9.2 代数系统

- 代数系统定义
- 同类型与同种的代数系统
- 子代数
- 积代数

代数系统定义与实例

定义

非空集合 S 和 S 上 k 个一元或二元运算 f_1, f_2, … , f_k 组成的系统称为一个代数系统, 简称代数，记做 $V=<S, f_1, f_2, \ldots, f_k>$.

S 称为代数系统的载体， S 和运算叫做代数系统的成分. 有的代数系统定义指定了S中的特殊元素，称为代数常数, 例如二元运算的单位元. 有时也将代数常数作为系统的成分.

实例

$<\mathrm{N},+>$, $<\mathrm{Z},+,\cdot>$, $<\mathrm{R},+,\cdot>$是代数系统，

$+$ 和 $\cdot$ 分别表示普通加法和乘法.

$<M_n(\mathrm{R}),+,\cdot>$是代数系统，

$+$ 和 $\cdot$ 分别表示n 阶 ($n\geq 2$) 实矩阵的加法和乘法.

$<\mathrm{Z}_n,\oplus,\otimes>$是代数系统，$\mathrm{Z}_n=\{0, 1, \ldots, n\text{-}1\}$,

$\oplus$ 和 $\otimes$ 分别表示模 n 的加法和乘法，$\forall x,y\in \mathrm{Z}_n$,

$$x\oplus y = (x+y) \bmod n,\quad x\otimes y = (xy) \bmod n$$

$<P(S),\cup,\cap,\sim>$ 也是代数系统，

$\cup$和$\cap$为并和交，$\sim$为绝对补

同类型与同种代数系统

定义 (1) 如果两个代数系统中运算的个数相同，对应运算的元数相同，且代数常数的个数也相同，则称它们是 同类型的 代数系统.

(2) 如果两个同类型的代数系统规定的运算性质也相同，则称为 同种的 代数系统.

例1 $V_1 = <\mathbf{R}, +, \cdot, 0, 1>$,

$V_2 = <M_n(\mathbf{R}), +, \cdot, \theta, E>$,

θ 为 n 阶全 0 矩阵，E 为 n 阶单位矩阵

$V_3 = <P(B), \cup, \cap, \varnothing, B>$

同类型与同种代数系统（续）

V_1	V_2	V_3
+ 可交换, 可结合 · 可交换, 可结合 + 满足消去律 · 满足消去律 · 对+可分配 + 对 · 不可分配 +与 · 没有吸收律	+ 可交换, 可结合 · 可交换, 可结合 + 满足消去律 · 满足消去律 · 对+可分配 + 对 · 不可分配 +与 · 没有吸收律	∪可交换, 可结合 ∩可交换, 可结合 ∪不满足消去律 ∩不满足消去律 ∩对∪可分配 ∪对∩可分配 ∪与∩满足吸收律

V_1, V_2, V_3是同类型的代数系统

V_1, V_2是同种的代数系统

V_1, V_2与V_3不是同种的代数系统

子代数

定义 设 $V=<S, f_1, f_2, \ldots, f_k>$ 是代数系统，B 是 S 的非空子集，如果 B 对 $f_1, f_2, \ldots, f_k$ 都是封闭的，且 B 和 S 含有相同的代数常数，则称 $<B, f_1, f_2, \ldots, f_k>$ 是 V 的子代数系统，简称子代数. 有时将子代数系统简记为 B.

实例 N是<Z,+> 和<Z,+,0>的子代数. N–{0}是<Z,+>的子代数，但不是<Z,＋,0>的子代数

说明：

子代数和原代数是同种的代数系统

对于任何代数系统 V，其子代数一定存在.

关于子代数的术语

最大的子代数 就是V本身.

如果V中所有代数常数构成集合 B，且 B 对V中所有运算封闭，则 B 就构成了V的最小的子代数.

最大和最小子代数称为V的平凡的子代数.

若 B 是 S 的真子集，则 B 构成的子代数称为V的真子代数 .

例 设V=<Z,+,0>，令 $n\mathbf{Z} = \{ nz \mid z \in \mathbf{Z}\}$，$n$ 为自然数，则 $n\mathbf{Z}$ 是 V 的子代数, 当 $n = 1$ 和 0 时，$n\mathbf{Z}$ 是 V 的平凡的子代数，其他的都是 V 的非平凡的真子代数.

