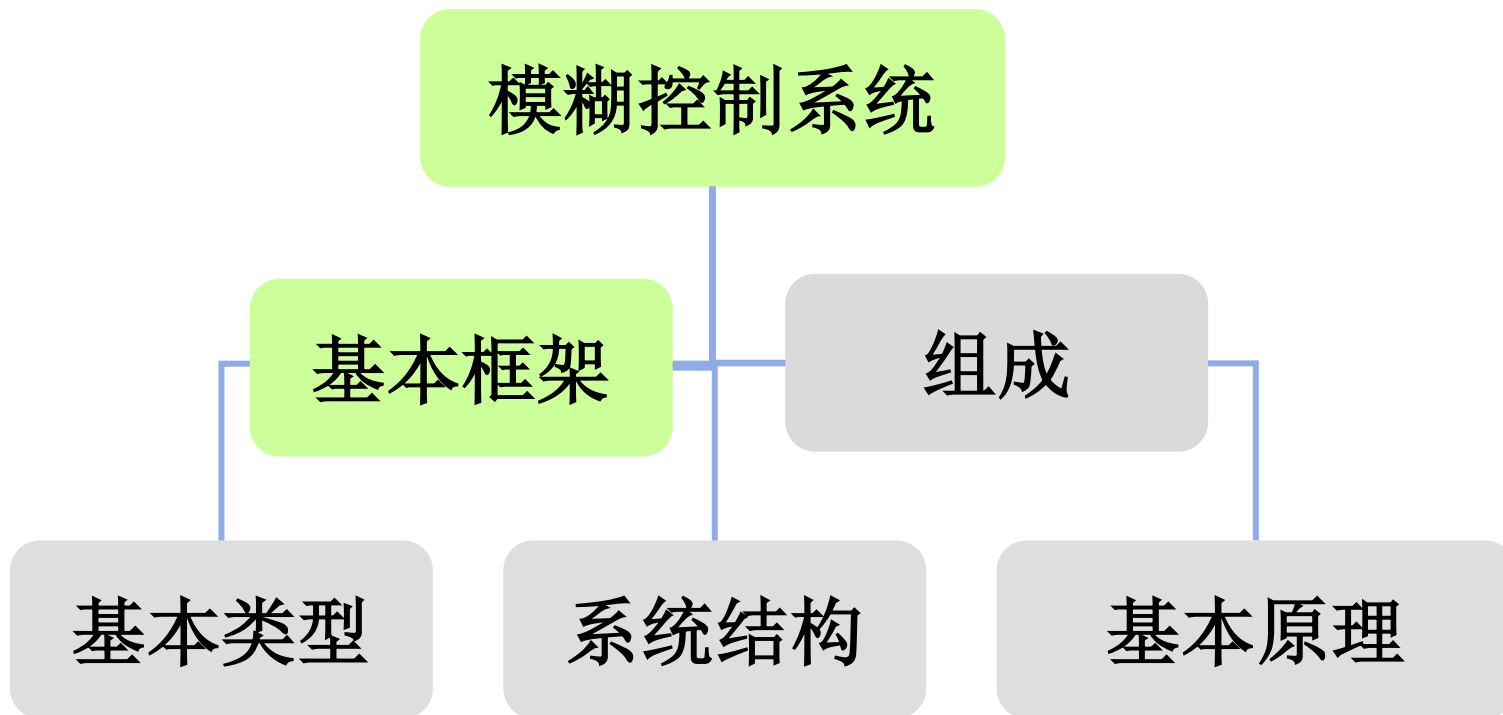
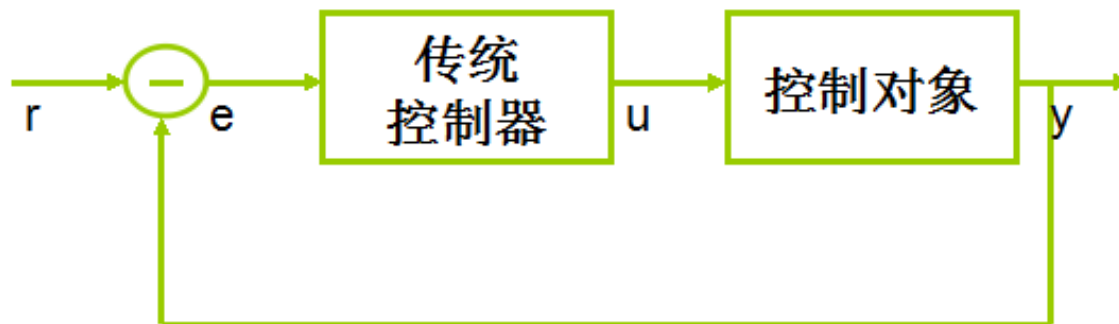


模糊控制系统



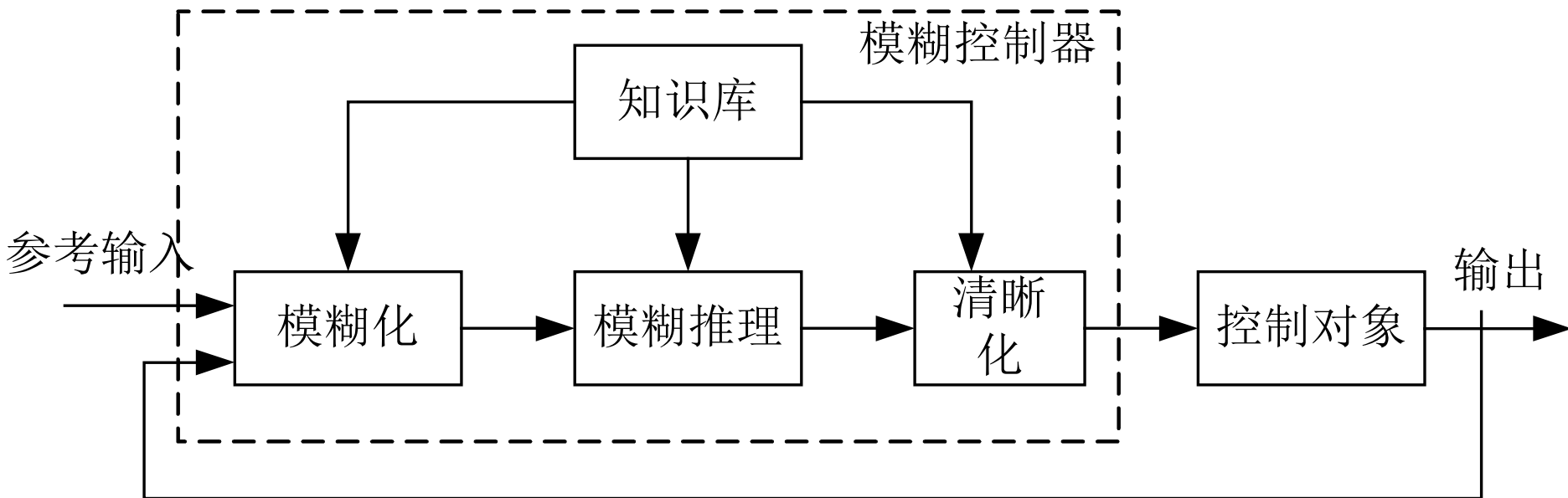
1 模糊控制器—基本框架



$$u = k_P e + k_I \int_t e dt + k_D \dot{e}$$

传统控制器

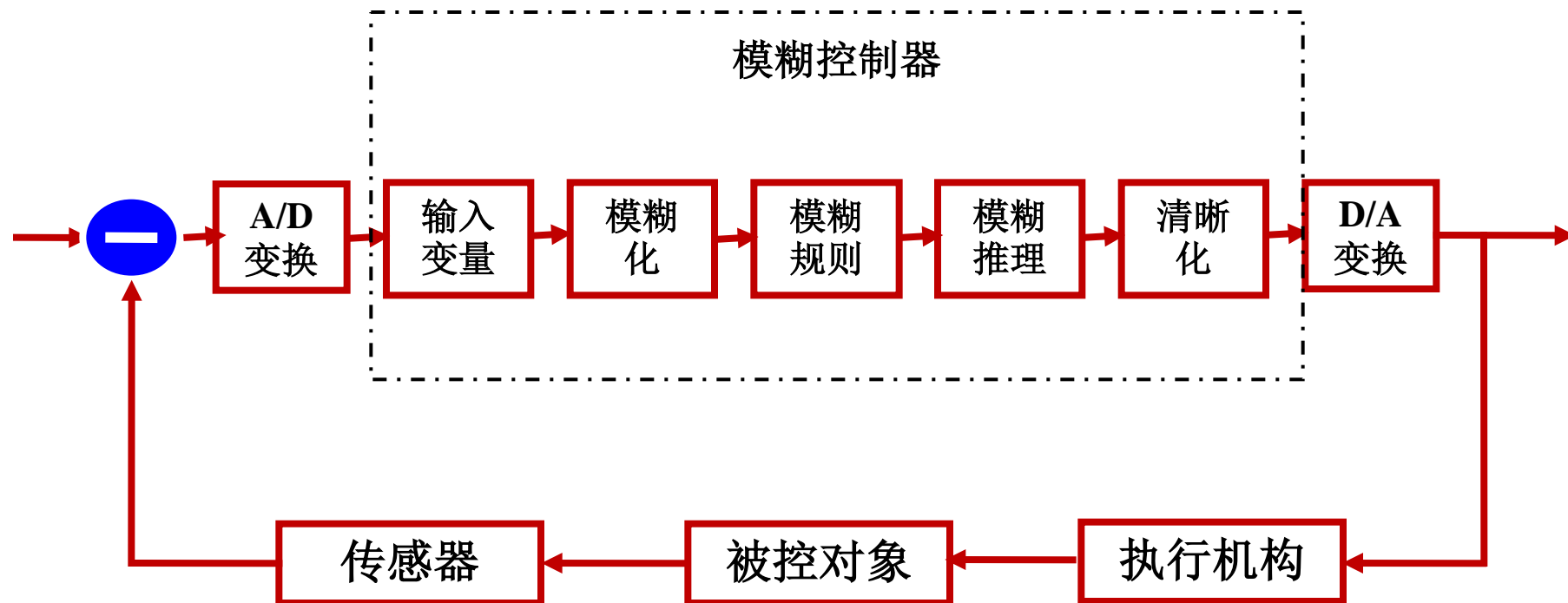
1 模糊控制器—基本框架 (2)



