

0.1 域上一元多项式

定义 0.1

设 $R[x]$ 是交换整环 R 上的一元多项式环, 若 $f(x) \in R[x]$ 且 $f(x) \neq 0$, 有

$$f(x) = a_0 + a_1x + \cdots + a_nx^n, \quad a_n \neq 0.$$

则 $a_i x^i$ 称为 $f(x)$ 的 i 次项, a_i 称为 i 次项的系数, a_0 称为常数项, $a_n x^n$ 称为首项, n 称为 $f(x)$ 的次数, 记为 $\deg f(x) = n$. 如果 $f(x) \neq 0$ 且 $f(x)$ 的首项系数为 1, 则称 $f(x)$ 为首要多项式. 今后以 $(f(x), g(x))$ 表示 $f(x), g(x)$ 的最大公因式中的首要多项式.

若 $f(x) = a_0 \neq 0$, 则记 $\deg f(x) = 0$, 一般对零元素 0 是不规定次数的, 但规定 0 的次数为 $-\infty$, 即 $\deg 0 = -\infty$ 且规定

$$-\infty + (-\infty) = -\infty, \quad -\infty + n = -\infty, \quad -\infty < n, \quad 2^{-\infty} = 0.$$



定理 0.1

设 $R[x]$ 是交换整环 R 上的一元多项式环, $R^* = R \setminus \{0\}$, $f(x), g(x) \in R[x]$, 则

- (1) $\deg f(x) = 0 \iff f(x) \in R^*$.
- (2) $\deg(f(x) + g(x)) \leq \max\{\deg f(x), \deg g(x)\}$.
- (3) $\deg(f(x)g(x)) = \deg f(x) + \deg g(x)$.
- (4) 令 $\delta(f(x)) = 2^{\deg f(x)}$, 则有

$$\deg f(x) < \deg g(x) \iff \delta(f(x)) < \delta(g(x)),$$

$$\delta(f(x)g(x)) = \delta(f(x))\delta(g(x)).$$

- (5) 首要多项式的乘积仍为首要多项式.
- (6) $R[x]$ 也是交换整环且 $R[x]$ 的单位就是 R 的单位.
- (7) R 上 n 元多项式环 $R[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 也是交换整环且其单位就是 R 的单位.



证明

- (1)
- (2)
- (3)
- (4)
- (5)
- (6)
- (7)



定理 0.2

设 F 是一个域, $F[x]$ 为 F 上一元多项式环, 则

- (1) $\forall f(x), g(x) \in F[x], g(x) \neq 0$, 存在唯一的一对多项式 $q(x), r(x)$, 使得

$$f(x) = q(x)g(x) + r(x), \quad \deg r(x) < \deg g(x);$$

分别称 $q(x), r(x)$ 为 $f(x)$ 除以 $g(x)$ 的商、余式.

- (2) $F[x]$ 是 Euclid 环. 进而是主理想整环, 也是唯一析因环.



证明

- (1) 首先证明 $q(x), r(x)$ 的存在性. 对 $\deg f(x)$ 作归纳. 设 $\deg g(x) = m$. 由假设知 $m \geq 0$, 当 $\deg f(x) < m$ 时可取

$q(x) = 0$, 即 $r(x) = f(x)$. 现设 $\deg f(x) < n$ 时, $q(x)$ 与 $r(x)$ 已存在. 设 $\deg f(x) = n$. 不妨设 $n \geq m$. 又设

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_0,$$

$$g(x) = b_m x^m + b_{m-1} x^{m-1} + \cdots + b_0.$$

由 $b_m \neq 0$, 取 $q_0(x) = a_n b_m^{-1} x^{n-m}$. 令

$$f_1(x) = f(x) - q_0(x)g(x) = (a_{n-1} - a_n b_m^{-1} b_{m-1})x^{n-1} + \cdots,$$

故 $\deg f_1(x) \leq n-1 < n$. 由归纳假设有 $q_1(x), r_1(x)$, 使得

$$f_1(x) = q_1(x)g(x) + r_1(x), \quad \deg r_1(x) < \deg g(x),$$

因而有

$$f(x) = q_0(x)g(x) + q_1(x)g(x) + r_1(x) = (q_0(x) + q_1(x))g(x) + r_1(x).$$

取 $q(x) = q_0(x) + q_1(x), r(x) = r_1(x)$, 它们满足定理条件.

