



离散数学

Discrete Mathematics

第十七讲：代数系统引论

吴楠

南京大学计算机科学与技术系

2024 年 4 月 24 日



前情提要



- 偏序关系
- 偏序集与哈斯图
- 偏序集中的特殊元素
- 特殊元素的性质
- 偏序格





本讲主要内容



- 运算及其封闭性
- 运算的性质
- 运算表
- 代数系统
- 代数系统的性质
 - 结合性、交换性、分配性
 - 单位元、零元、逆元
- 代数系统的同构与同态





Abū ‘ Abdallāh Muḥammad ibn Mūsā al-Khwārizmī (c. 780 – 850 ?)



Arab mathematician, born in Khwarizm(now in Uzbekstan). His works on algebra, arithmetic, and astronomical tables greatly advanced mathematical thought, and he was the first to use for mathematical purposes the expression *al jabr* (الجبر) , from which the English word *algebra* is derived. The Latin version of his treatise on algebra was responsible for much of the mathematical knowledge of medieval Europe. His work on *algorithm*, a term derived from his name, introduced the method of calculating by use of Arabic numerals and decimal notation.



—— from Funk & Wagnalls: *New Encyclopedia*

实际上，*al jabr* 一词出自他的著名的书 “*الكتاب المختصر في حساب الجبر والمقابلة*” (*Kitab al jabr w'al-muqabala*) ” (《复原和化简的规则》) 的标题, 这个词在阿拉伯语中意思相当于“reunite”。中文“代数”一词作为学科名, 首先出现于在华的英国人维列利 (Alexander Wylie) 于1853年为介绍西方数学而写的《数学启蒙》(1853), 此时距离Al-Khwarizmi那本书的出版已经超过一千年了。几年后, 维列利与中国学者李善兰合作, 先后将欧几里德《几何原本》后9卷以及德·摩根的《代数学》翻译成中文。



代数系统研究的内容



- **代数系统**一般称为“抽象代数 (abstract algebra)”或者“近世代数 (modern algebra)”，其主要内容为代数的结构 (algebraic structure)
- 代数系统的研究主要包括：**群状结构、环状结构、模状结构、格状结构、特殊代数结构 (布尔代数、李代数、张量代数) 等**



运算的函数定义



- 函数 $f: A^n \rightarrow B$ 称为(从 A 到 B 的) n 元运算 以下主要讨论二元运算

- 例如：利用普通四则运算定义实数集上的一个新运算 “ $*$ ”：

$$x * y = x + y - xy$$

$$\text{则： } 2 * 3 = -1; 0.5 * 0.7 = 0.85$$

- 有限集合上的 m 元运算的个数是确定的

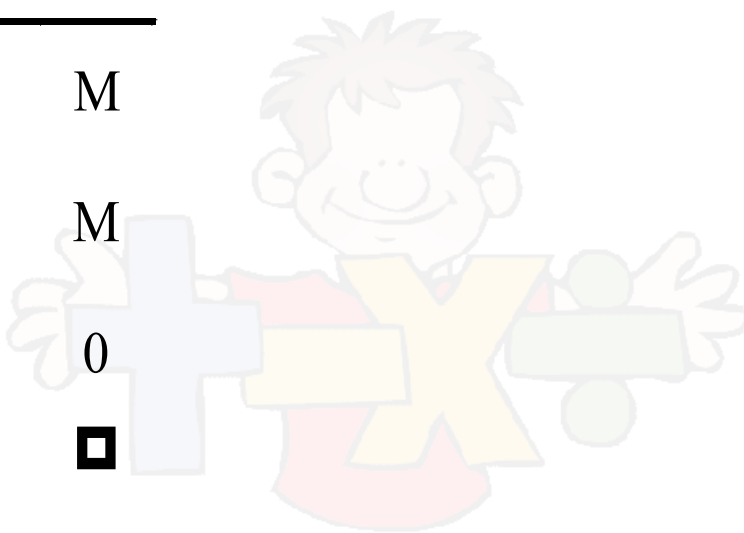


运算表



- 通常用于定义有限集合(一般元素很少)上的一元或二元运算 (如在集合 $\{a, b, c, d\}$ 上定义如下的运算 $*$)

$*$	a	b	c	d
a	1	®	*	M
b	&	6	K	M
c	7	6	Q	0
d	G	#	~	◻





运算的封闭性



- 对于运算 $f: A^n \rightarrow B$, 若 $B \subseteq A$, 则称该运算在集合 A 上 **封闭** (closeness)
- 例:
 - 加法在自然数集上封闭, 但减法在自然数集上不封闭
 - 减法在整数集上封闭, 但除法在整数集上不封闭
 - 对集合 $A = \{1, 2, 3, \dots, 10\}$, gcd运算封闭, lcm则否