模糊控制器

- 输入/输出接口
- 执行机构
- 被控对象
- 测量装置

1 模糊控制器—基本框架 (3)



1 模糊控制器——基本组成

模糊控制器——基于模糊知识表示和规则推理的语言性

✓ 输入/输出(I/O)接口

与共有的模/数、数/模转换单元类似，模糊控制系统具有用于模糊逻辑处理的“模糊化”和“解模糊化”环节，通常被看做模糊控制器的输入/输出接口

✓ 执行机构

交直流/伺服/步进电机，气/液动缸、阀，液压马达等

✓ 被控对象

设备、装置及其组合，有关自然、社会、生产、生物或其他状态转移过程

✓ 测量装置

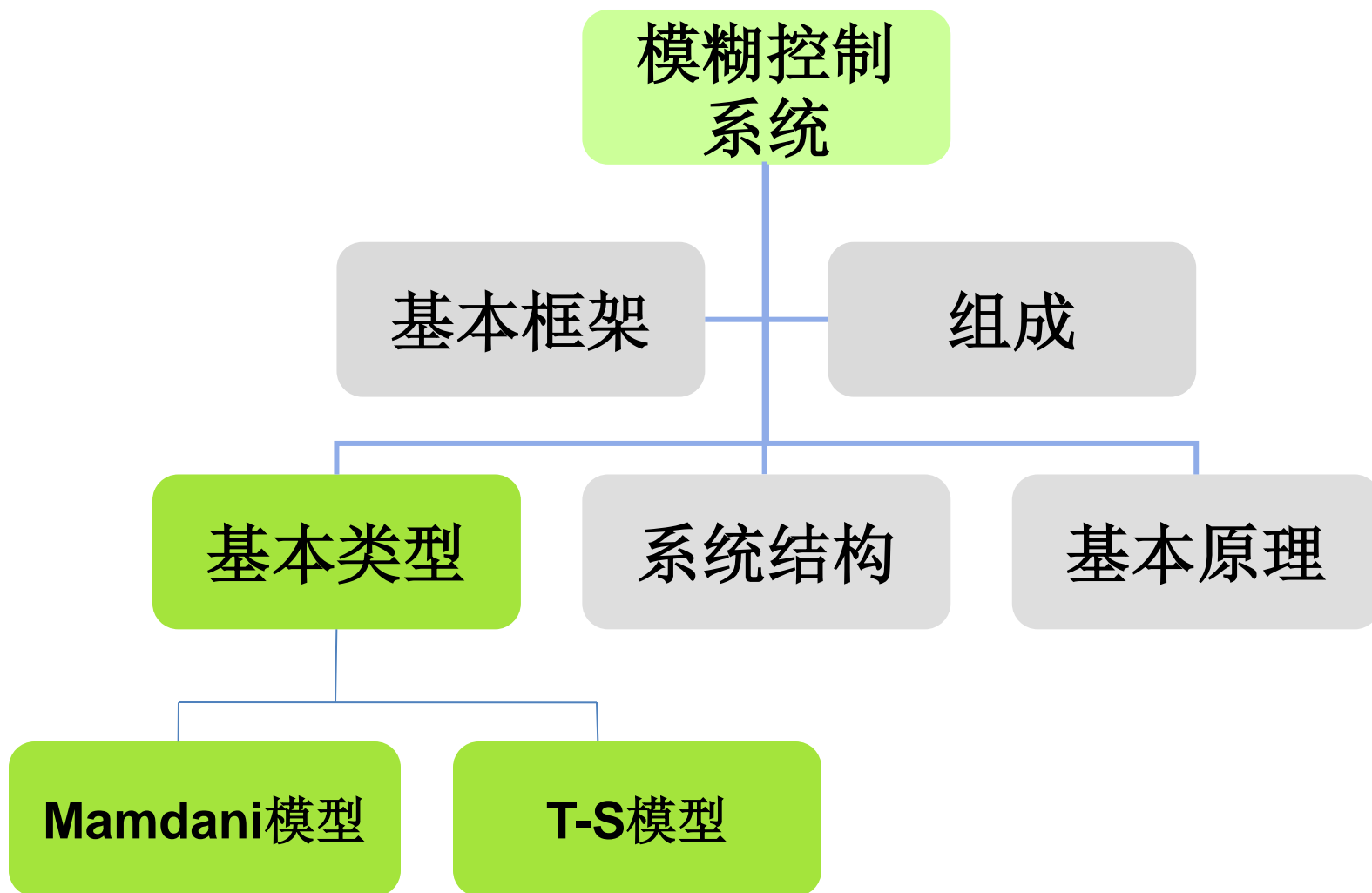
将各种非电量如流量、温度、压力、速度、浓度等转换为电信号，通常由各类数字或模拟测量仪器、检测元件或传感器组成

1 模糊控制器—基本框架 (5)

模糊控制系统的设计过程：

- 1.选择、采样系统输入输出变量值；
- 2.将输入变量的精确值变为模糊量；
- 3.根据输入变量（模糊量）及模糊控制规则，按模糊推理合成规则计算控制量（模糊量）；
- 4.由上述得到的控制量（模糊量）计算精确的控制量。

