

课程名称：代数学

第二次作业



中南大學

姓名： 樊昊

学号： 242131001

数学与统计学院

环论

题目 8 . 证明 $\mathbb{Z}[x]$ 的任一主理想非极大。

引理 1. *If $f(x)$ is irreducible in $\mathbb{Z}[x]$, then only the following two possibilities exist:*

1. $f(x)$ is a prime in \mathbb{Z} ;
2. $f(x)$ is irreducible in $\mathbb{Q}[x]$.

Proof. In the case $\deg f(x) = 0$: it turns out that it is a prime. In the case $\deg f(x) \geq 1$, we have $f(x) = cf_0(x)$, for a primitive polynomial $f_0(x)$ and $c \in \mathbb{Z}$. We assume $c \in \{\pm 1\}$ by irreducibility. For a primitive polynomial, it is irreducible in $\mathbb{Z}[x]$ if and only if it is irreducible in $\mathbb{Q}[x]$. \square

解答.¹ 我们假设 $\mathbb{Z}[x]$ 中的主理想 $\langle f(x) \rangle$ 是极大的, 则这是极大主理想, 即 $f(x)$ 是不可约元. 而不可约元只有两种: $f(x) = p \in \mathbb{Z}$ 是素数; $f(x)$ 是 $\mathbb{Q}[x]$ 中不可约多项式. 当 $f(x) = p$ 是素数, 有 $\mathbb{Z}[x]/\langle p \rangle = \mathbb{F}_p[x]$ 是整环不是域, 所以主理想非极大. 当 $f(x)$ 是 $\mathbb{Q}[x]$ 中不可约多项式, 有 $\langle f(x) \rangle \subseteq \langle f(x), p \rangle \subsetneq \mathbb{Z}[x]$ 其中 p 是素数; 所以主理想非极大. \blacksquare

更多习题

题目 13 . Show that the ideal $(3, x^3 - x^2 + 2x - 1)$ in $\mathbb{Z}[x]$ is not principal.

解答.² This ideal is maximal:

$$\mathbb{Z}[x]/(3, x^3 - x^2 + 2x - 1) \cong (\mathbb{F}_3[x])/(x^3 - x^2 + 2x - 1),$$

since $x^3 - x^2 + 2x - 1$ has no roots in \mathbb{F}_3 ; it is irreducible. From 题目 1, we know it is not principal. \blacksquare

模论

第五章

题目 4 . 设 \mathbb{Q} 为有理数域, M 和 M' 是两个左 \mathbb{Q} 模. 证明: 若 $\eta: M \rightarrow M'$ 是一个加法群同构, 则 η 也是一个 \mathbb{Q} 模同构. (* 如果用实数域 \mathbb{R} 替代 \mathbb{Q} , 问这个命题是否成立?)

解答.³ 对 $x, y \in M, p_1/q_1, p_2/q_2 \in \mathbb{Q}$ 有 $x/q_1, y/q_2 \in M$ 且

$$\eta(rx + sy) = \eta\left(\sum_{i=1}^{p_1} \frac{x}{q_1} + \sum_{j=1}^{p_2} \frac{y}{q_2}\right) = \sum_{i=1}^{p_1} \eta\left(\frac{x}{q_1}\right) + \sum_{j=1}^{p_2} \eta\left(\frac{y}{q_2}\right);$$

另一方面,

$$\eta(x) = \eta\left(\sum_{i=1}^{q_1} \frac{x}{q_1}\right) = \sum_{i=1}^{q_1} \eta\left(\frac{x}{q_1}\right) = q\eta\left(\frac{x}{q_1}\right) \implies \eta\left(\frac{x}{q_1}\right) = \frac{1}{q_1}\eta\left(\frac{x}{q_1}\right),$$

综上所述,

$$\eta(rx + sy) = \frac{p_1}{q_1}\eta(x) + \frac{p_2}{q_2}\eta(y).$$

此时, η 成 \mathbb{Q} 模同构.