证明运算封闭的例子



- 普通加法在正整数集的子集 $A = \{n | 9 | 21n\}$

上封闭

- 证明:

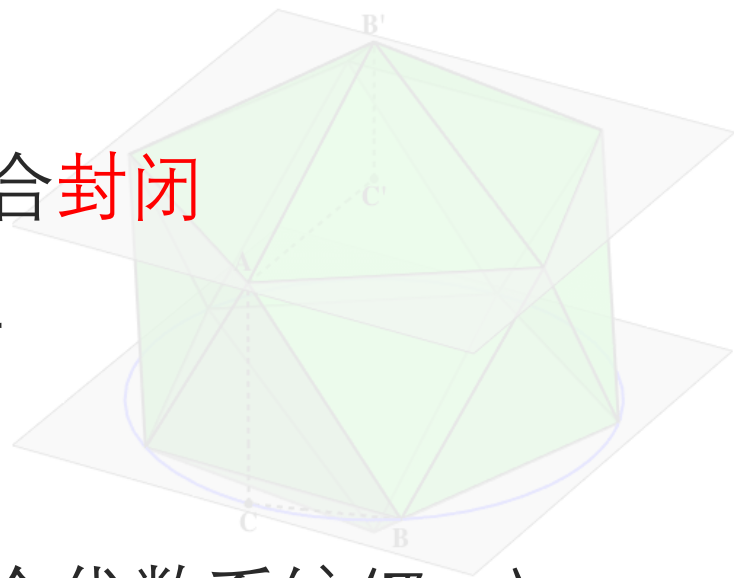
- 设 x, y 是 A 中任意2个元素, 存在 $p, q \in \mathbb{Z}^+$, 满足:
 $21x = 9p$, $21y = 9q$, 则 $21(x + y) = 9(p + q)$,
由于 $p + q \in \mathbb{Z}^+$, 故 $9 | 21(x + y)$, 即 $x + y \in A$. \square



代数系统



- 定义（代数系统 或 代数结构）：
 - 给定1个非空集合（其元素可以是任何对象）；
 - 给定1个或者若干个运算（以下主要讨论存在1个二元运算的情况）；
 - 给定的所有运算对上述集合封闭
- 记法： $\langle S, \circ \rangle$ 、 $\langle S, \circ, *, \Delta \rangle$ 等
- 例子：
 - 整数集与普通加法构成一个代数系统 $\langle \mathbb{Z}, + \rangle$





一个较复杂的代数系统的例子



■ 设集合 $S = \mathbb{R} - \{0,1\}$ ，定义 S 上的6个函数如下：

○ $f_1(x) = x, \quad f_2(x) = (1 - x)^{-1}$

○ $f_3(x) = x^{-1}(x - 1), \quad f_4(x) = x^{-1}$

○ $f_5(x) = x(x - 1)^{-1}, \quad f_6(x) = 1 - x$

■ 则 $\langle \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6\}, \circ \rangle$ 是代数系统，其中 \circ 是函数的复合运算

只需考虑运算的封闭性。例如： $f_2 \circ f_3 = f_1, f_4 \circ f_5 = f_2, f_3 \circ f_6 = f_4$ 等

(注：上例采用复合左先制，即 $f \circ g(x) = g(f(x))$ ，易验证右先制依然满足封闭性)



函数本身作为运算对象



■ 在集合 $S = \mathbb{R} - \{0,1\}$ 上定义函数如下：

○ $f_1(x) = x, \quad f_2(x) = (1-x)^{-1}$

○ $f_3(x) = x^{-1}(x-1), \quad f_4(x) = x^{-1}$

○ $f_5(x) = x(x-1)^{-1}, \quad f_6(x) = 1-x$

■ 要证明 $f_4 \circ f_5 = f_2$ ，需证： $\forall x \in S, f_5(f_4(x)) = f_2(x)$

$$f_5(f_4(x)) = f_5\left(\frac{1}{x}\right) = \left(\frac{1}{x}\right)\left(\frac{1}{x} - 1\right)^{-1} = \left(\frac{1}{x}\right)\left(\frac{x}{1-x}\right) = \left(\frac{1}{1-x}\right)$$



结合性 (associativity)



- 集合 A 上的运算 \circ 具有结合性定义为：

$$\forall x, y, z \in A, (x \circ y) \circ z = x \circ (y \circ z)$$

- 如果 \circ 满足结合性，表达式 $x_1 \circ x_2 \circ \cdots \circ x_n$ 可以在保持诸 x_i 先后次序不变的前提下按照任何顺序进行计算