2 模糊控制系统



2.1 基本类型

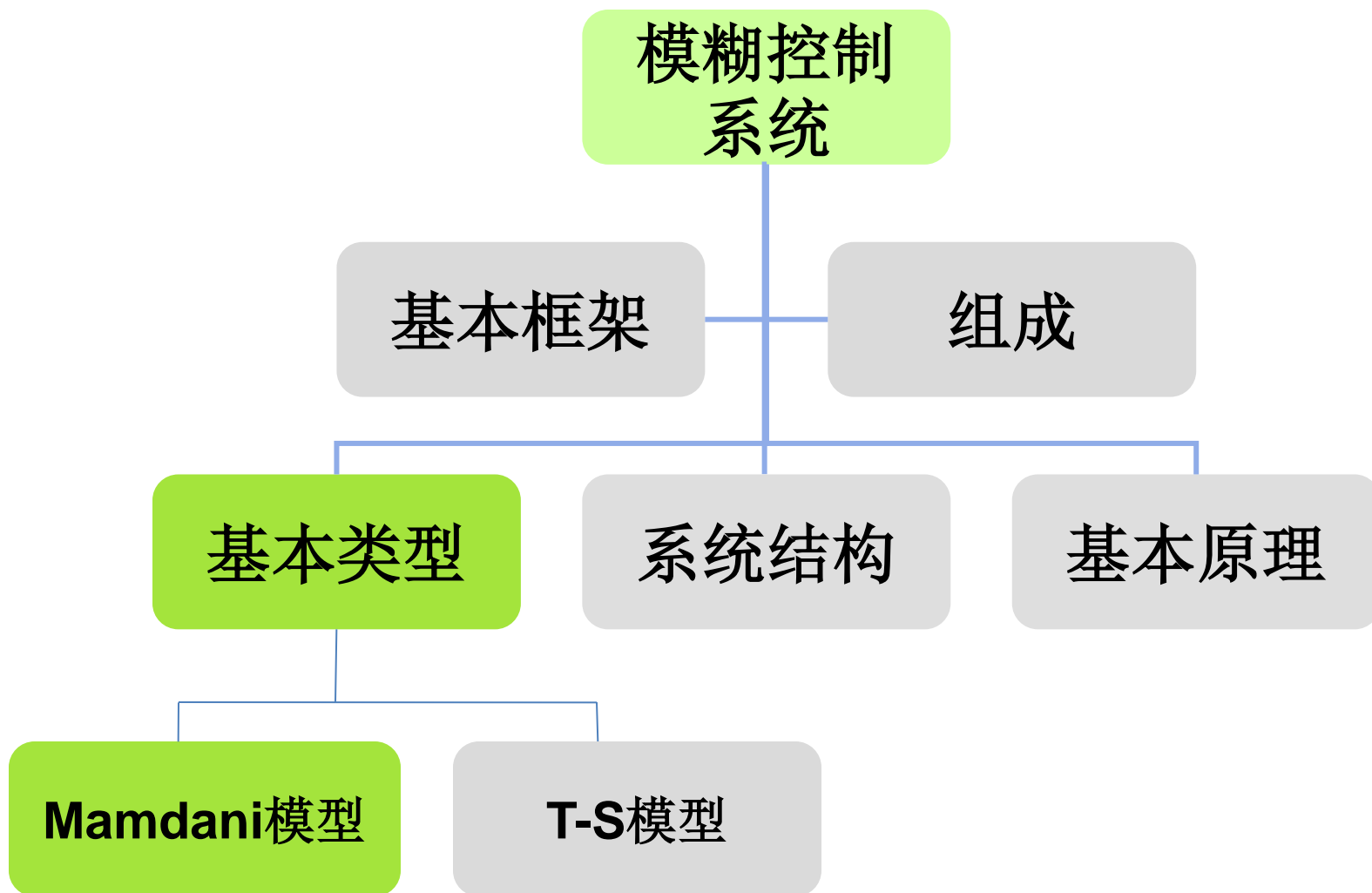
□ Mamdani模糊模型

- 1974年，英国教授E. H. Mamdani 提出
- 首次将模糊集合和模糊推理应用于控制系统

□ T-S模糊模型

- 1985年，日本学者T. Takagi, M. Sugeon 提出
- 采用系统状态变化量或输入变量的函数，作为if-then模糊规则的后件
- 不仅可用来描述模糊控制器，也可描述被控对象的动态模型

2 模糊控制系统



2.1 基本类型--Mamdani模型

□ Mamdani 模糊控制器

多输入单输出 (MISO) , 模糊控制规则 :

$R_1 : \text{if } z_1 \text{ is } A_1^1, \text{and } z_2 \text{ is } A_2^1, \text{and } \dots \text{and } z_p \text{ is } A_p^1 \text{ then } u \text{ is } B^1$

$R_2 : \text{if } z_1 \text{ is } A_1^2, \text{and } z_2 \text{ is } A_2^2, \text{and } \dots \text{and } z_p \text{ is } A_p^2 \text{ then } u \text{ is } B^2$

...

$R_m : \text{if } z_1 \text{ is } A_1^m, \text{and } z_2 \text{ is } A_2^m, \text{and } \dots \text{and } z_p \text{ is } A_p^m \text{ then } u \text{ is } B^m$

其中 , z_1, z_2, \dots, z_p 为前件 (输入) 变量 , 其论域分别为 Z_1, Z_2, \dots, Z_p , $A_i^j \in F(Z_i)$, $i=1, 2, \dots, p$, $j=1, 2, \dots, m$, A_i^m 为前件变量 z_i 的模糊集合 , u 为输出控制变量 , 论域为 U , $B^j \in F(U)$ 为输出变量的模糊集合.

2.1 基本类型--Mamdani模型 (2)

每条规则为直积空间 $Z_1 \times Z_2 \times \dots \times Z_p \times U$ 上的模糊关系

$$(A^j_1 \times A^j_2 \times \dots \times A^j_p) \rightarrow B^j :$$

$$R_j = A^j_1 \times A^j_2 \times \dots \times A^j_p \times B^j$$

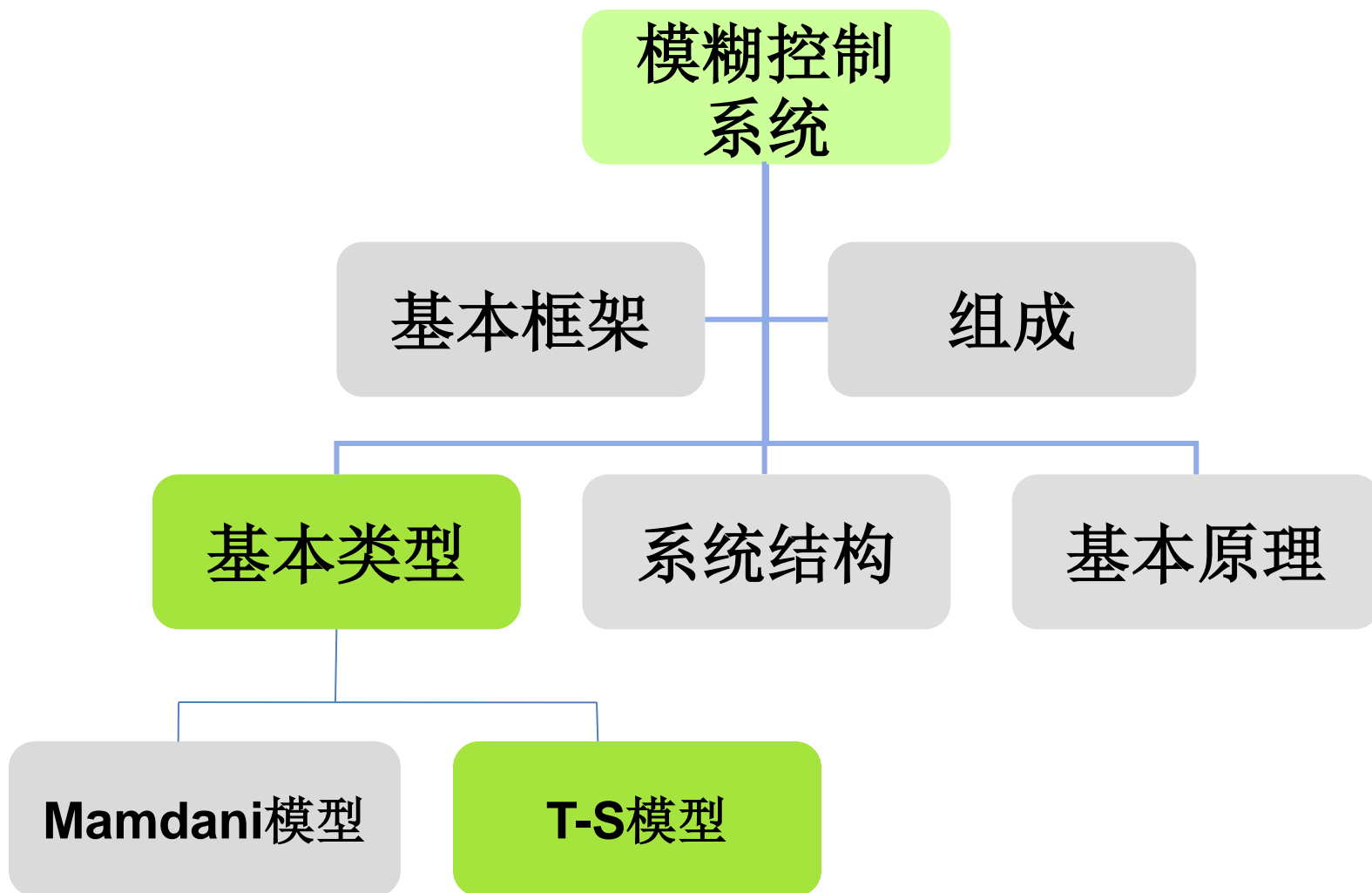
m条规则全体构成的模糊关系为

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_m$$

对于某一组输入 $(z_1 \text{ is } A'_1, z_2 \text{ is } A'_2, \dots, z_p \text{ is } A'_p)$, 模糊推理的结论为 :

$$B' = (A'_1 \times A'_2 \times \dots \times A'_p) \circ R$$

2 模糊控制系统



2.2 基本类型—TS模型

□ TS模型

特点：输出为线性或非线性函数，分段光滑特性

$R_1: \text{if } z_1 \text{ is } A_1^1, \text{and } z_2 \text{ is } A_2^1, \text{and } \dots \text{and } z_p \text{ is } A_p^1 \text{ then } u = f_1(z_1, z_2, \dots, z_p)$

$R_2: \text{if } z_1 \text{ is } A_1^2, \text{and } z_2 \text{ is } A_2^2, \text{and } \dots \text{and } z_p \text{ is } A_p^2 \text{ then } u = f_2(z_1, z_2, \dots, z_p)$

...