对 \mathbb{R} 模, 命题不成立: 视 \mathbb{R} 为 \mathbb{Q} 模, 依 Zorn 引理可取一组基 $\{e_i\}_{i \in I}$. 定义 $\eta: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $\sum_{\text{有限}} r_i e_i \mapsto \sum_{\text{有限}} r_i \lambda_i e_i$. 则 η 的矩阵形式为对角矩阵 $\text{diag}(\lambda_i)_i$; 命这个对角矩阵可逆且 λ_i 不全相同, 则 η 是加法群同构, 但不是 \mathbb{R} 模同构. ■

题目 19. 将 $\mathbb{Z}/(n)$ 看作 \mathbb{Z} 模, 问下列模是否可写成两个非零子模的直和:

(i) $\mathbb{Z}/(p^e)$, p 为素数, $e \geq 1$;

(ii) $\mathbb{Z}/(n)$, $n = p_1^{e_1} \cdots p_r^{e_r}$, p_1, \dots, p_r 为不同的素数, $e_i \geq 1, i = 1, \dots, r$.

解答.⁴ 作为 \mathbb{Z} 模的直和分解, 即分解为 Abel 群的直和.

若有分解, 分析子群的阶数, 可知分解必然形如

$$\mathbb{Z}/(p^e) = \mathbb{Z}/(p^r) \oplus \mathbb{Z}/(p^s),$$

其中 $r + s = e$. 此时, 左边有 p^e 阶元, 而右边元素阶数最大为 $\max\{p^r, p^s\}$; 应当相等, 故 $r = e$ 或者 $s = e$, 于是 $\mathbb{Z}/(p^e)$ 的分解一定是平凡的.

根据中国剩余定理, 有分解

$$\mathbb{Z}/(n) = \mathbb{Z}/(p_1^{e_1}) \oplus \mathbb{Z}/(p_2^{e_2} \cdots p_r^{e_r}),$$

这里两个子模均非零. ■

题目 20. 证明: \mathbb{Q} 作为 \mathbb{Z} 模, 它的任一有限生成的子模是循环模. 由此证明, \mathbb{Q} 不是一个自由 \mathbb{Z} 模.

解答.⁵ 设 $M = \langle p_1/q_1, \dots, p_n/q_n \rangle \subseteq \mathbb{Q}$ 是有限生成子模, 其中 p_i, q_i 互素. 令 $q := \text{lcm}(q_1, \dots, q_n)$, 则

$$M = \left\langle \frac{p_1 r_1}{q}, \dots, \frac{p_n r_n}{q} \right\rangle, \quad r_i := \frac{q}{q_i}.$$

可见 $M = \left\langle \frac{\gcd(p_1 r_1, \dots, p_n r_n)}{q} \right\rangle$, 是循环模.

假设 \mathbb{Q} 是自由 \mathbb{Z} 模, 而前述性质表明, 它没有秩 > 1 的有限生成子模, 故只能是秩为 1 的自由模, 这不可能: 若是秩为 1 的自由 \mathbb{Z} 模, 则正的部分应有最小元. ■

第六章

补充

题目 3 . 设 R 是交换环, I 为 R 的理想. M 是有限生成的 R 模, $\varphi \in \text{End}_R(M)$.

(1) 如果 $M \subseteq IM$, 证明: 存在 $f(x) = x^n + a_1x^{n-1} + \cdots + a_n$ ($a_1, \dots, a_n \in I$), 使得

$$f(\varphi) = (\varphi^n + \varphi^{n-1}a_1 + \cdots + \text{id} \cdot a_n) = 0 \in \text{End}_R(M)$$

(2) Nakayama 引理 (重要): R 的所有极大理想的交称为 R 的 Jacobson 根, 记为 $J(R)$. 如果 $MJ(R) = M$, 证明 $M = (0)$.

尝试. ...