【例】设I是整数集合，＋是普通加法，$<I,+,0>$是代数系统，设$B=\{x|x=2n\wedge n\in I\}$，证明$<B,+,0>$是$<I,+,0>$的子代数。

证明：任取B的两个元素$2n_1$和$2n_2$，$n_1\in I$，$n_2\in I$。

$$2n_1+2n_2=2(n_1+n_2)\in B \qquad n_1+n_2\in I$$

所以，加法＋在B上封闭。

又$0=2\times 0\in B$

所以$<B,+,0>$ 是$<I,+,0>$的子代数。

积代数

定义 设V_1=<A,*>和V_2=<B,∘ >是两个代数系统，其中*和∘是二元运算。$\forall<a_1,b_1>\in A\times B$和$\forall<a_2,b_2>\in A\times B$，$A\times B$上的二元运算△定义为：

$$<a_1,b_1>\triangle<a_2,b_2>=<a_1 * a_2,\ b_1\circ b_2>$$

代数系统$<A\times B,\triangle>$称为V_1到V_2的积代数或直积，记为$V_1\times V_2$

【例】设$V_1=<A,*>$和$V_2=<B,\circ>$是两个代数系统，其中$A=\{a,b\}$，A上的二元运算$*$如表6.7所示，$B=\{x,y,z\}$，B上的二元运算$\circ$如表6.8所示。试求$V_1\times V_2$

表6.7

$*$	a	b
a	a	b
b	b	a

表6.8

$\circ$	x	y	z
x	x	y	z
y	y	y	z
z	z	z	z

解：$V_1 \times V_2 = <A \times B, \triangle>$，其中

$A \times B = \{<a,x>,<a,y>,<a,z>,<b,x>,<b,y>,<b,z>\}$，

二元运算△如表6.9所示。

表6.9

$\triangle$	$<a,x>$	$<a,y>$	$<a,z>$	$<b,x>$	$<b,y>$	$<b,z>$
$<a,x>$	$<a,x>$	$<a,y>$	$<a,z>$	$<b,x>$	$<b,y>$	$<b,z>$
$<a,y>$	$<a,y>$	$<a,y>$	$<a,z>$	$<b,y>$	$<b,y>$	$<b,z>$
$<a,z>$	$<a,z>$	$<a,z>$	$<a,z>$	$<b,z>$	$<b,z>$	$<b,z>$
$<b,x>$	$<b,x>$	$<b,y>$	$<b,z>$	$<a,x>$	$<a,y>$	$<a,z>$
$<b,y>$	$<b,y>$	$<b,y>$	$<b,z>$	$<a,y>$	$<a,y>$	$<a,z>$
$<b,z>$	$<b,z>$	$<b,z>$	$<b,z>$	$<a,z>$	$<a,z>$	$<a,z>$

定义 设$V_1=<A,*,\circ>$和$V_2=<B,\circledast,\circledcirc>$是两个代数系统，其中$*$、$\circ$、$\circledast$和$\circledcirc$都是二元运算。$\forall <a_1,b_1>,<a_2,b_2>\in A\times B$，定义$A\times B$上的二元运算$\triangle$和$\square$为：

$$<a_1,b_1>\triangle<a_2,b_2>=<a_1*a_2,b_1\circledast b_2>$$

$$<a_1,b_1>\square<a_2,b_2>=<a_1\circ a_2,b_1\circledcirc b_2>$$

代数系统$<A\times B,\triangle,\square>$称为$V_1$到$V_2$的积代数或直积。记为$V_1\times V_2$。

积代数的性质

设 $V_1 = \langle S_1, \circ \rangle$和 $V_2 = \langle S_2, * \rangle$是代数系统，其中 $\circ$ 和 $*$是二元运算. V_1 与 V_2 的积代数是 $V = \langle S_1 \times S_2, \cdot \rangle$