$R_m: \text{if } z_1 \text{ is } A_1^m, \text{and } z_2 \text{ is } A_2^m, \text{and } \dots \text{and } z_p \text{ is } A_p^m \text{ then } u = f_m(z_1, z_2, \dots, z_p)$

其中， z_1, z_2, \dots, z_p 为前件（输入）变量，其论域分别为 Z_1, Z_2, \dots, Z_p ， $A_i^j \in F(Z_i)$ ， $i=1, 2, \dots, p$ ， $j=1, 2, \dots, m$ ， A_i^m 为前件变量 z_i 的模糊集合， u 为输出控制变量，论域为 U ， $f_j(z_i)$ 是模糊后件关于前件变量 z_i 的线性或非线性函数。

2.2 基本类型—TS模型 (2)

注意：若选用不同模糊推理方法及模糊化、反模糊化方法，TS控制器的算法和控制系统的性能也将不同

对于一组输入 $(z_1, z_2, \dots, z_p) \in Z_1 \times Z_2 \times \dots \times Z_p$ ，经模糊推理，并采用重心法反模糊化，控制器输出为

$$u' = \frac{\sum_{j=1}^m \omega_j \cdot f_j(z_1, z_2, \dots, z_p)}{\sum_{j=1}^m \omega_j}$$

ω_j 为输入变量对于第 j 条规则的激活度（或匹配度）。

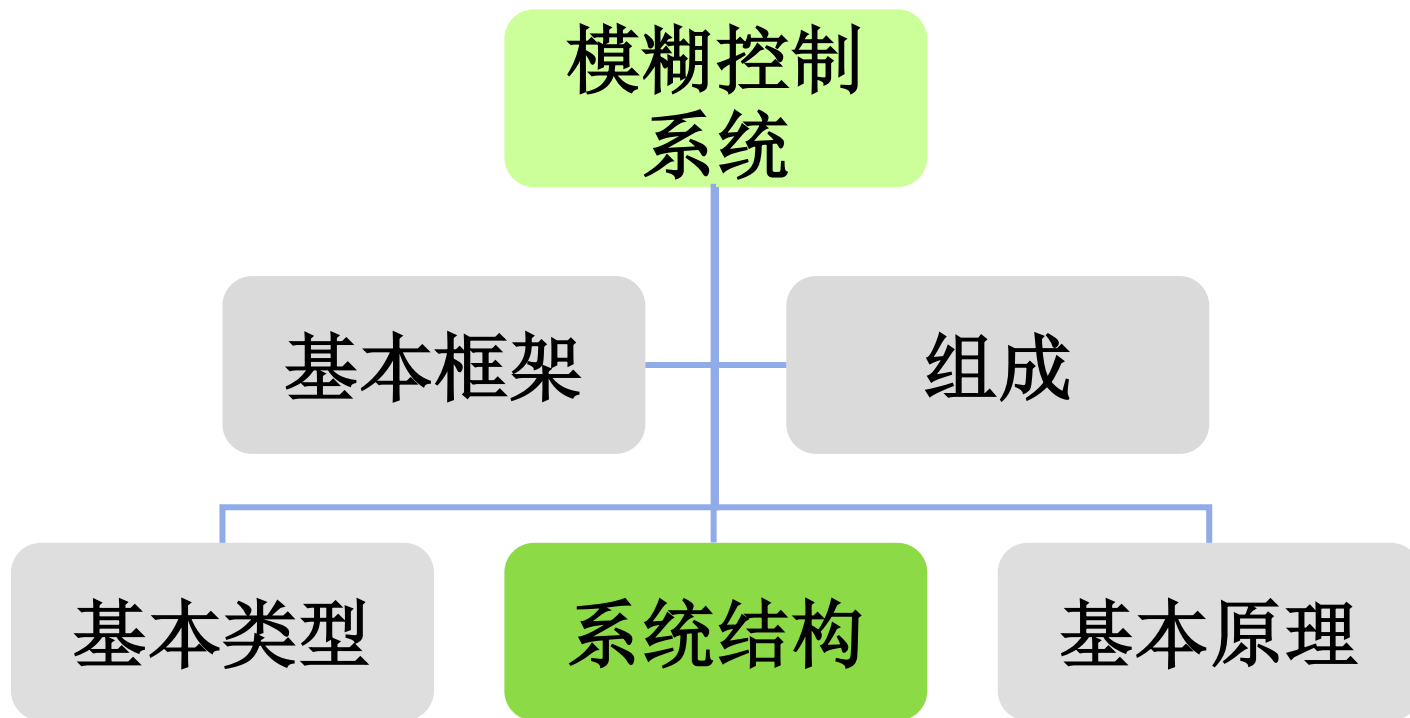
如采用 “ $\vee - \wedge$ ”（Max-Min）推理方法，有：

$$\omega_j = A_1^j(z_1) \wedge A_2^j(z_2) \wedge \dots \wedge A_p^j(z_p)$$

如采用 “ $\oplus - \bullet$ ”（Sum-Product）推理方法，有：

$$\omega_j = A_1^j(z_1) \cdot A_2^j(z_2) \cdot \dots \cdot A_p^j(z_p)$$

模糊控制系统



3 模糊控制系统结构

结构设计——确定模糊控制器的输入变量和输出变量
单输入单输出系统的基本信息量有三：

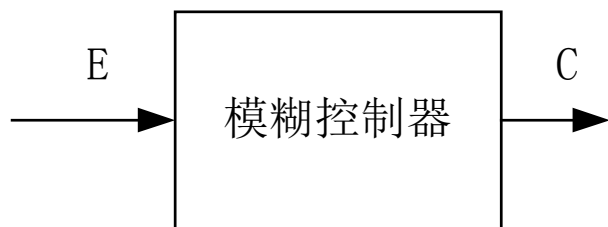
(1)误差

(2)误差的变化

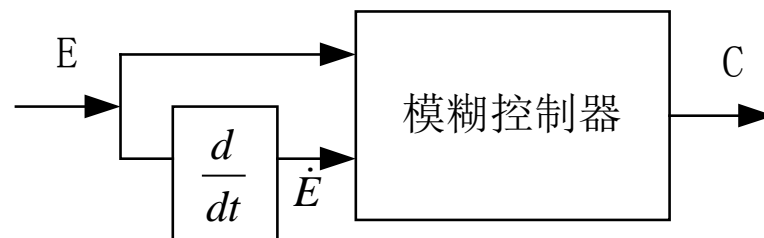
(3)误差变化的速率

模糊控制器的控制规则来源于操作经验和知识，输入变量常选择*误差、误差的变化及误差变化的变化*，而输出变量选择*控制量的变化*。

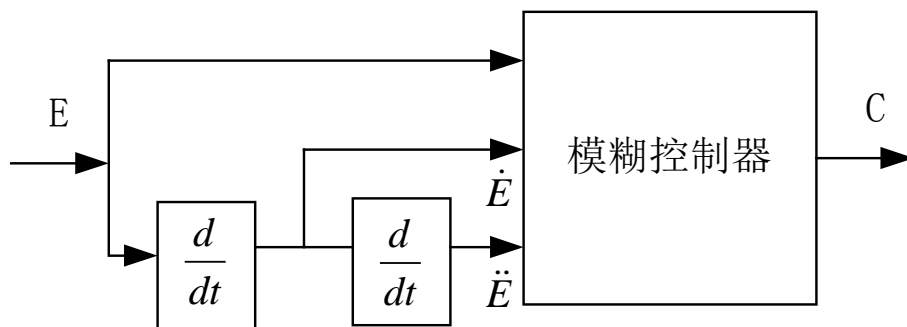
3 模糊控制系统结构 (2)