交换性 (commutativity)



- 集合 A 上的运算 \circ 具有交换性定义为：

$$\forall x, y \in A, x \circ y = y \circ x$$

- 如果 \circ 同时满足交换律和结合律，表达式 $x_1 \circ x_2 \circ \cdots \circ x_n$ 可以按照任何顺序进行计算，包括可以随便重新排列诸 x_i 的先后次序



分配性 (distributivity)



- 分配性涉及两个不同的运算
- 集合 A 上的运算 \circ 对 $*$ 满足分配性定义为:

$$\forall x, y, z \in A, x \circ (y * z) = (x \circ y) * (x \circ z)$$



单位元 (identity element)



- 对于实数集 \mathbb{R} 上的普通乘法，实数1满足对任意实数 $x \in \mathbb{R}$ ，有 $1 \cdot x = x \cdot 1$
- 元素 e 是代数系统 $\langle S, \circ \rangle$ 的**单位元**当且仅当

$$\forall x \in S, e \circ x = x \circ e = x$$

- 单位元可记为 $\mathbf{1}_S$ ，或简记为 $\mathbf{1}$ （读作 **幺**）
- 代数系统**不一定有**单位元



左单位元和右单位元



- e_L 称为系统的左单位元(左幺)当且仅当

$$\forall x \in S, e_L \circ x = x$$

- 可以相应地定义系统的右单位元(右幺) e_R

$$\forall y \in S, y \circ e_R = y$$

*	a	b	c	d
a	a	d	c	a
b	b	d	c	b
c	c	d	c	c
d	d	d	b	d

*	a	b	c	d
a	a	b	c	d
b	a	b	c	d
c	a	b	c	d
d	a	b	c	d



关于单位元的进一步讨论



- 左、右单位元不一定存在
- 左、右单位元不一定唯一
- 假设一个代数系统同时有左、右单位元，则左、右单位元必相等且唯一；即系统的单位元（幺元）
 - $e_L = e_L \circ e_R = e_R$
- 系统若有单位元，必是唯一的
 - $e_1 = e_1 \circ e_2 = e_2$



逆元 (inverse element)



- 只对存在单位元的代数系统讨论逆元
- 给定系统 S 中的元素 x ，若存在 S 中的元素 x' ，满足 $x' \circ x = \mathbf{1}_S$ ，则称 x' 是 x 的左逆元；若存在 x'' ，满足 $x \circ x'' = \mathbf{1}_S$ ，则称 x'' 是 x 的右逆元
- 给定系统 S 中的元素 x ，如果存在 S 中的元素 x^* ，满足 $x \circ x^* = x^* \circ x = \mathbf{1}_S$ ，即 x 的左逆元与右逆元相等，则称 x^* 是 x 的逆元，一般记为 x^{-1} ，其满足
 - (同一性) 逆元既是左逆元，又是右逆元
 - (互逆性) 如果 y 是 x 的逆元，则 x 也是 y 的逆元



一个关于逆元的例子



*	a	b	c	d
a	a	b	c	d
b	b	c	d	a
c	c	a	c	a
d	d	b	c	d

■ 从运算表中可见：

(1) b 的左、右逆不同

(2) c 有2个右逆，无左逆

(3) d 有左逆，无右逆



关于逆元的进一步讨论



■ 如果代数系统 $\langle S, \circ \rangle$ 具有结合性：

○ 若给定的元素既有左逆又有右逆，则二者必相等且唯一

■ 设 S 中给定的元素 x 的左逆是 x' ，右逆是 x'' ，则：

$$x' = x' \circ \mathbf{1}_S = x' \circ (x \circ x'') = (x' \circ x) \circ x'' = \mathbf{1}_S \circ x'' = x''$$

○ 若每个元素均有左逆，则左逆即右逆：各元素的逆元唯一

■ 任给 S 中元素 a ，设 a 的左逆是 b ， b 的左逆是 c ，则：

b 也为右逆？

$$a \circ \overset{\curvearrowright}{b} = (\mathbf{1}_S \circ a) \circ b = ((c \circ b) \circ a) \circ b$$

$$= (c \circ (b \circ a)) \circ b = (c \circ \mathbf{1}_S) \circ b = c \circ b = \mathbf{1}_S$$



零元 (zero element)



