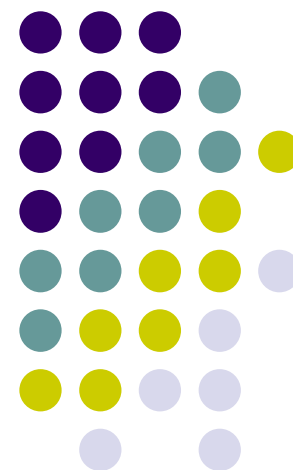


代数系统（一）

代数系统概论

南京大学计算机科学与技术系



提要

- 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 (B.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*, 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 “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”。

而中文 “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。



引子（续）

- 代数系统一般称为“抽象代数（abstract algebra）”或“近世代数”，20世纪初被命名，但其研究的主要内容却于19世纪便已开展
- 代数系统研究的主要内容：有代数结构、群、环、域、模、向量空间、格、布尔代数、李代数等等



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 “ $*$ ”：

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

则： $2 * 3 = -1$ ； $0.5 * 0.7 = 0.85$

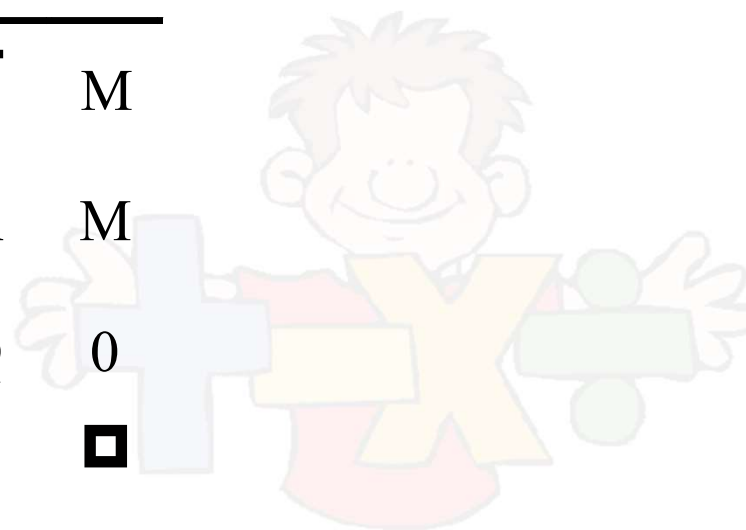
- 有限集合上的 m 元运算的个数是确定的



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*)

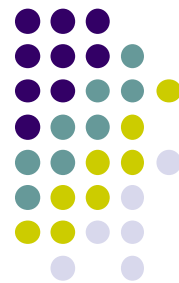
*	a	b	c	d
a	1	®	*	M
b	&	6	K	M
c	7	6	Q	0
d	G	#	~	□





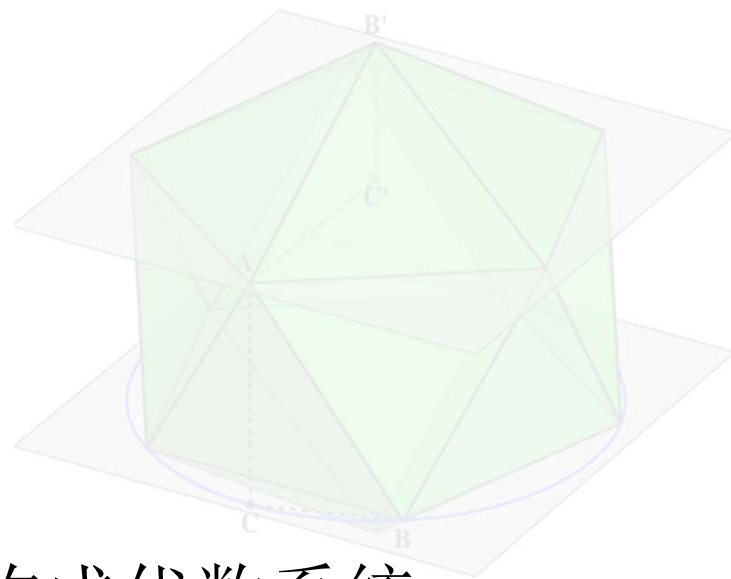
运算的封闭性

- 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



代数系统

- 定义（代数系统）：
 - 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）；
 - 运算对上述集合封闭.
- 记法： $\langle S, \circ \rangle$
- 例子：
 - 整数集与普通加法： $\langle \mathbb{Z}, + \rangle$ 构成代数系统



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

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

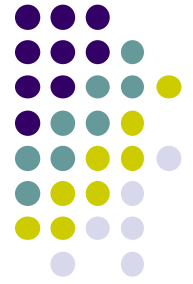
交换性 (commutativity)



- 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 (\cdot) ，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 1_S ，或简记为 1 （读作幺）
- 代数系统不一定有单位元



左单位元和右单位元

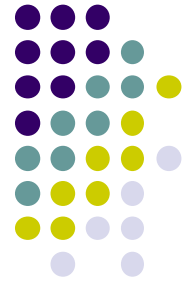
- e_L 称为系统的左单位元(或左幺)当且仅当

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

- 可以相应地定义系统的右单位元(右幺) e_R

*	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
- 定理5-1:

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 $x \circ x^* = x^* \circ x = \mathbf{1}_S$ ，则称 x^* 是 x 的逆元，一般记为 x^{-1}
 - 逆元素既是左逆元，又是右逆元
 - 如果 y 是 x 的逆元，则 x 也是 y 的逆元



一个关于逆元素的例子

*	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
<i>a</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
<i>b</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>a</i>
<i>c</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>a</i>
<i>d</i>	<i>d</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>

注意：

- (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



- **定理5-5:** 如果代数系统 $\langle S, \circ \rangle$ 满足结合律,
 - 若给定的元素既有左逆, 又有右逆, 二者**必相等且唯一**
 - 假设 x 的左逆是 x' , 右逆是 x'' :
 - 若每个元素均有左逆, 则左逆即右逆, 且逆元**唯一**
 - 任给 S 中元素 a , 设 a 的左逆是 b , b 的左逆是 c , 则

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

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

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

零 元



- 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：

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

- 交换律：显然
- 结合律： $(x \circ y) \circ z = x \circ (y \circ z) = x + y + z - xy - xz - yz + xyz$
- 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
- $\langle A^*, \oplus \rangle$ 是代数系统
- 该系统满足: 结合律、交换律、有单位元、每个元素均有逆元



“相似”的系统

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

\vee	F	T
F	F	T
T	T	T

$+$	0	1
0	0	1
1	1	1

- 若不考虑符号的形式及其含义，则两系统的“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: $\forall x, y \in S_1, f(x \circ y) = f(x) * f(y)$ 。其中
的双射函数 f 称同构映射
- 同构关系是等价关系, 只有两个代数系统的
集合等大, 它们才可能同构



同态与同态映射

- 代数系统 $\langle S_1, \circ \rangle$ 与 $\langle S_2, * \rangle$ **同态** (homomorphism, 记 $\mathbf{S_1} \sim \mathbf{S_2}$) 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 $\langle \mathbb{Z}, + \rangle \sim \langle \mathbb{Z}_3, +_3 \rangle$ (模3剩余加系统)
 - 同态映射: $f: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}_3, f(3k + r) = r$