(1)一维模糊控制器



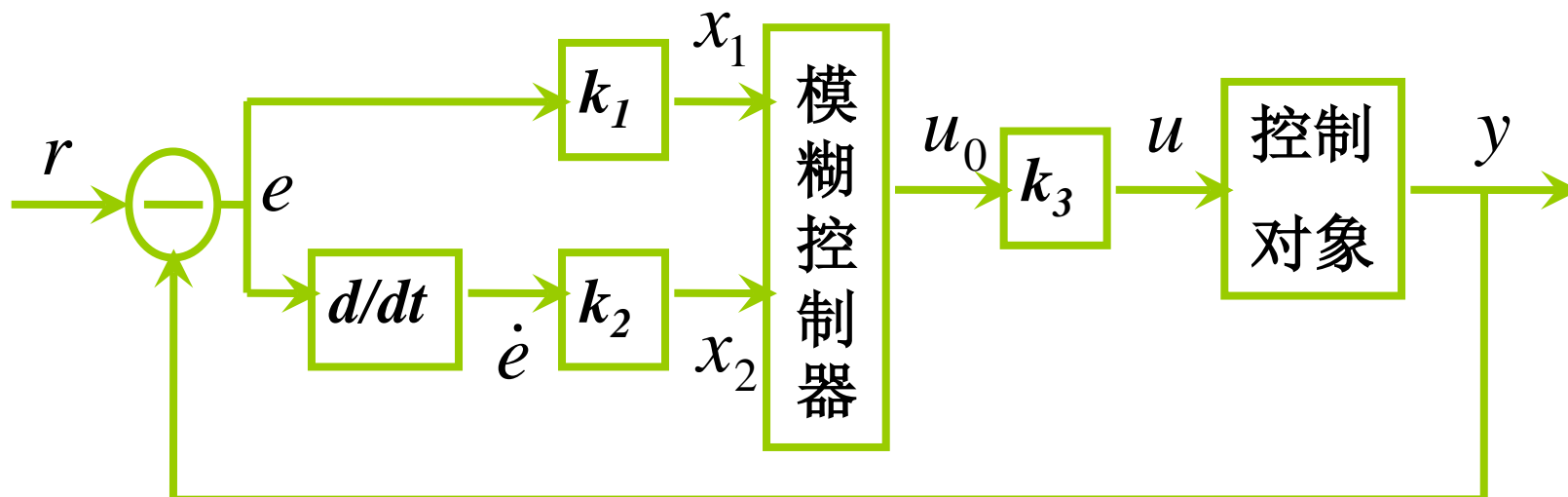
(2)二维模糊控制器



(3)三维模糊控制器

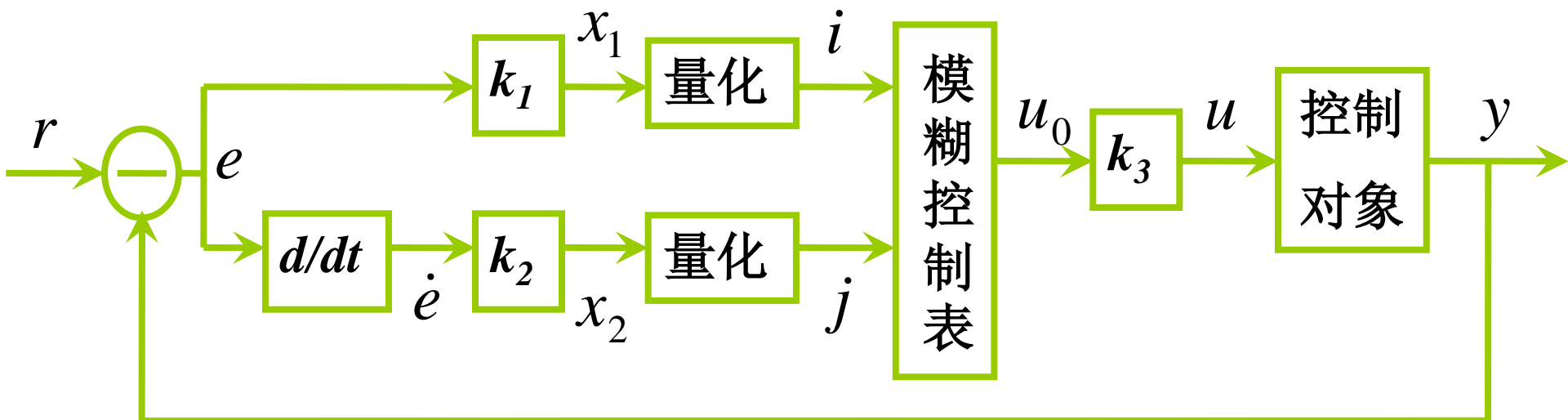
三种常用的模糊控制器

3 模糊控制系统结构 (3)



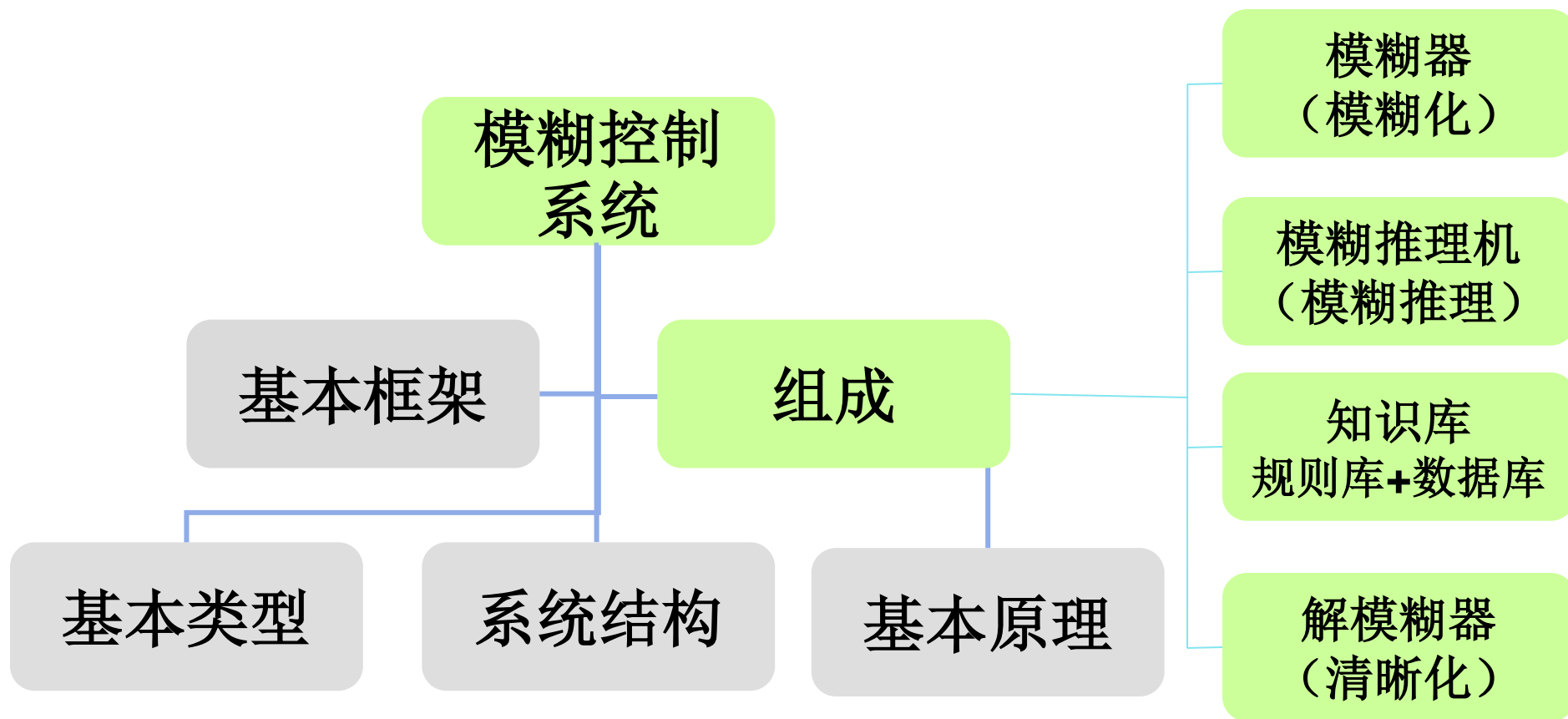
论域为连续时的模糊控制系统结构

3 模糊控制系统结构 (4)