我们证明 $\text{id}|_M^M = 0$, 从而 $M = (0)$; 简记 $\text{id} = \text{id}|_M^M$. 由 (1), 有 $f(x) = x^n + a_1x^{n-1} + \cdots + a_n$, ($a_i \in I$) 使得

$$f(\text{id}) = \left(1 + \sum_{i=1}^n a_i\right) \text{id} = 0.$$

记 $a = \sum_{i=1}^n a_i \in I$, 下证明 $1 + a$ 是 R 中可逆元: 如果不然, 则主理想 $\langle 1 + a \rangle$ 是非平凡的, 于是有某极大理想 $I_0 \supseteq \langle 1 + a \rangle$, 但是 $a \in J(R) \implies a \in I_0$, 所以 $1 = (1 + a) - a \in I_0$, 矛盾: 极大理想不是平凡理想, 不应该有 1. 综上所述, $1 + a$ 是可逆的, 故 $\text{id} = 0$.

题目 6 . 设 $\varphi: M \rightarrow M$ 是 R 的模同态, 且 $\varphi\varphi = \varphi$. 证明:

$$M = \ker \varphi \oplus \text{im } \varphi.$$

解答.⁷ 对 $x \in M$,

$$x = \underbrace{x - \varphi x}_{\in \ker \varphi} + \underbrace{\varphi x}_{\in \text{im } \varphi}.$$

另一方面, $x \in \ker \varphi \cap \text{im } \varphi \implies x = 0$; 因为 $x = \varphi y \implies 0 = \varphi x = \varphi y \implies 0 = x$. 综上所述, 分解 $M = \ker \varphi + \text{im } \varphi$ 是直和分解, 即 $M = \ker \varphi \oplus \text{im } \varphi$. ■

题目 10 . Determine $\text{End}(\mathbb{Q}, +, 0)$.

解答.⁸ It is isomorphic to the ring \mathbb{Q} :

$$\text{End}(\mathbb{Q}, +, 0) \rightarrow \mathbb{Q}, f \mapsto f(1). \quad (1)$$

It suffices to show the morphism is injective. Suppose $f(1) = g(1)$, then $\forall m \in \mathbb{Z}, \forall n \geq 1$,

$$\begin{aligned} f(1) &= n \cdot f\left(\frac{1}{n}\right) = n \cdot g\left(\frac{1}{n}\right) = g(1); \\ f\left(\frac{m}{n}\right) &= mf\left(\frac{1}{n}\right) = mg\left(\frac{1}{n}\right) = g\left(\frac{m}{n}\right). \end{aligned}$$

Thus $f = g$, (1) is injective. It keeps addition, and also multiplication:

$$f\left(\frac{m}{n}\right) = \frac{m}{n}f(1) \implies (f \circ g)(1) = f(g(1)) = f(1)g(1).$$

■

域论

第七章

题目 2 . 设 K/F 为一有限扩张, $\alpha \in K$ 是 F 上一个 n 次元素, 证明 $n \mid [K : F]$.

解答.⁹ 有中间域 $F(\alpha)$, 于是

$$[K : F] = [K : F(\alpha)][F(\alpha) : F] = [K : F(\alpha)] \times n$$

因为 $[F(\alpha) : F] = \deg \alpha = n$.

■

题目 4 . 设 K 为 F 上域扩张. 证明: 如果 $u \in K$ 是 F 上代数元且次数为奇数, 则 u^2 也是 F 上奇次数代数元且 $F(u) = F(u^2)$.

解答.¹⁰ 设 u 在 F 上的极小多项式为 $p_u(x) = x^{2n+1} + \sum_{j=0}^{2n} \lambda_j x^j$. 则

$$p(u) = 0, \quad p(x) := \left((u^2)^n + \sum_{j=1}^n \lambda_{2j-1} u^{2j-2} \right) x + \sum_{j=0}^n \lambda_{2j} (u^2)^j \in F(u^2)[x].$$

所以, u 在 $F(u^2)$ 上的极小多项式的次数不超过 1 (也就只能是 1), 故 $[F(u) : F(u^2)] = 1$, 这就是 $F(u) = F(u^2)$. 由

$$[F(u) : F] = [F(u) : F(u^2)][F(u^2) : F]$$

可知 u^2 在 F 上次数也是奇数次.

