = \mathbb{Q}$ 或 $R = F$.
- (5) 是否存在正整数 n , 使得 $u^n = 1_F$?
- (6) 考虑 $E = F[x]/(x^2 + 5)$. 判断 E 是否为域. 求 $\text{Aut}(E)$ 的阶.

解答 (1) $x^3 + x + 1 = (x - u)(x^2 + ux + u^2 + 1)$. 下证 $x^2 + ux + u^2 + 1 \in F[x]$ 不可约.

- ◇ 由于 $(y^3 + y + 1)' = 3y^2 + 1 > 0, \forall y \in \mathbb{R}, y^3 + y + 1$ 在 \mathbb{R} 上有且仅有一个根 y_0 . 由命题 2.4.13, 存在环同态 $\theta: \mathbb{Q}[y] \rightarrow \mathbb{Q}[y_0]$ 使 $\theta(y) = y_0$ 而 $\theta|_{\mathbb{Q}} = \text{Id}_{\mathbb{Q}}$. 由于 y_0 在 \mathbb{Q} 上代数, $\mathbb{Q}[y_0] = \mathbb{Q}(y_0)$. 又 $y^3 + y + 1$ 在 \mathbb{Z} 上无根, 即在 \mathbb{Q} 上不可约, $(y^3 + y + 1) \subset \text{Ker } \theta$, 而由命题 2.4.23, $\mathbb{Q}[y]$ 是 PID, 因此 $\text{Ker } \theta = (y^3 + y + 1)$. 由定理 2.2.20, $F = \mathbb{Q}[y]/(y^3 + y + 1) \simeq \mathbb{Q}(y_0)$.
- ◇ 假设 $x^2 + ux + u^2 + 1 \in F[x]$ 可约, 则其根可表为 u 的多项式, 即存在 $P, Q \in \mathbb{Q}[x]$, 使得 $x^2 + ux + u^2 + 1 = [x - P(u)][x - Q(u)]$. 在上述环同构下, 此等式化为

$$x^2 + y_0 x + y_0^2 + 1 = [x - P(y_0)][x - Q(y_0)],$$

从而在 $\mathbb{R}[x]$ 中成立等式

$$x^3 + x + 1 = (x - y_0)[x - P(y_0)][x - Q(y_0)],$$

但这与 $x^3 + x + 1$ 在 \mathbb{R} 上有且仅有一个根矛盾. 故 $x^2 + ux + u^2 + 1 \in F[x]$ 不可约.

(2) 由注记 2.2.10 (3), $\text{Aut}(F) \simeq \text{Aut}(\mathbb{Q}(y_0))$. 由引理 3.3.1, $|\text{Aut}(F)| = |\text{Root}_F(y^3 + y + 1)| \stackrel{(1)}{=} 1$.

(3) 作替换 $t = \frac{1}{x}$, 则 $t^3(x^3 + x^2 + 1) = t^3 + t + 1 \stackrel{(1)}{=} (t - u)(t^2 + ut + u^2 + 1)$, 因此

$$\begin{aligned} x^3 + x^2 + 1 &= x^3(t - u)(t^2 + ut + u^2 + 1) = (1 - ux)[1 + ux + (u^2 + 1)x^2] \\ &= (u^{-1} - x)[u + u^2x + (u^3 + u)x^2] = (x + u^2 + 1)(x^2 - u^2x - u). \end{aligned}$$

(4) 由 $R \subset F$ 知 R 为整环, 而域上的有限维整环是域, 即 R 为域. 由定理 3.2.4,

$$[F : R][R : \mathbb{Q}] = [F : \mathbb{Q}] = 3.$$

因此 $[F : R] = 3, [R : \mathbb{Q}] = 1$ 或 $[F : R] = 1, [R : \mathbb{Q}] = 3$, 即 $R = \mathbb{Q}$ 或 $R = F$.

(5) 不存在. 用反证法, 假设存在正整数 n 使得 $u^n = 1_F$, 由引理 3.5.14, $x^n - 1 = \prod_{d|n} \Phi_d(x)$, 因此存在

$d | n$, 使得 $\Phi_d(u) = 0$. 由于 $\Phi_d(x) \in \mathbb{Q}[x]$ 首一不可约, $y^3 + y + 1 \in \mathbb{Q}[x]$ 亦首一不可约且零化 u , 因此 $\Phi_d(x) = x^3 + x + 1$. 但 $\phi(d) = \begin{cases} 1, & d = 2, \\ \text{偶数}, & d \geq 3, \end{cases}$ 因此 $\deg(\Phi_d(x)) \neq 3$, 矛盾.