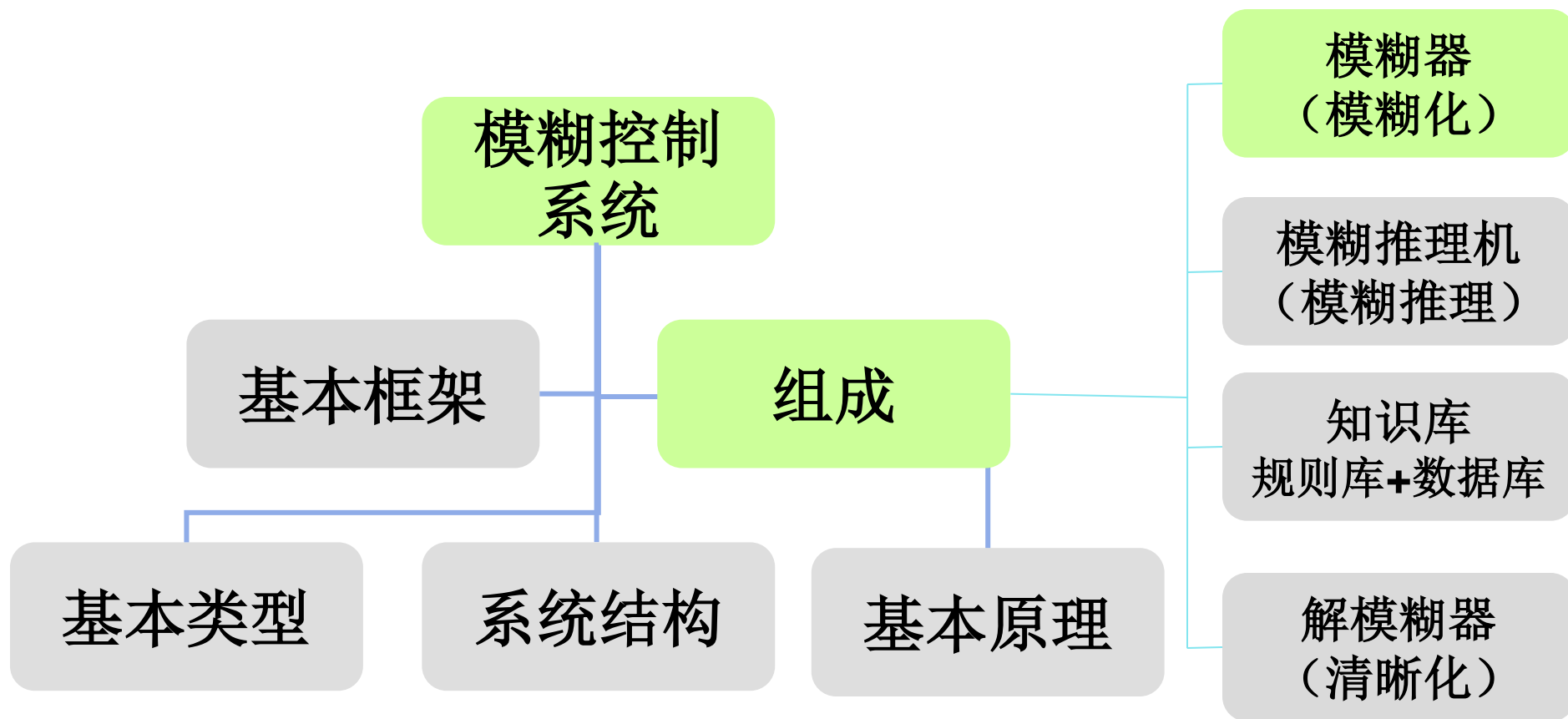


论域为离散时的模糊控制系统结构

模糊控制系统



模糊控制系统



4 模糊控制系统组成--模糊器（模糊化）

模糊器（模糊化）

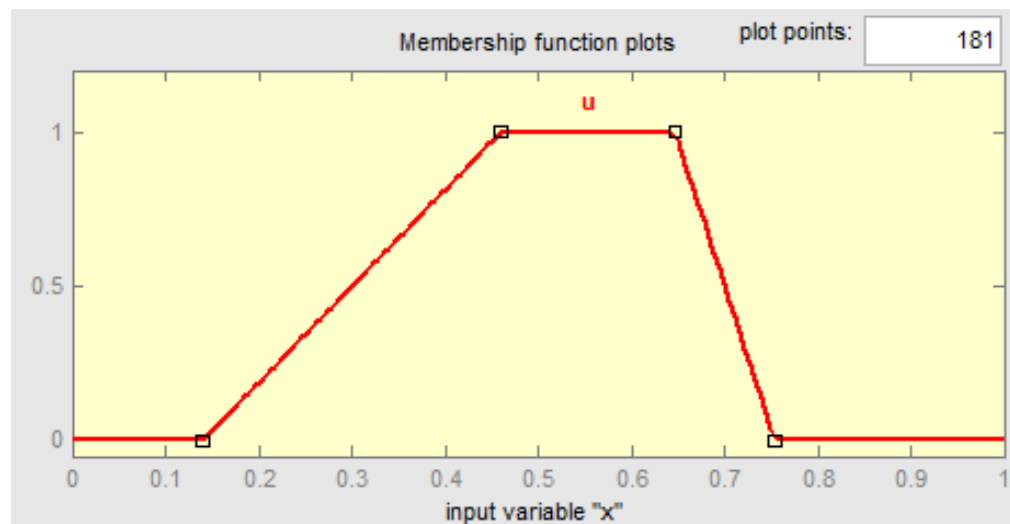
——将输入的精确量转化为模糊量

- 对输入量进行处理变成模糊控制器要求的输入量,如计算输入与输出之间的误差和误差的导数.
- 对处理过的输入量进行尺度变换,使其符合论域范围.
- 进行模糊处理,使精确的输入量变成模糊量.

4.1.1 模糊控制器——模糊器-分类

I 型模糊集合：模糊隶属度函数 μ_A 形式

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \mu_A^L(x), & a_1 \leq x \leq a_2; \\ \omega_A, & a_2 \leq x \leq a_3; \\ \mu_A^R(x), & a_3 \leq x \leq a_4; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$



其中, μ_A^L 是连续函数, 并且在 $[a_1, a_2]$ 上严格递增;
 μ_A^R 是连续函数, 并且在 $[a_3, a_4]$ 上严格递减;

$$\omega_A \in [0, 1]$$

4.1.1 模糊控制器——模糊器-分类

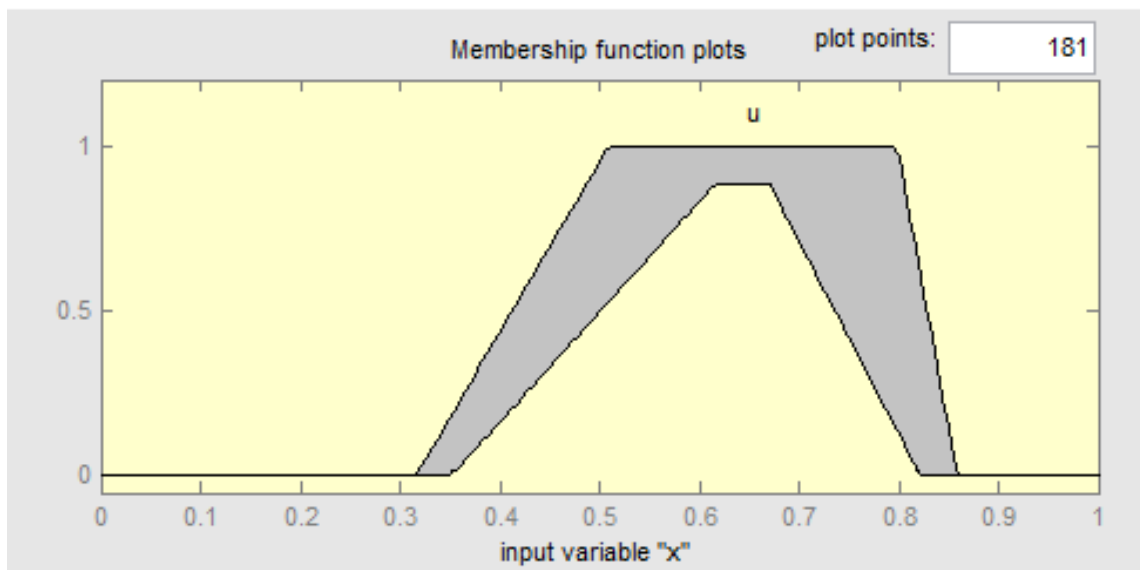
II型模糊集合：

将传统模糊集合扩展开来，进一步给出集合中隶属度值的模糊程度

模糊隶属度函数 μ_A 形式 $\tilde{A} = (A^L, A^R)$

其中， A^L, A^R 是 I 型模糊集合；

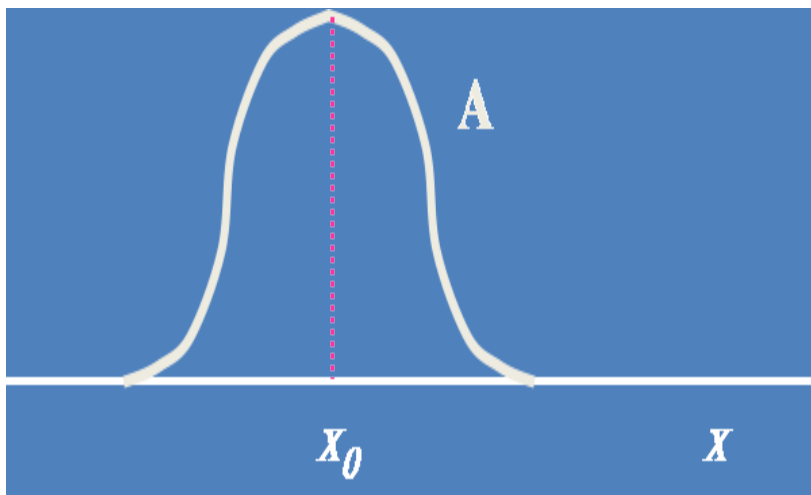
若 $A^L = A^R = A$ ，则 \tilde{A} 即为 I 型模糊集合。



4.1.2 模糊控制器组成--模糊器（模糊化）

- ① 高斯模糊器：将 $x \in U$ 映射到 U 上的模糊集合 A ，该集合具有高斯隶属函数。

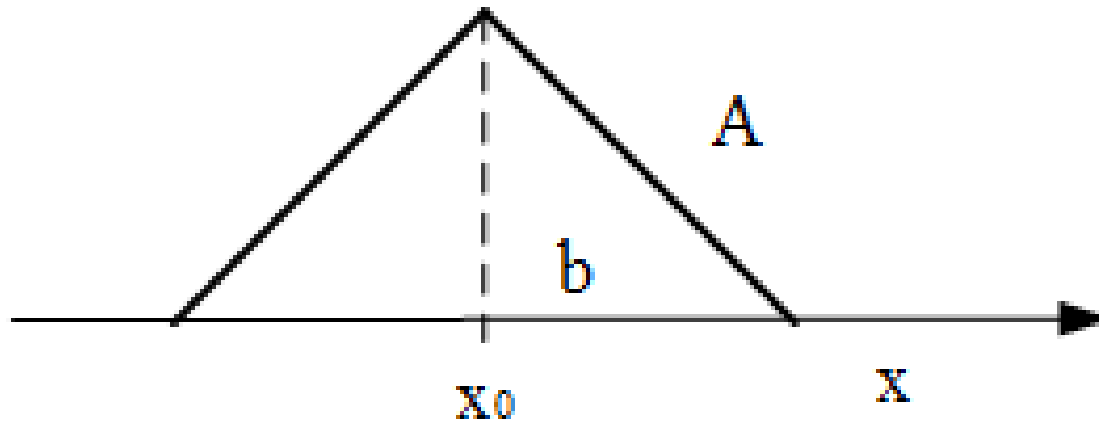
$$\mu_A(x) = \exp\left[-\left(\frac{x - x_0}{\sigma}\right)^2\right]$$