■

题目 6 . 求下列扩域的一基:

(i) $K = \mathbf{Q}(\sqrt{2}, \sqrt{3})$;

(ii) $K = \mathbf{Q}(\sqrt{3}, \sqrt{-1}, \omega)$, 其中 $\omega = \frac{1}{2}(-1 + \sqrt{-3})$.

解答.¹¹ 有 $K = \text{span}_{\mathbf{Q}}(1, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \sqrt{6})$, 一组基是 $\{1, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \sqrt{6}\}$.

有 $K = \text{span}_{\mathbf{Q}}(1, \sqrt{3}, \sqrt{-1}, \sqrt{-3})$, 一组基是 $\{1, \sqrt{3}, \sqrt{-1}, \sqrt{-3}\}$.

■

题目 10 . 确定下列多项式在有理数域上的分裂域:

(i) $f(x) = x^4 - 2$;

(ii) $f(x) = x^3 - 2x - 2$.

解答.¹²

(i) 即 $\mathbb{Q}(\sqrt[4]{2}, i)$.

(ii) 有理根只可能是 $\pm 1, \pm 2$, 计算可见没有有理根, 从而他是不可约多项式. 判别式 $\Delta = -4(-2)^3 - 27(-2)^2 = -66$ 不是 \mathbb{Q} 中平方元. 所以分裂域是 $\mathbb{Q}(\alpha, \sqrt{\Delta})$, 其中 α 是 $f(x)$ 的实数根. ■

第八章

题目 2 . 证明域 F 的每个非零自同态都保持 F 内素域的元素不动. 设 P 为含于 F 内的素域, 于是 $\text{Aut } F = \text{Gal}(F/P)$.

解答.¹³ 设 $\sigma: F \rightarrow F$ 是非零的自同态, 则 σ 是 F 的自同构, 所以 $\sigma(1)$ 是单位元即 $\sigma(1) = 1$. 于是, σ 保持素域内的元素不动, 因为素域由 1 生成. 现在 $\text{Aut } F = \text{Gal}(F/P)$ 按照定义直接成立. ■

题目 4 . 确定 $\text{Gal}(K/\mathbb{Q})$, 其中 $K = \mathbb{Q}(\sqrt{2}, \sqrt{3})$.

解答.¹⁴ 记所求为 G . 域自同构保持多项式的根集, 所以 $\sqrt{2} \mapsto \sqrt{2}$ 或者 $\sqrt{2} \mapsto -\sqrt{2}$, 且这两种必有一种成立, 同理于 $\sqrt{3}$. 令 $\sigma(\sqrt{2}) = -\sqrt{2}, \sigma(\sqrt{3}) = \sqrt{3}; \tau(\sqrt{2}) = \sqrt{2}, \tau(\sqrt{3}) = -\sqrt{3}$. 可知 $G = \langle \sigma, \tau \rangle \cong (\mathbb{Z}/\langle 2 \rangle)^2$. ■

题目 6 . 设 F 为多项式环 $\mathbb{F}_p[t]$ 的商域, 即 $F = \mathbb{F}_p(t)$. 令 K 为多项式 $f(x) = x^p - t$ 在 F 上的分裂域. 证明 $\text{Gal}(K/F) = \{1\}$.

题目 7 . 设 $F = \mathbb{F}_p(t)$ 如习题 6. 令 K 为 $f(x) = x^{2p} + tx^p + t$ 在 F 上的分裂域. 试决定 $\text{Gal}(K/F)$, 并定出 $\text{Gal}(K/F)$ 的不动域和 F 在 K 内的可分闭包.

题目 14 . 设 $K = \mathbb{Q}(\sqrt{2}, \sqrt{3}), \theta = (2 - \sqrt{2})(3 + \sqrt{3}), E = K(\sqrt{\theta})$. 证明 E/\mathbb{Q} 正规, 并决定 $\text{Gal}(E/\mathbb{Q})$.