(1) 若 $\circ$ 和 $*$ 运算是可交换的，那么$\cdot$ 运算也是可交换的

(2) 若 $\circ$ 和 $*$ 运算是可结合的，那么$\cdot$ 运算也是可结合的

(3) 若 $\circ$ 和 $*$ 运算是幂等的，那么$\cdot$ 运算也是幂等的

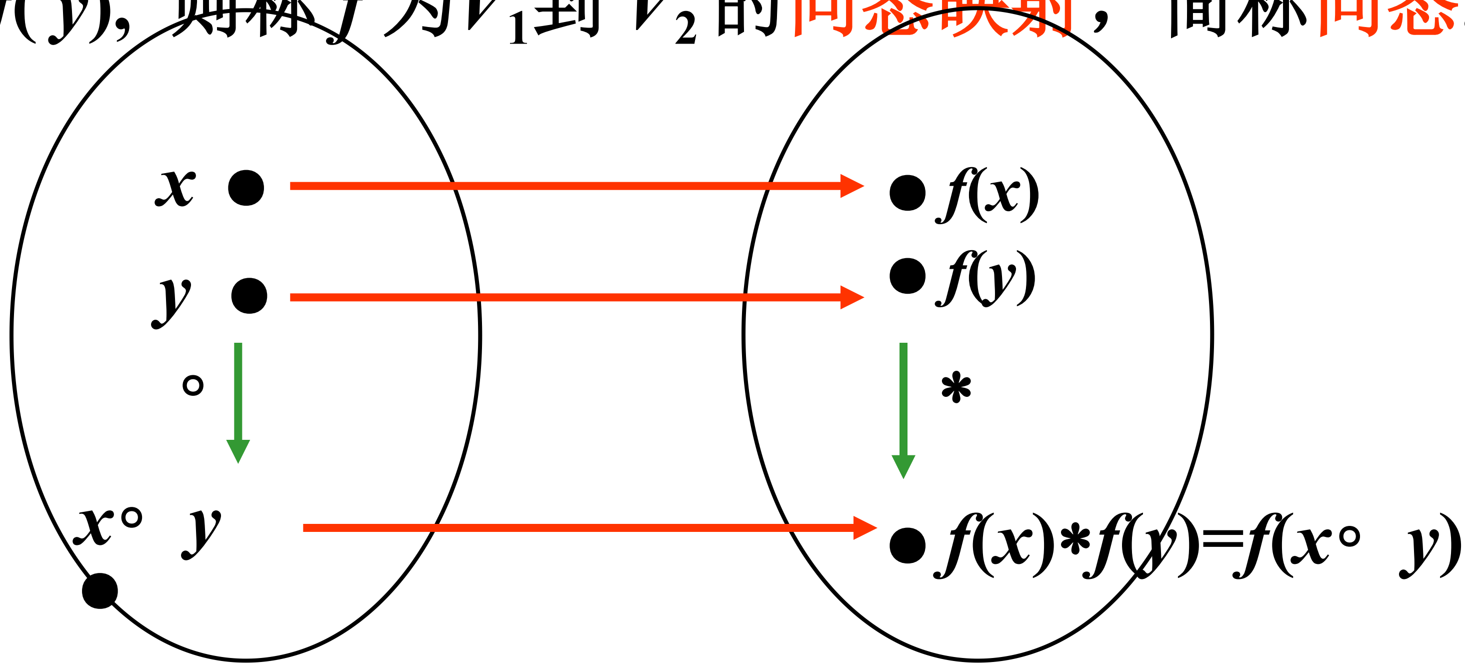
(4) 若 $\circ$ 和 $*$ 运算分别具有单位元 e_1 和 e_2，那么$\cdot$ 运算也具有单位元$\langle e_1, e_2 \rangle$

(5) 若 $\circ$ 和 $*$ 运算分别具有零元 θ_1 和 θ_2，那么$\cdot$ 运算也具有零元$\langle \theta_1, \theta_2 \rangle$

(6) 若 x 关于 $\circ$ 的逆元为 x^{-1}, y 关于 $*$ 的逆元为 y^{-1}，那么$\langle x, y \rangle$关于$\cdot$ 运算也具有逆元$\langle x^{-1}, y^{-1} \rangle$

同态映射的定义

定义 设 $V_1=<S_1,\circ>$和 $V_2=<S_2,*>$是代数系统，其中 $\circ$ 和 $*$是二元运算. $f: S_1 \to S_2$, 且$\forall x,y \in S_1$, $f(x\circ y)=f(x)*f(y)$, 则称 f 为V_1到 V_2 的**同态映射**，简称**同态**.



更广泛的同态映射定义

定义 设 $V_1=<S_1,\circ,\cdot>$和 $V_2=<S_2,*,\Diamond>$是代数系统，其中$\circ$和$*$是二元运算. $f: S_1\rightarrow S_2$, 且$\forall x,y\in S_1$

$$f(x\circ y)=f(x)*f(y)\text{，}\quad f(x\cdot y)=f(x)\Diamond f(y)$$

则称f为V_1到V_2的同态映射，简称同态.

设 $V_1=<S_1,\circ,\cdot,\Delta>$和 $V_2=<S_2,*,\Diamond,\nabla>$是代数系统，其中$\circ$和$*$是二元运算. Δ和∇是一元运算，f: $S_1\rightarrow S_2$, 且$\forall x,y\in S_1$

$$f(x\circ y)=f(x)*f(y),\quad f(x\cdot y)=f(x)\Diamond f(y),\quad f(\Delta x)=\nabla f(x)$$

则称f为V_1到V_2的同态映射，简称同态.

例题

例1 V=<R*,·>, 判断下面的哪些函数是V 的自同态？

(1) $f(x)=|x|$ (2) $f(x)=2x$ (3) $f(x)=x^2$

(4) $f(x)=1/x$ (5) $f(x)= -x$ (6) $f(x)=x+1$

解 (2) , (5), (6) 不是自同态.