下面证明 $q(x)$ 与 $r(x)$ 的唯一性. 设有 $q_2(x), r_2(x)$ 也满足

$$f(x) = q_2(x)g(x) + r_2(x), \quad \deg r_2(x) < \deg g(x),$$

于是有 $(q(x) - q_2(x))g(x) = r_2(x) - r(x)$. 若 $q(x) - q_2(x) \neq 0$, 则

$$\deg(r_2(x) - r(x)) \geq \deg g(x) > \max\{\deg r_2(x), \deg r(x)\}.$$

另一方面有

$$\deg(r_2(x) - r(x)) \leq \max\{\deg r_2(x), \deg r(x)\},$$

这就导出矛盾. 故 $q(x) = q_2(x), r_2(x) = r(x)$. $q(x)$ 与 $r(x)$ 的唯一性得证.

(2) 令 $\delta(f(x)) = 2^{\deg f(x)}$, 注意到 $\deg r(x) < \deg g(x)$, 由定理 0.1(4) 得

$$\delta(r(x)) < \delta(g(x)),$$

故 $F[x]$ 为 Euclid 环. 再由定理 ?? 知 $F[x]$ 是主理想整环, 进而也是唯一析因环.

□

定义 0.2

设 F 是一个域, $F[x]$ 为 F 上一元多项式环, 若 $f_1(x)$ 与 $f_2(x)$ 除以 $g(x)$ 的余式相同, 则称 $f_1(x)$ 与 $f_2(x)$ 模 $g(x)$ 同余. 记为 $f_1(x) \equiv f_2(x) \pmod{g(x)}$.

♣

推论 0.1

设 $F[x]$ 为域 F 上的一元多项式环, $f_1(x), f_2(x), g(x) \in F[x]$ 且 $g(x) \neq 0$, 则

$$f_1(x) \equiv f_2(x) \pmod{g(x)} \iff g(x) \mid (f_1(x) - f_2(x)),$$

而且 $f_1(x) \equiv f_2(x) \pmod{g(x)}$ 无论对 $F[x]$ 的加法或乘法都是同余关系.

♡

证明 $f_1(x) \equiv f_2(x) \pmod{g(x)}$ 当且仅当存在 $q_1(x), q_2(x), r(x) \in F[x]$, 使

$$f_1(x) = q_1(x)g(x) + r(x), \quad f_2(x) = q_2(x)g(x) + r(x).$$

这也当且仅当

$$f_1(x) - f_2(x) = (q_1(x) - q_2(x))g(x) \iff g(x) \mid (f_1(x) - f_2(x)).$$

设 $f_1(x) \equiv f_2(x) \pmod{g(x)}, f_3(x) \equiv f_4(x) \pmod{g(x)}$, 则存在 $q_1(x), q_2(x), q_3(x), q_4(x), r_1(x), r_2(x) \in F[x]$, 使

$$f_1(x) = q_1(x)g(x) + r_1(x), \quad f_2(x) = q_2(x)g(x) + r_2(x),$$

$$f_3(x) = q_3(x)g(x) + r_3(x), \quad f_4(x) = q_4(x)g(x) + r_4(x).$$

于是

$$\begin{aligned} f_1(x) + f_3(x) &= (q_1(x) + q_3(x))g(x) + r_1(x) + r_2(x), \\ f_2(x) + f_4(x) &= (q_2(x) + q_4(x))g(x) + r_1(x) + r_2(x), \\ f_1(x)f_3(x) &= (q_1(x)q_3(x)g(x) + q_1(x)r_2(x) + q_3(x)r_1(x))g(x) + r_1(x)r_2(x), \\ f_2(x)f_4(x) &= (q_2(x)q_4(x)g(x) + q_2(x)r_2(x) + q_4(x)r_1(x))g(x) + r_1(x)r_2(x). \end{aligned}$$

故

$$\begin{aligned} f_1(x) + f_3(x) &\equiv f_2(x) + f_4(x) \pmod{g(x)}, \\ f_1(x)f_3(x) &\equiv f_2(x)f_4(x) \pmod{g(x)}. \end{aligned}$$

因此 $f_1(x) \equiv f_2(x) \pmod{g(x)}$ 对 $F[x]$ 的加法和乘法都是同余关系.