(6) ① 为证 E 为域, 只需证 $x^2 + 5 \in F[x]$ 不可约. 用反证法, 假设 $x^2 + 5 \in F[x]$ 可约, 则有域扩张塔

$$\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}[x]/(x^2 + 5) \subset F,$$

由定理 3.2.4, $3 = [F : \mathbb{Q}] = [F : \mathbb{Q}[x]/(x^2 + 5)][\mathbb{Q}[x]/(x^2 + 5) : \mathbb{Q}] = 2$, 矛盾. ② 先证明对任意 $\sigma \in \text{Aut}(E)$, 均有 $\sigma|_F = \text{Id}_F$. 由于 σ_F 被 $\sigma(u)$ 唯一确定, 只需证 $\sigma(u) = u$, 进而只需证 $y^3 + y + 1$ 在 E 上仅有 u 一个根. 假设 $y^3 + y + 1$ 在 E 上的根多于 1 个, 则它在 E 上恰有 3 个根, 设为 α, β, γ . 由于

$$\Delta^2 = (\alpha - \beta)^2(\beta - \gamma)^2(\gamma - \alpha)^2 = -4 \cdot 1^3 - 27 \cdot 1^2 = -31,$$

必有 $\sqrt{-31} \in E$, 进而有域扩张塔

$$\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(\sqrt{-5}, \sqrt{-31}) \subset E.$$

由定理 3.2.4, $[E : \mathbb{Q}] = [E : \mathbb{Q}(\sqrt{-5}, \sqrt{-31})][\mathbb{Q}(\sqrt{-5}, \sqrt{-31}) : \mathbb{Q}]$. 但 $[E : \mathbb{Q}] = 2 \cdot 3 = 6$, $[\mathbb{Q}(\sqrt{-5}, \sqrt{-31}) : \mathbb{Q}] = 4, 4 \nmid 6$, 矛盾. 故 $\sigma|_F = \text{Id}_F$ 得证, 从而

$$|\text{Aut}(E)| = |\text{Aut}(E/F)| = |\text{Root}_E(x^2 + 5)| = 2. \quad \square$$

6.4 2024 春期中考试

1. 考虑 \mathbb{C} 的子域 $E = \mathbb{Q}(i, \xi)$, 其中 $i = \sqrt{-1}$ 且 $\xi = e^{\frac{2\pi i}{5}}$. 回顾 $\cos \frac{2\pi}{5} = \frac{\sqrt{5}-1}{4}$.

(1) 证明 E/\mathbb{Q} 是多项式 $x^9 - x^5 - x^4 + 1 \in \mathbb{Q}[x]$ 的分裂域.

(2) 计算 ξ 在 $\mathbb{Q}(\sqrt{5})$ 上的最小多项式, 计算 ξ 在 $\mathbb{Q}(i)$ 上的最小多项式.

(3) 将多项式 $x^4 + 6x^2 + 5 \in \mathbb{Q}(\xi)[x]$ 分解成不可约多项式之积, 给出充分论证.

(4) 计算维数 $\dim_{\mathbb{Q}} E$, 计算维数 $\dim_{\mathbb{Q}}(E \cap \mathbb{R})$, 给出充分论证.

(5) 简要论证并具体构造 $\text{Aut}(E)$ 中的全部元素, 判断其是否为 Abel 群.

2. 考虑域 $K = \mathbb{F}_3[y]/(y^2 + 1)$. 记 $u = \bar{y}$. 于是, K 中元素均形如 $a + bu$, 其中 $a, b \in \mathbb{F}_3$. 自然视 \mathbb{F}_3 为 K 的子域. 同理, 考虑域 $L = \mathbb{F}_3[z]/(z^2 + z - 1)$, 记 $v = \bar{z}$. 请论证并给出全部的环同态 $K \rightarrow L$.

3. 考虑主理想整环 R 以及 (非零) 极大理想 \mathfrak{m} . 假设有环同构 $R/\mathfrak{m} \simeq \mathbb{F}_p$. 试计算商环 R/\mathfrak{m}^2 的阶数 (大小), 计算环自同构群 $\text{Aut}(R/\mathfrak{m}^2)$ 的阶数 (大小).

4. 考虑 Gauss 整数环 $R = \mathbb{Z}[i]$. 对于任何正素数 p , 我们定义 R 的子环 $S_p = \{m + (pn)i : m, n \in \mathbb{Z}\}$.