补充

题目 1 . 令 K 是有理数 \mathbb{Q} 上全体代数数做成的数域, 证明: K 是 \mathbb{Q} 的代数扩张, 但不是有限扩张。

解答.¹⁸ 任取 $x \in K$, 由定义, 存在 $f(X) \in \mathbb{Q}[X]$ 使得 $f(x) = 0$. 于是是代数扩张. 考虑子扩张 $\mathbb{Q}(\{\sqrt[n]{2} \mid n \geq 1\})/\mathbb{Q}$. 这不是有限扩张: 注意 $\mathbb{Q}(\{\sqrt[n]{2} \mid n \geq 1\}) = \bigcup_{n \geq 1} \mathbb{Q}(\sqrt[n]{2})$, 如果这是有限扩张, 则一定有

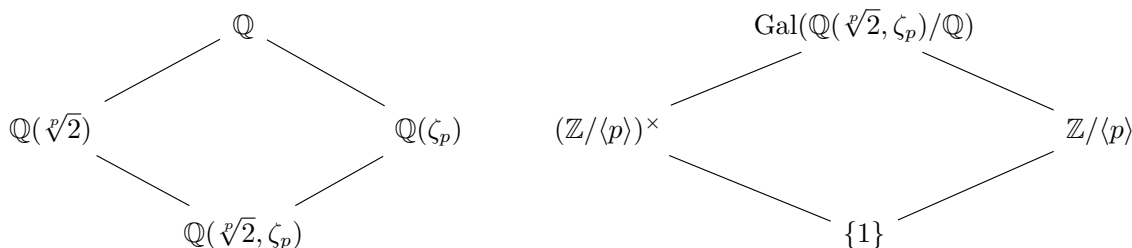
$$\mathbb{Q}(\{\sqrt[n]{2} \mid n \geq 1\}) = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \mathbb{Q}(\sqrt[n]{2}) = \mathbb{Q}(\sqrt[N]{2}),$$

对某个 N 成立. 这不可能, $\sqrt[N+1]{2}$ 不在里面. 综上所述, 这个子扩张无限, 所以问题中的扩张无限. ■

更多习题

题目 26 . Determine the Galois group $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\sqrt[p]{2}, \zeta_p)/\mathbb{Q})$.

解答.¹⁹ Let G denote the Galois group. By the Galois main theorem, we have diagrams:



Let $\mathbb{Z}/\langle p \rangle = \langle \tau \rangle$ and $(\mathbb{Z}/\langle p \rangle)^* = \langle \sigma \rangle$, where

$$\tau: \begin{cases} \zeta_p \mapsto \zeta_p \\ \sqrt[p]{2}\zeta_p^i \mapsto \sqrt[p]{2}\zeta_p^{i+1} \end{cases} \quad i \in [p], \quad \sigma: \begin{cases} \zeta_p \mapsto \zeta_p^a \\ \sqrt[p]{2} \mapsto \sqrt[p]{2} \end{cases},$$

where $a \in (\mathbb{Z}/\langle p \rangle)^*$. Thus we find two subgroups $\mathbb{Z}/\langle p \rangle, (\mathbb{Z}/\langle p \rangle)^*$ of G , where $(\mathbb{Z}/\langle p \rangle)^*$ is normal (because it is the Galois group of a Galois extension). For the structure of the group:

- They have trivial intersection: because $\mathbb{Q}(\sqrt[p]{2}) \cap \mathbb{Q}(\zeta_p) = \mathbb{Q}$;
- They generate the group G because $\text{Inv}\langle \tau, \sigma \rangle = \mathbb{Q}$.
- They satisfy: $\sigma\tau\sigma^{-1} = \tau^a$.

Above all, we have $G \cong \mathbb{Z}/\langle p \rangle \rtimes (\mathbb{Z}/\langle p \rangle)^*$, which is isomorphic to the matrix group:

$$\left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \mid a \in (\mathbb{Z}/\langle p \rangle)^*, b \in \mathbb{Z}/\langle p \rangle \right\} \subseteq \text{GL}(2, \mathbb{Z}/\langle p \rangle)$$

■

题目 27 . Please state the Galois main theorem clearly.