□

定义 0.3

设 F 是一个域, $F[x]$ 为 F 上一元多项式环, 若 $c \in F$ 且使 $f(c) = 0$, 则称 c 是 $f(x)$ 的一个根.

♣

推论 0.2

设 $F[x]$ 为域 F 上的一元多项式环且 $f(x) \in F[x], c \in F$, 则

$$f(x) \equiv f(c) \pmod{(x - c)} \quad (1)$$

且 $(x - c) | f(x) \iff f(c) = 0 \iff c$ 是 $f(x)$ 的根.

♡

证明 事实上, 由定理??, F 的恒等映射 id_F 可开拓为 $F[x]$ 到 F 的同态 η , 使得

$$\eta_F = \text{id}_F, \quad \eta(x) = c.$$

从而

$$\eta(f(x)) = f(c), \quad \forall f(x) \in F[x].$$

现因 $\deg(x - c) = 1$, 故 $\exists q(x) \in F[x], r \in F$, 使得

$$f(x) = (x - c)q(x) + r.$$

两边作用以 η , 则有

$$f(c) = (c - c)q(c) + r = r,$$

因而式(1)成立. 特别地, $(x - c) | f(x) \iff f(x) \equiv 0 \pmod{(x - c)} \iff f(c) = 0$.

□

推论 0.3

设 F 是一个域, $F[x]$ 为 F 上一元多项式环, $f(x) \in F[x], c_i \in F (i = 1, 2, \dots, k)$, 若 c_1, c_2, \dots, c_k 是 $f(x)$ 的互不相同的根, 则有 $\prod_{i=1}^k (x - c_i) | f(x)$, 从而 $k \leq \deg f(x)$.

♡

证明 显然 $x - c_i$ 是 $F[x]$ 中不可约元素, 由定理 0.2(2) 知 $F[x]$ 是 Euclid 环, 又由定理?? 知 $F[x]$ 是唯一析因环. 再由定理?? 知 $F[x]$ 满足素性条件. 因而 $x - c_i$ 是素元素. 又由 $c_i \neq c_j (i \neq j, 1 \leq i, j \leq k)$. 由

$$\frac{1}{c_i - c_j}(x - c_j) - \frac{1}{c_i - c_j}(x - c_i) = 1$$

及定理?? 知 $(x - c_i, x - c_j) = 1$. 又由推论?? 知 $(x - c_i) | f(x)$, 故由定理?? 知 $\prod_{i=1}^k (x - c_i) | f(x)$, 从而 $k \leq \deg f(x)$.

□

命题 0.1

设 S 为交换整环, R 为 S 的子环且 $1 \in R$, 则 $f(x) \in R[x]$ 在 S 中不同根的个数不超过 $\deg f(x)$.



注 设 R 为交换幺环, S 为 R 的扩环, $f(x) \in R[x], \deg f(x) > 0$, 那么 $f(x)$ 在 S 中不同根的数目是否超过 $\deg f(x)$? 如果 S 为交换整环, 则回答是肯定的. 若 S 非交换或有零因子则不然.

证明 事实上, 设 F 为 S 的分式域. 于是 $R[x] \subseteq S[x] \subseteq F[x]$, 即 $f(x) \in F[x]$. 由**推论 0.3**知结论成立.



例题 0.1 设 \mathbf{H} 为四元数体(见定理??), 由命题??知

$$\mathbf{H} = \{a + bi + cj + dk \mid a, b, c, d \in \mathbb{R}\},$$

因而 $\{a + 0 \cdot i + 0 \cdot j + 0 \cdot k \mid a \in \mathbb{R}\} \cong \mathbb{R}$ 是 \mathbf{H} 的一个子环. 由命题??知 $i^2 = j^2 = k^2 = -1$, 故 i, j, k 都是 \mathbb{R} 上的多项式 $x^2 + 1$ 的根, 从而 $bi + cj + dk$ 都是 $x^2 + 1$ 的根, 因此 $x^2 + 1$ 在 \mathbf{H} 中有无穷多个根.

例题 0.2 设 $R = S = \mathbb{Z}_8$. 不难看出 $x^2 - 1 \in R[x]$ 有 4 个不同的根 $\bar{1}, \bar{3}, \bar{5}, \bar{7}$, 其中, \bar{n} 表示 $n + 8\mathbb{Z}$.