- 对于实数集上的普通乘法“ \cdot ”，实数0满足：对任意实数 x ， $0 \cdot x = x \cdot 0 = 0$
- 元素 t 是代数系统 $\langle S, \circ \rangle$ 的零元当且仅当
$$\forall x \in S, t \circ x = x \circ t = t$$
- 零元可记为 0_S ，或简记为 0
- 一个代数系统不一定存在零元



一个代数系统的例子



- 利用普通加减法和乘法定义实数集上的二元运算“ \circ ”如下：

$$\forall x, y \in \mathbb{R}, x \circ y = x + y - xy$$

- 交换性：显然；
- 结合性： $(x \circ y) \circ z = x \circ (y \circ z) = x + y + z - xy - xz - yz + xyz$ ；
- 单位元：0；零元：1；
- x ($x \neq 1$) 的逆元为： $\frac{x}{x-1}$ ，1无逆元



一个与编码有关的代数系统



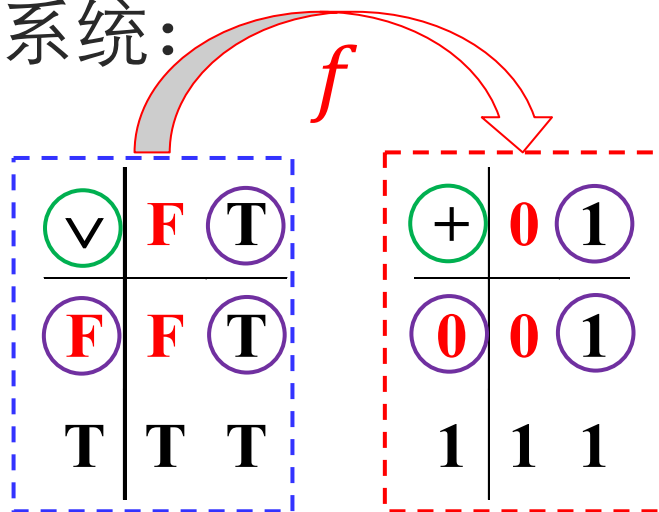
- 设字母表 $A = \{0,1\}$, A^* 是 A 上的长度为 n 的字符串的集合
- 定义 A^* 上的运算 \oplus 如下:
 $\forall x, y \in A^*$, $x \oplus y$ 是长度为 n 的二进数字串, 第 i 位 ($i = 0, 1, \dots, n-1$) 为 1 当且仅当 x, y 的相应位互异
- $\langle A^*, \oplus \rangle$ 是一个代数系统
- 该系统满足: 交换性、结合性、存在单位元、每个元素均有逆元



“相似”的系统



- 比较 $\langle\{F, T\}, \vee\rangle$ (真/假逻辑或) 与 $\langle\{0, 1\}, +\rangle$ (0/1布尔和) 两代数系统:



- 若不考虑符号的形式及其含义，则两个代数系统所描述的元素及其运算的“本质”没有差别



同构与同构映射



- 代数系统 $\langle S_1, \circ \rangle$ 与 $\langle S_2, * \rangle$ **同构** (isomorphism)

(记 $S_1 \cong S_2$) 当且仅当存在**双射函数** $f: S_1 \rightarrow S_2$,

满足: $\forall x, y \in S_1, f(x \circ y) = f(x) * f(y)$; 双射

函数 f 被称作**同构映射** (isomorphic mapping)

- 同构关系是等价关系



同态与同态映射



- 只有两个代数系统的集合等大，它们才可能同构
- 代数系统 $\langle S_1, \circ \rangle$ 与 $\langle S_2, * \rangle$ 同态 (homomorphism, 记作 $S_1 \sim S_2$) 当且仅当存在函数 $f: S_1 \rightarrow S_2$, 满足:
$$\forall x, y \in S_1, f(x \circ y) = f(x) * f(y)$$
- 特别地, 若上述 f 是满射, 则称两系统满同态 (epimorphism)
- 例: 整数加系统 $\langle \mathbb{Z}, + \rangle \sim \langle \mathbb{Z}_3, \oplus_3 \rangle$ (模3剩余加系统)
 - 同态映射: $f: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}_3: f(3k + r) = r, k \in \mathbb{Z}, r \in \{0, 1, 2\}$



课堂练习题



- 设代数系统 $\mathbf{Z}_n = \langle \mathbb{Z}_n, \oplus_n \rangle$, \oplus_n 为模 n 剩余加, $f: \mathbb{Z}_{12} \rightarrow \mathbb{Z}_3$, $f(x) = x \bmod 3$. 证明: f 为满同态

证明:

设 \oplus_{12} 和 \oplus_3 分别表示模 12 和模 3 加法, 则有:

$$\begin{aligned} f(x \oplus_{12} y) &= (x \oplus_{12} y) \bmod 3 = ((x + y) \bmod 12) \bmod 3 \\ &= (x + y) \bmod 3 = (x \bmod 3) \oplus_3 (y \bmod 3) = f(x) \oplus_3 f(y) \end{aligned}$$

显然, 对于 \mathbf{Z}_{12} 的幺元 $e_{12} = 0$, 有 $f(e_{12}) = e_3 = 0$, 且 $\text{ran } f = \mathbf{Z}_3$

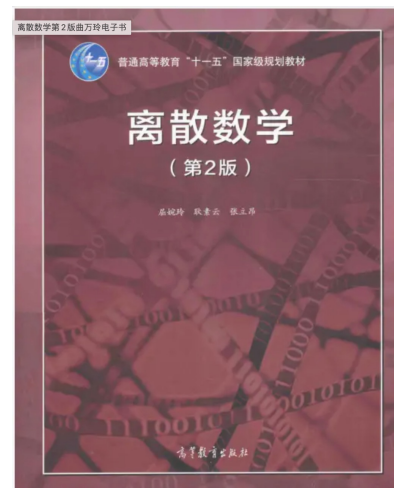
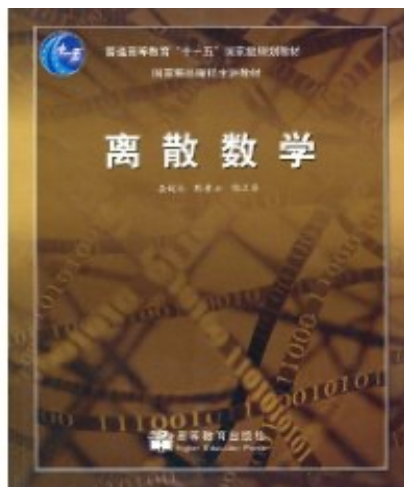
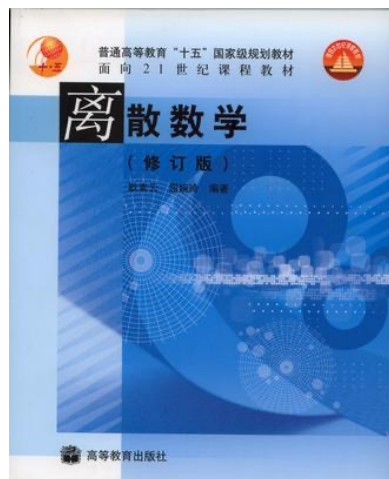
故 f 为从 \mathbf{Z}_{12} 到 \mathbf{Z}_3 的满同态映射。 \square

注: 代数系统同态一般要求同态映射保持两个系统的关键元素 (如单位元、零元、逆元等), 即同态映射会将第一个系统的上述元素映射至第二个系统的同类型元素。因此一般会在证明同态时验证该性质





代数系统部分参考教材



- **注：** 上述教材中有关格、布尔代数和群论部分的扫描文件（PDF格式）请在课程网站上最上面的“公共资源区”→“电子版教材”中下载



本次课后作业



- 教材内容：[屈婉玲] 9.1, 9.2, 9.3 节
- 课后习题：
 - Problem Set 17
- 提交时间：5月6日 10:00 前



进程代数 (Process Algebra)



进程代数是关于通信并发系统的代数理论的统称。20世纪70年代后期英国学者提出了通信系统演算和通信顺序进程，开创了用代数方法研究通信并发系统的先河。此后这一研究方向兴盛不衰，出现了众多类似而又相互区别的演算系统，如ACP、ATP、LOTOS等，统称为进程代数。这些代数理论都使用通信——而不是共享存储——作为进程之间相互作用的基本手段，表现出面向分布式系统的特征。在语法上，进程代数用一组算子作为进程的构件。算子的语义通常用结构化操作语义方法定义，这样进程就可看成是带标号的变迁系统。进程代数的一个显著特征是把并发性归结为非确定性，将并发执行的进程的行为看成是各单个进程的行为的所有可能的交错合成，即所谓交错语义。进程代数研究的核心问题是进程的等价性，即在什么意义下两个进程的行为相同？在进程代数领域使用的最为广泛的等价关系有互模拟、测试等价、失败等价等。对这些语义等价关系均建立了相应的公理系统。关于公理系统的研究不仅加深了对语义理论的理解，而且使得有可能对语义等价关系进行形式推理。为了将进程代数的理论成果应用于解决实际问题，20世纪80年代后期出现了许多计算机支持工具。用这些工具可对进程的行为进行推理或模拟。