- (1) 在 R 中将 $17 - 7i$ 进行不可约分解.
- (2) 考虑商环 $\bar{R} = R/(17 - 7i)$. 计算该环的阶数, 计算环自同构群 $\text{Aut}(\bar{R})$ 的阶数, 充分论证.
- (3) 判断并论证: 商环 $S_5/(5)$ 和 $S_5/(5i)$ 是否同构? 对于不同的正素数 p, q , 环 S_p 与 S_q 是否同构?

第七章

期末考试题目

7.1 2020 春期末考试

- 考虑 S_4 中的共轭类 $C = \{(12)(34), (13)(24), (14)(23)\}$ 以及 S_4 在 C 上的共轭作用.
 - 计算 C 中三个元素的稳定化子及其交集.
 - 记 $\text{SHom}(S_4, S_3)$ 为所有 $S_4 \rightarrow S_3$ 的满同态, 计算 $\text{SHom}(S_4, S_3)$ 和 $\text{Hom}(S_4, S_3)$ 的阶数.
 - 是否存在单同态 $S_3 \hookrightarrow \text{SL}(2, \mathbb{C}), S_3 \hookrightarrow \text{GL}(2, \mathbb{C})$?
- 考虑 $R = \mathbb{Z}[i], K = \mathbb{Q}(i)$.
 - 计算 $\gcd(4 + 7i, 3 + 4i)$.
 - 把 $81 + 8i$ 分解成 R 中不可约元的乘积.
 - 求 $u^2 + v^2 = 585$ 的所有整数解.
 - 计算 $\text{Aut}(R/(13))$.
 - $x^5 - 5$ 和 $x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$ 是否为 K 中的不可约多项式?
 - 分类 R 的子环, 并指出哪些是 UFD.
 - 设 K' 是 $x^5 - 5$ 在 $\mathbb{Q}(i)$ 上的分裂域. 计算 $[K' : K]$, 并判断 $\text{Gal}(K'/K)$ 是否为 Abel 群.
- 设 $f(x) = x^4 + x + \bar{2} \in \mathbb{F}_3[x]$, 考虑 $\mathbb{F}_{81} = \mathbb{F}_3[x]/(f(x))$, 记 $u = x + (f(x))$.
 - 证明 $f(x)$ 在 \mathbb{F}_3 上不可约.
 - 在 \mathbb{F}_{81} 中分解 $f(x)$.
 - 求 \mathbb{F}_{81} 的九元子域.
 - 计算 $(u^2 + u + \bar{1})^{-1}$.
 - 求 $u^2 + u + \bar{1}$ 在 \mathbb{F}_3 上的最小多项式.
 - 计算 $u^2 + u + \bar{1}$ 在 \mathbb{F}_{81}^\times 中的阶数.

7.2 2021 春期末考试

1. 考虑 A_4 在 (123) 上的共轭作用, 记 C 为其轨道.

- (1) 求 (123) 的稳定化子及 $|C|$.
- (2) 求 C . 判断此作用在 C 上是否忠实.
- (3) 计算 $|\text{Hom}(A_4, S_3)|$.
- (4) 是否存在群的单同态 $A_4 \hookrightarrow \text{SL}(2, \mathbb{C}), A_4 \hookrightarrow \text{GL}(2, \mathbb{C})$?

2. 考虑 $E = \mathbb{Q}(\sqrt[4]{2}, i), K = E \cap \mathbb{R}$.

- (1) 判断 $x^4 - 2 \in \mathbb{Q}[x]$ 是否可约, $x^4 - 2 \in \mathbb{Q}(i)[x]$ 是否可约.
- (2) 计算 $[E : \mathbb{Q}]$ 和 $[E : K]$.
- (3) $\text{Gal}(E/\mathbb{Q})$ 在集合

$$\mathfrak{X} = \{a = \sqrt[4]{2}, b = i\sqrt[4]{2}, c = -\sqrt[4]{2}, d = -i\sqrt[4]{2}\}$$

上有一自然作用, 它诱导群同态 $\rho : \text{Gal}(E/\mathbb{Q}) \rightarrow S(\mathfrak{X})$, 求 $\text{Ker } \rho$ 与 $\text{Im } \rho$.

- (4) 求 $\text{Gal}(E/\mathbb{Q}(i))$ 和 $\text{Gal}(E/K)$ 在 ρ 下的像.

3. 考虑 $E = (\sqrt{2}, \sqrt{5})$, 求所有的 $u \in E$, 使得 $E = \mathbb{Q}(u)$. 提示 求 E 的线性基和所有域扩张的中间域.