命题 0.2

设 $a, b \in \mathbb{N}$, 若 $a \nmid b$, 则存在素数 p , 使得

$$a = p^r l, \quad b = p^s k, \quad (p, l) = (p, k) = (p, lk) = 1, \quad r > s.$$



证明 由算术基本定理知, 存在 $n \in \mathbb{N}$ 以及互不相同的素数 p_1, p_2, \dots, p_n , 使得

$$a = \prod_{i=1}^n p_i^{k_i}, \quad b = \prod_{i=1}^n p_i^{k'_i},$$

其中 $k_i, k'_i \in \mathbb{N}$. 因为 $a \mid b$ 当且仅当 $k_i \leq k'_i, i = 1, 2, \dots, n$, 所以由 $a \nmid b$ 可得, 存在 $i_0 \in \{1, 2, \dots, n\}$, 使得 $k_{i_0} > k'_{i_0}$. 于是记 $p = p_{i_0}, r = k_{i_0}, s = k'_{i_0}, l = \prod_{i \neq i_0} p_i^{k_i}, k = \prod_{i \neq i_0} p_i^{k'_i}$, 则 $r > s$ 且

$$a = p_{i_0}^{k_{i_0}} \prod_{i \neq i_0} p_i^{k_i} = p^r l, \quad b = p_{i_0}^{k'_{i_0}} \prod_{i \neq i_0} p_i^{k'_i} = p^s k.$$

由 p_1, p_2, \dots, p_n 是互不相同的素数可知 $(p, l) = (p, k) = 1$, 故 $(p, lk) = 1$.

**定理 0.3**

设 F 是一个域, G 是 $F^* = F \setminus \{0\}$ 的一个有限的乘法子群, 则 G 为循环群.



证明 设 $|G| = n, g$ 是 G 中最大阶的元素且其阶为 m , 因而 $\langle g \rangle = \{1, g, g^2, \dots, g^{m-1}\} \subseteq G$, 由 Lagrange 定理知 $m \mid n$. 任取 $h \in G$, 设 h 的阶为 m_1 , 如果 $m_1 \nmid m$, 则由**命题 0.2**知有素数 p , 使得

$$m_1 = p^r l, \quad m = p^s k, \quad (p, l) = (p, k) = (p, lk) = 1, \quad r > s.$$

由 h 的阶为 m_1 , 故 h^l 的阶为 p^r, g^{p^s} 的阶为 k , 由于 G 为 Abel 群, 故 $h^l g^{p^s} = g^{p^s} h^l, (p^r, k) = 1$, 由定理????知 $h^l g^{p^s}$ 的阶为 $p^r k$, 但 $p^r k > p^s k = m$. 这与 m 的选取矛盾, 故 $m_1 \mid m$.

由此得 $\forall h \in G, h$ 都是 $x^m - 1$ 的根, 即 $G \subseteq \{x \mid x^m - 1 = 0\}$. 由**命题 0.1**知 $x^m - 1$ 至多有 m 个根, 又 $\langle g \rangle$ 中 m 个元素都是 $x^m - 1$ 的根, 故 $\langle g \rangle \subseteq \{x \mid x^m - 1 = 0\}$ 且 $|\{x \mid x^m - 1 = 0\}| = m = |\langle g \rangle|$, 因此 $\langle g \rangle = \{x \mid x^m - 1 = 0\}$. 于是 $G \subseteq \langle g \rangle$. 故 $G = \langle g \rangle$, 这就证明了 G 是循环群.

**推论 0.4**

有限域 F 的非零元素集 F^* 对乘法为循环群.



注 这个推论对有限域理论是很重要的.

证明 由**定理 0.3**立得.