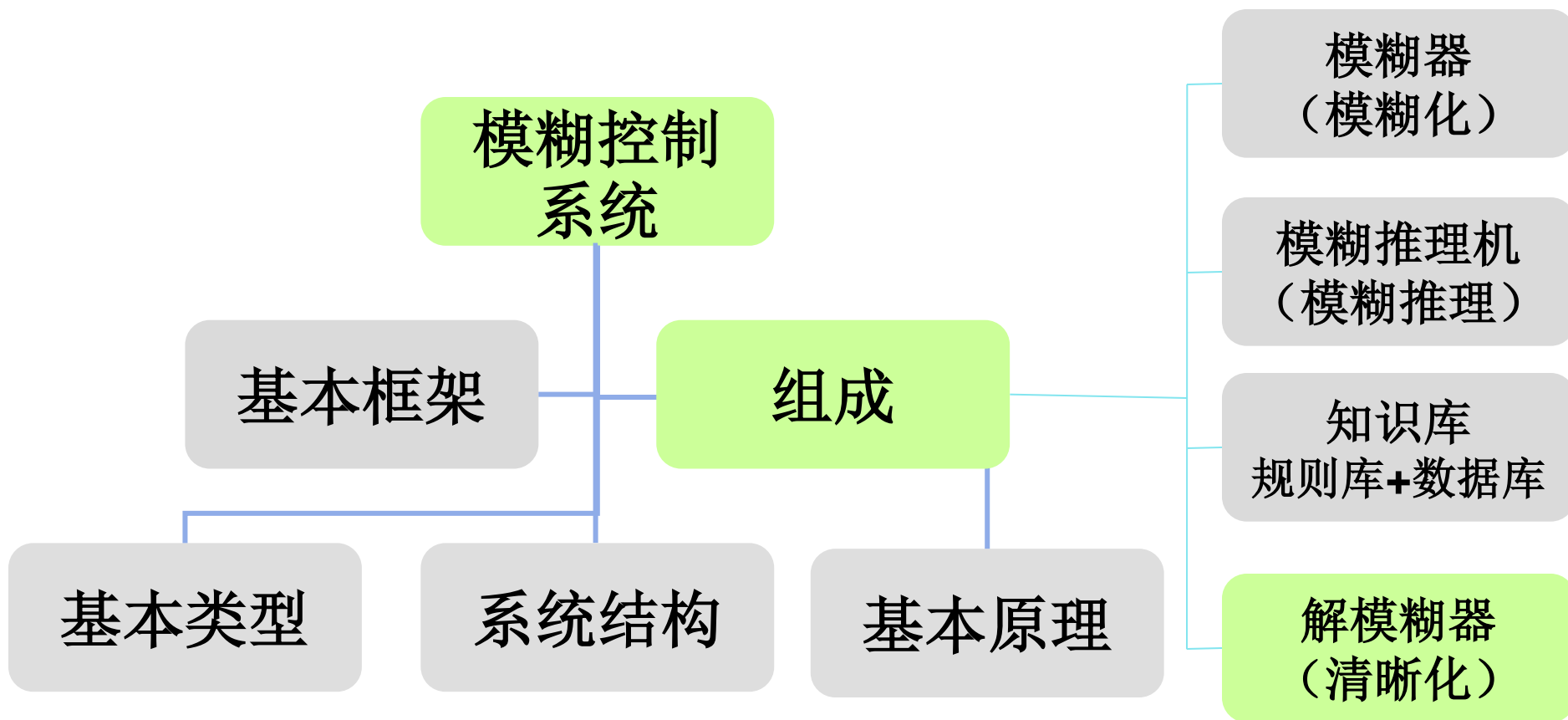
4.1.2 模糊控制器组成--模糊器（模糊化） (2)

- ② 三角形模糊器：将 $x \in U$ 映射到 U 上的模糊集合 A ，该集合具有三角形隶属函数。

$$\mu_A(x) = \begin{cases} (1 - \frac{|x - x_0|}{b}) & \text{if } |x - x_0| < b \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$



模糊控制系统



4.2 模糊控制器组成--解模糊器（清晰化）

解模糊器（清晰化）

将模糊推理得到的控制量（模糊量）变换为实际用于控制的清晰量。

- a) 将模糊的控制量变换成表示在论域范围的清晰量。
- b) 将表示在论域范围的清晰量经尺度变换成实际控制量。

定义： $V \subset R$ 上的模糊集 B 向清晰点 $y^* \in V$ 的一种映射。

其任务是确定一个最能代表模糊集合 B 的 V 上的点。



4.2 模糊控制器组成--解模糊器（清晰化）(2)

I. 最大值解模糊器

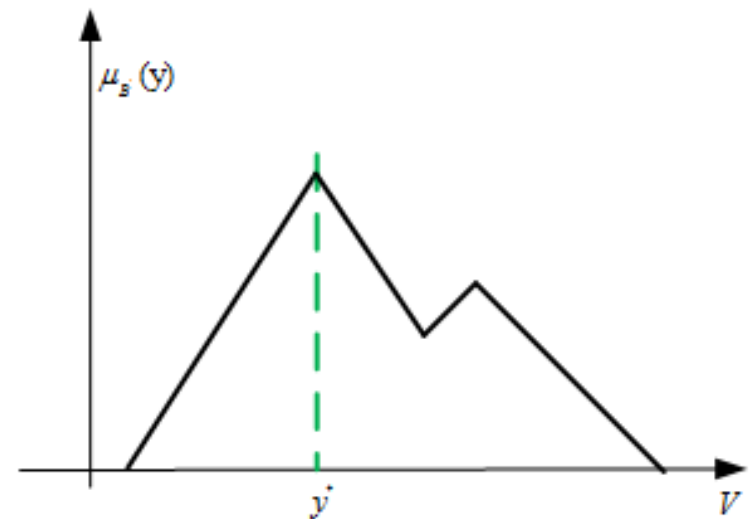
直接选择输出模糊子集的隶属度函数的峰值作为输出的确定值，即把 y^* 确定为 V 上的 $\mu_{B'}(y)$ 取得最大值的点，定义集合：

$$hgt(B') = \left\{ y \in V \mid \mu_{B'}(y) = \sup_{y \in V} \mu_{B'}(y) \right\}$$

注意：

- 若有多组相邻元素的隶属度值为最大，则可取它们的平均值；
- 若多个元素的隶属度值为最大，但并不相邻，则不宜采用取平均值的方法，需用其他方法

特点：直观，运算简便，但较粗糙



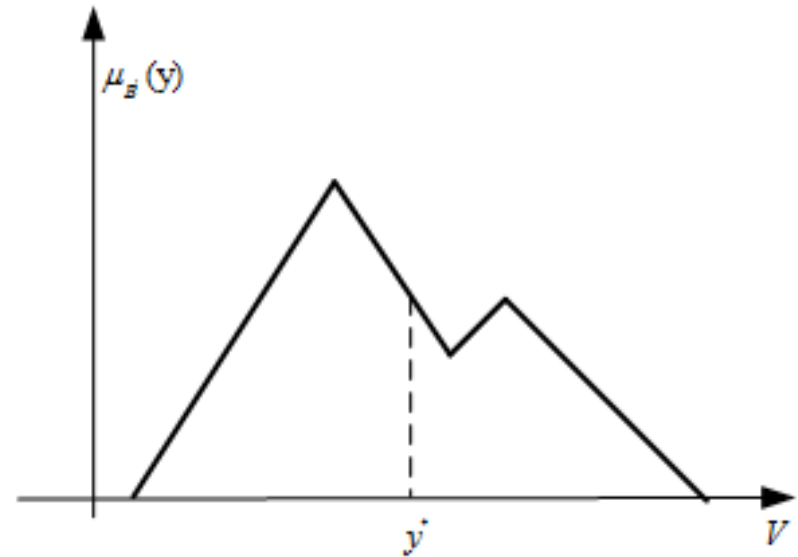
4.2 模糊控制器组成--解模糊器（清晰化）(3)