(1) 是同态， $f(x\cdot y) = |x\cdot y| = |x| \cdot|y| = f(x) \cdot f(y)$

(3) 是同态， $f(x\cdot y) = (x\cdot y)^2 = x^2 \cdot y^2 = f(x) \cdot f(y)$

(4) 是同态， $f(x\cdot y) = 1/(x\cdot y) =1/x \cdot 1/y = f(x) \cdot f(y)$

特殊同态映射的分类

同态映射如果是单射，则称为单同态；

如果是满射，则称为 满同态，这时称 V_2 是 V_1 的同态像，记作 $V_1 \sim V_2$；

如果是双射，则称为 同构，也称代数系统 V_1 同构于V_2，记作 $V_1 \cong V_2$.

对于代数系统 V，它到自身的同态称为自同态.

类似地可以定义单自同态、满自同态和自同构.

同态映射的实例

例2 设V=<Z,+>，$\forall a \in$Z，令

$$f_a\text{：}Z\to Z\text{，}f_a(x)=ax$$

那么 f_a是V的自同态.

因为$\forall x,y\in$Z，有

$$f_a(x+y) = a(x+y) = ax+ay = f_a(x)+f_a(y)$$

当 $a = 0$ 时称 f_0为零同态；

当$a=\pm 1$时，称 f_a为自同构；

除此之外其他的 f_a 都是单自同态.

同态映射的实例（续）

例3 设V_1=<Q,+>, V_2= <Q*,·>，其中Q*= Q−{0}，令

$$f：Q \to Q^*, f(x)=e^x$$

那么 f 是V_1到V_2的同态映射，因为$\forall x, y \in$Q有

$$f(x+y) = e^{x+y} = e^x \cdot e^y = f(x) \cdot f(y).$$

不难看出 f 是单同态.

同态映射的实例（续）

例4 V_1=<Z,+>， V_2=<Z_n,⊕ >， Z_n={0,1, … , n-1}, ⊕是模 n 加. 令

$$f: Z \to Z_n, \quad f(x) = (x) \bmod n$$

则 f 是 V_1 到 V_2 的满同态. $\forall x, y \in Z$ 有

$$f(x+y) = (x+y) \bmod n$$

$$= (x) \bmod n \oplus (y) \bmod n$$

$$= f(x) \oplus f(y)$$

同态映射的实例（续）

例5 设 V=<Z_n,⊕>，可以证明恰有 n 个G 的自同态，

f_p： $Z_n \to Z_n$,

$f_p(x) = (px) \bmod n$， $p = 0,1, \ldots, n-1$

例如 $n = 6$, 那么

f_0为零同态；

f_1与 f_5为同构；

f_2 与 f_4的同态像是{ 0, 2, 4 }；

f_3 的同态像是{ 0, 3 }.

同态映射保持运算的算律

设V_1,V_2是代数系统. o,* 是V_1上的二元运算，o',*' 是

V_2上对应的二元运算，如果 f: $V_1 \rightarrow V_2$是满同态，那么

(1)若o运算是可交换的（可结合、幂等的），则o'运算也是可交换的（可结合、幂等的）.

(2) 若o运算对* 运算是可分配的，则o'运算对*' 运算也是可分配的；若o 和* 运算是可吸收的，则 o'和*' 运算也是可吸收的。

同态映射保持运算的特异元素

(3) 若e为$\circ$ 运算的单位元，则 $f(e)$为$\circ'$运算的单位元.

(4) 若 θ为$\circ$ 运算的零元，则 $f(\theta)$ 为$\circ'$运算的零元.

(5) 设 $u\in V_1$，若 u^{-1} 是 u 关于$\circ$运算的逆元，则 $f(u^{-1})$ 是 $f(u)$关于$\circ'$运算的逆元。

同态映射的性质

说明：

上述性质仅在满同态时成立，如果不是满同态，那么相关性质在同态像中成立.

同态映射不一定能保持消去律成立.

例如 $f: \mathrm{Z}\to\mathrm{Z}_n$ 是 $V_1=<\mathrm{Z},\cdot>$ 到 $V_2=<\mathrm{Z}_n,\otimes>$的同态，$f(x)=(x)\bmod n$, V_1中满足消去律，但是当 n 为合数时, V_2中不满足消去律.

例题

例6 设V_1=<Q,+> ， V_2=<Q*,·>，其中 Q 为有理数集合，Q*=Q−{0}，+ 和 · 分别表示普通加法和乘法.

证明不存在 V_2 到 V_1 的同构.

证 假设 f 是 V_2 到 V_1 的同构，那么有f: $V_2 \to V_1$，$f(1)=0$. 于是有

$$f(-1)+f(-1) = f((-1)(-1))= f(1)=0$$

从而 $f(-1)=0$，又有 $f(1)=0$，这与 f 的单射性矛盾.

本小节学习目标

- 掌握代数系统的定义
- 掌握子代数、积代数的定义
- 理解同态、同构的定义