□

定理 0.4

设 F 为域, $f(x), g(x) \in F[x]^* = F[x] \setminus \{0\}$, 则 $f(x), g(x)$ 非互素的充分必要条件为 $\exists f_0(x), g_0(x) \in F[x]^*$, 使得

$$g_0(x)f(x) = f_0(x)g(x),$$

其中,

$$0 \leq \deg f_0(x) < \deg f(x), \quad 0 \leq \deg g_0(x) < \deg g(x).$$

♡

证明 显然这样的最大公因式是唯一的. 设 $d(x) = (f(x), g(x))$, 于是有 $f(x) = d(x)f_0(x), g(x) = d(x)g_0(x)$. 由 $f(x), g(x)$ 非互素, 故 $\deg d(x) > 0$, 因而

$$0 \leq \deg f_0(x) < \deg f(x), \quad 0 \leq \deg g_0(x) < \deg g(x)$$

且有

$$g_0(x)f(x) = d(x)f_0(x)g_0(x) = f_0(x)g(x).$$

由此知必要性成立.

反之, 假设 $(f(x), g(x)) = 1$, 于是 $\exists u(x), v(x) \in F[x]$, 使 $u(x)f(x) + v(x)g(x) = 1$, 因而有

$$\begin{aligned} f_0(x) &= f_0(x) \cdot 1 = f_0(x)u(x)f(x) + v(x)f_0(x)g(x) \\ &= f(x)(f_0(x)u(x) + v(x)g_0(x)), \end{aligned}$$

即得 $\deg f_0(x) \geq \deg f(x)$. 这与条件矛盾, 故 $(f(x), g(x)) \neq 1$.

□

推论 0.5

设 F 为域, $f(x), g(x) \in F[x]^* = F[x] \setminus \{0\}$, 记

$$\begin{aligned} f(x) &= \sum_{k=0}^n a_k x^{n-k}, \quad a_0 \neq 0, n \in \mathbb{N}, \\ g(x) &= \sum_{k=0}^m b_k x^{m-k}, \quad b_0 \neq 0, m \in \mathbb{N}. \end{aligned}$$

再记

$$f_0(x) = \sum_{k=1}^n x_k x^{n-k}, \quad g_0(x) = \sum_{k=1}^m x_{n+k} x^{m-k},$$

则 $(f(x), g(x)) \neq 1$ 当且仅当存在 $(x_1, x_2, \dots, x_{m+n}) \neq 0$, 使 $f(x)g_0(x) = g(x)f_0(x)$,

♡

证明 由定理 0.4 立得.

□

定义 0.4 (结式/Sylvester 行列式)

设 F 是一个域, $f(x), g(x) \in F[x]^* = F[x] \setminus \{0\}$, 则称

$$R(f, g) = \begin{vmatrix} a_0 & a_1 & \cdots & \cdots & a_n \\ a_0 & a_1 & \cdots & \cdots & a_n \\ \ddots & \ddots & & & \ddots \\ & & a_0 & a_1 & \cdots & \cdots & a_n \\ b_0 & b_1 & \cdots & \cdots & b_m \\ b_0 & b_1 & \cdots & \cdots & b_m \\ \ddots & \ddots & & & \ddots \\ b_0 & b_1 & \cdots & \cdots & b_m \end{vmatrix},$$

为 $f(x)$ 与 $g(x)$ 的结式或 Sylvester 行列式. 显然有

$$\begin{cases} \text{ent}_{i+j}(R(f, g)) = a_j, & 1 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n, \\ \text{ent}_{n+i+j}(R(f, g)) = b_j, & 1 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq m, \\ \text{ent}_{i+j}(R(f, g)) = 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

**定理 0.5**

设 F 是一个域, $f(x), g(x) \in F[x]^* = F[x] \setminus \{0\}$ 非互素的充分必要条件是 $f(x)$ 与 $g(x)$ 的结式 $R(f, g) = 0$.



证明 记

$$f(x) = \sum_{k=0}^n a_k x^{n-k}, \quad a_0 \neq 0, n \in \mathbb{N},$$

$$g(x) = \sum_{k=0}^m b_k x^{m-k}, \quad b_0 \neq 0, m \in \mathbb{N}.$$

再记

$$f_0(x) = \sum_{k=1}^n x_k x^{n-k}, \quad g_0(x) = \sum_{k=1}^m x_{n+k} x^{m-k},$$

由推论 0.5 知 $(f(x), g(x)) \neq 1$ 当且仅当存在 $(x_1, x_2, \dots, x_{m+n}) \neq 0$, 使 $f(x)g_0(x) = g(x)f_0(x)$, 所以有

$$\sum_{l=0}^{n+m-1} \left(\sum_{\substack{j+k=l \\ 0 \leq k \leq m-1}} a_j x_{k+n+1} \right) x^{n+m-1-l} = \sum_{r=0}^{n+m-1} \left(\sum_{\substack{p+q=r \\ 0 \leq q \leq n-1}} b_p x_{q+1} \right) x^{n+m-1-r}.$$