4. 考虑 $A = \mathbb{Q}^\times \setminus \{1\}$ 和 A 上的双射 $\sigma(a) = \frac{1}{a}, \tau(a) = \frac{1}{1-a}$. 设 G 为由 σ 和 τ 生成的群, 乘法为映射的复合. 判断 G 是否为有限群. 若有限, 求 $|G|$.

7.3 2023 春期末考试

1. 考虑 $K = \mathbb{Q}(\sqrt[4]{3}, i)$ 以及 $E = K \cap \mathbb{R}$. 以下, 维数均指 \mathbb{Q} 上的维数.

- (1) 计算域 E 的维数与 $|\text{Aut}(E)|$.
- (2) 求 $\sqrt[4]{3} + i$ 在 \mathbb{Q} 上的最小多项式.
- (3) 考虑 $F = \mathbb{Q}(\sqrt{2}, i)$. 证明: $x^4 - 3 \in F[x]$ 不可约.
- (4) 考虑 $x^4 - 3$ 的根集 $\mathfrak{X} = \{a = \sqrt[4]{3}, b = \sqrt[4]{3}i, c = -\sqrt[4]{3}, d = -\sqrt[4]{3}i\}$ 以及群作用 $\text{Aut}(K) \curvearrowright K$ 诱导的群同态 $\rho : \text{Aut}(K) \rightarrow S(\mathfrak{X})$, 计算并描述 ρ 的像.
- (5) 分类 K 的全体维数为 4 的子域.

2. 考虑 n 元集合 $\{1, \dots, n\}$ 的对称群 S_n .

- (1) 证明: S_n 可由 (12) 和 $(12 \cdots n)$ 生成.
- (2) 对 $2, 3, 4$ 的任一排列 a, b, c , 定义 $H_{(a,b,c)} = ((12), (1abc)) \leq S_4$, 试分类所有的排列 a, b, c 使得 $H_{(a,b,c)} = S_4$.
- (3) 设 $H \leq S_5$ 满足 $(12) \in H$ 且 $5 \mid |H|$. 证明: $H = S_5$.
- (4) 考虑 $f(x) = x^5 - 4x + 2 \in \mathbb{Q}[x]$, 证明: $\text{Gal}_{\mathbb{Q}}(f) \simeq S_5$.

3. 将 \mathbb{Z}^3 中的元素写成行向量, 考虑由 $(4, -6, 0)$ 和 $(0, 6, -4)$ 生成的子群 H .

- (1) 在同构意义下, 计算商群 \mathbb{Z}^3/H 的扭子群.
- (2) 证明: 不存在群同态 $f : \mathbb{Z}^3 \rightarrow \mathbb{Z}$ 使得 $\text{Ker } f = H$.

7.4 2024 春期末考试

- 考虑 $E = \mathbb{Q}(\sqrt[4]{18}, i)$, 以及 $K = E \cap \mathbb{Q}(\sqrt{3} + \sqrt{2})$. 以下, 维数均指 \mathbb{Q} 上维数.
 - 计算域 E 的维数, 给出充分论证.
 - 判断并论证: 多项式 $x^4 - 18 \in \mathbb{Q}(i)[x]$ 是否可约?
 - 计算域 K 的维数, 给出充分论证.
 - 考虑 $x^4 - 18$ 的根集 $\mathcal{X} = \{a = \sqrt[4]{18}, b = \sqrt[4]{18}i, c = -\sqrt[4]{18}, d = -\sqrt[4]{18}i\}$, 以及群作用 $\text{Aut}(E) \curvearrowright \mathcal{X}$ 诱导的群同态 $\rho: \text{Aut}(E) \rightarrow S(\mathcal{X})$. 试给出 ρ 像中的全部元素.
 - 试分类 E 的全部子域, 给出充分论证.
- 考虑一元有理函数域 $E = \mathbb{C}(x)$. 对于任意正整数 n , 考虑其子域 $L_n = \mathbb{C}(x^n + x^{-n})$.
 - 计算域扩张 E/L_n 的维数, 给出充分论证.
 - 判断并论证: 断言 “ $L_n \subset L_m$ 当且仅当 $m|n$ ”, 是否成立?
 - 试给出域扩张 E/L_4 的所有中间域, 给出充分论证.
- 设 G 为有限群, $H \leq G$ 为真子群. 试证明: $G \neq \bigcup_{g \in G} gHg^{-1}$. 试问: 该结论对于无限群 G 是否也成立?
- 设 A 为有限生成 Abel 群, 秩为 2. 设有群的满同态 $\theta: A \rightarrow \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}$. 证明: $\text{Ker } \theta$ 恰等于 A 的扭 (torsion) 子群.