由对应项系数相等, 即得

$$\sum_{\substack{j+k=l \\ 0 \leq k \leq m-1}} a_j x_{k+n+1} = \sum_{\substack{p+q=r \\ 0 \leq q \leq n-1}} b_p x_{q+1}, \quad l = r = 0, 1, \dots, n+m-1.$$

这样得到一个齐次线性方程组

$$A^T \mathbb{X} = \nu,$$

其中, $\mathbb{X} = (x_1, x_2, \dots, x_{m+n})'$,

$$\begin{cases} \text{ent}_{i,i+j}(A) = b_j, & 1 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq m, \\ \text{ent}_{n+i,i+j}(A) = -a_j, & 1 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n, \\ \text{ent}_{i,j}(A) = 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

显然当且仅当 $\det A = 0$ 时才能找到定理 0.4 中的 $f_0(x)$ 与 $g_0(x)$. 又注意到 $R(f, g) = \pm \det A$, 故 $(f(x), g(x)) \neq 1$ 当

且仅当 $R(f, g) = 0$.

□

例题 0.3 设 $f(x) = x^2 + x + 1, g(x) = x^3 - 1 \in \mathbb{Q}[x]$. 证明 $f(x), g(x)$ 不互素并求 $f_0(x), g_0(x)$, 使得 $f(x)g_0(x) = g(x)f_0(x)$.
解

$$R(f, g) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} = 0.$$

故由定理 0.5 知 $f(x), g(x)$ 不互素. 令 $f_0(x) = 1, g_0(x) = x - 1$, 则 $f(x)g_0(x) = g(x)f_0(x)$.

□

命题 0.3

设

$$\begin{aligned} f(x) &= (x - x_1)(x - x_2) \cdots (x - x_n) = x^n + a_1 x^{n-1} + \cdots + a_n, \\ g(x) &= (x - y_1)(x - y_2) \cdots (x - y_m) = x^m + b_1 x^{m-1} + \cdots + b_m, \end{aligned}$$

证明

$$R(f, g) = \prod_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} (x_i - y_j).$$

◆

证明 注意 $(-1)^i a_i, (-1)^j b_j$ 分别是 x_1, x_2, \dots, x_n 的 i 次初等对称多项式, y_1, y_2, \dots, y_m 的 j 次初等对称多项式.

在行列式 $R(f, g)$ 按组合求和定义的完全展开式中任一非零项

$$\prod_{i=1}^{m+n} \text{ent}_i \sigma(i) R(f, g), \quad \sigma \in S_{m+n}$$

是 $x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_m$ 的齐次多项式, 其次数为

$$\sum_{i=1}^m (\sigma(i) - i) + \sum_{i=m+1}^{m+n} (\sigma(i) - (i - m)) = \sum_{i=1}^{m+n} \sigma(i) - \sum_{i=1}^{m+n} i + mn = mn.$$

因此, $R(f, g)$ 是 $x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_m$ 的 mn 次齐次多项式.

当 $x_i = y_j$ 时, 此时 $f(x), g(x)$ 有公共根, 从而 $f(x), g(x)$ 不互素, 故由定理 0.5 知 $R(f, g) = 0$. 将 $R(f, g)$ 视为关于 x_i 的一元多项式, 则 y_j 为其根. 于是 $(x_i - y_j) | R(f, g)$, 所以

$$\prod_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} (x_i - y_j) | R(f, g).$$

又 $\deg \prod_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} (x_i - y_j) = mn = \deg R(f, g)$, 于是

$$\prod_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} (x_i - y_j) = \pm R(f, g).$$

注意

$$\prod_{i=1}^{m+n} \text{ent}_i \sigma(i) R(f, g) = a_0^m b_m^n = (-1)^{mn} (y_1 y_2 \cdots y_m)^n,$$

$\prod_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} (x_i - y_j)$ 中 $(y_1 y_2 \cdots y_m)^n$ 的系数亦为 $(-1)^{mn}$, 因此有

$$R(f, g) = \prod_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} (x_i - y_j).$$

□