II. 重心解模糊器 (Centroid Technique)

重心解模糊器确定的 y^* 是 B' 的隶属度函数所涵盖区域的中心

$$y^* = \frac{\int_V y \mu_{B'}(y) dy}{\int_V \mu_{B'}(y) dy}$$

特点：左右两边面积相等，
包含了输出模糊子集所有
元素的信息，较准确



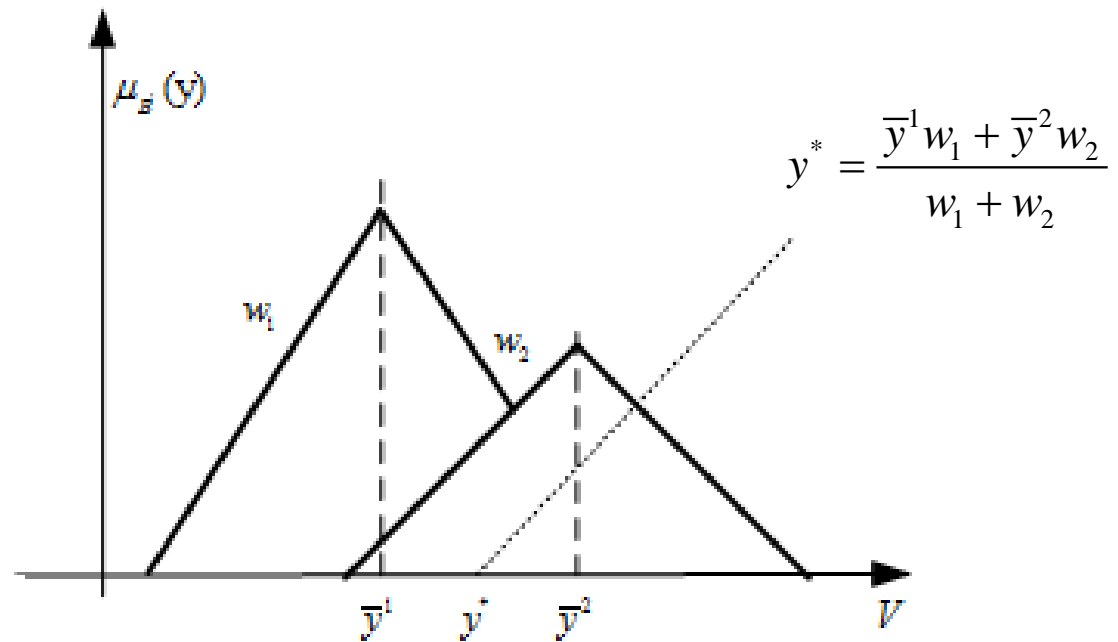
重心解模糊器示意图

4.2 模糊控制器组成--解模糊器（清晰化）（4）

III. 加权平均解模糊器

- 加权平均法较适合于输出模糊集的隶属度函数是对称的情况
- y^j 和 w_j 重分别表示各对称隶属度函数的质心和隶属度函数值

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l w_l}{\sum_{l=1}^M w_l}$$



特点：应用广泛

4.2 模糊控制器组成--解模糊器（清晰化）(5)

例：已知输出量 z_1 和 z_2 的模糊集合分别为

$$C_1 = \frac{0.1}{2} + \frac{0.4}{3} + \frac{0.7}{4} + \frac{1.0}{5} + \frac{0.7}{6} + \frac{0.3}{7}, \quad C_2 = \frac{0.3}{-4} + \frac{0.8}{-3} + \frac{1.0}{-2} + \frac{1.0}{-1} + \frac{0.8}{0} + \frac{0.3}{1} + \frac{0.1}{2}$$

求相应的清晰量 z_{10} 和 z_{20} ？

解：根据最大值法可得：

$$z_{10} = 5$$

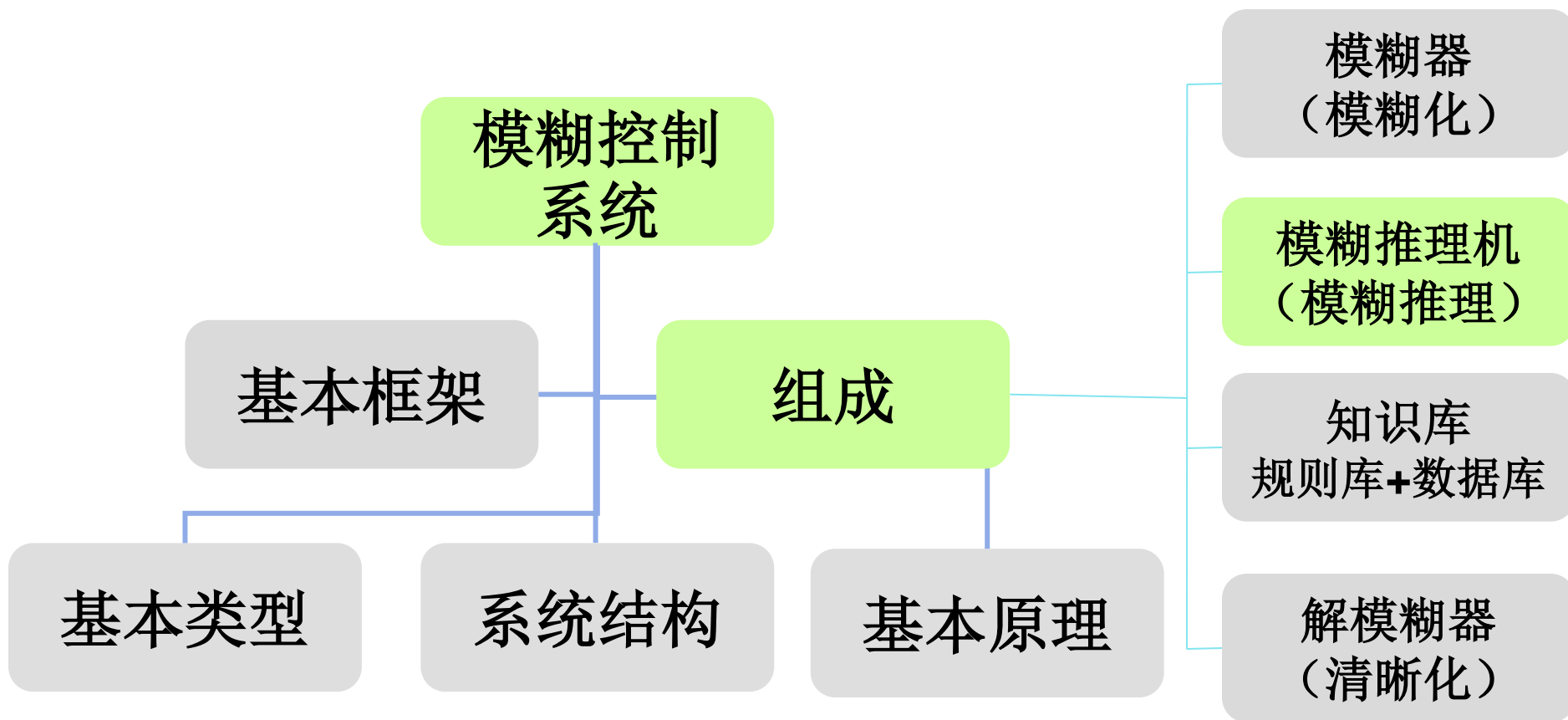
$$z_{20} = \frac{-2-1}{2} = -1.5$$

根据加权平均法：

$$z_{10} = \frac{0.1 \times 2 + 0.4 \times 3 + 0.7 \times 4 + 1 \times 5 + 0.7 \times 6 + 0.3 \times 7}{0.1 + 0.4 + 0.7 + 1 + 0.7 + 0.3} = 4.84$$

$$z_{20} = \frac{0.3 \times (-4) + 0.8 \times (-3) + 1 \times (-2) + 1 \times (-1) + 0.8 \times 0 + 0.3 \times 1 + 0.1 \times 2}{0.3 + 0.8 + 1 + 1 + 0.8 + 0.3 + 0.1} = -1.42$$

模糊控制系统



4.3 模糊控制器组成--模糊推理

- 模糊控制器的核心
- 基于模糊逻辑中的蕴含关系及推理规则
- 具有模拟人的基本模糊概念的推理能力
- 主要方法

MIN-MAX-重心法

代数积-加法-重心法

关系合成推理法

- MIN-MAX-重心法

考虑以下模糊推理形式：

规则1： $A_1 \text{ and } B_1 \Rightarrow C_1$

规则2： $A_2 \text{ and } B_2 \Rightarrow C_2$

.....

规则n： $A_n \text{ and } B_n \Rightarrow C_n$

前提： $x_0 \text{ and } y_0$

结论： C'



4.3 模糊控制器组成--模糊推理 MIN-MAX-重心法

由前提 “ x_0 and y_0 ” 及诸模糊规则

$$A_i \text{ and } B_i \Rightarrow C_i (i = 1, 2, \dots, n)$$

可得规则 i 推理结果 C'_i :

$$\mu_{C'_i}(z) = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0) \wedge \mu_{C_i}(z)$$

结论 C' : $\mu_{C'}(z) = \mu_{C'_1}(z) \vee \mu_{C'_2}(z) \vee \dots \vee \mu_{C'_n}(z)$

模糊集合 C' 的 “重心” 按下式计算 :

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{C'}(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^m \mu_{C'}(z_i)}$$

4.3 模糊控制器组成--模糊推理 MIN-MAX-重心法

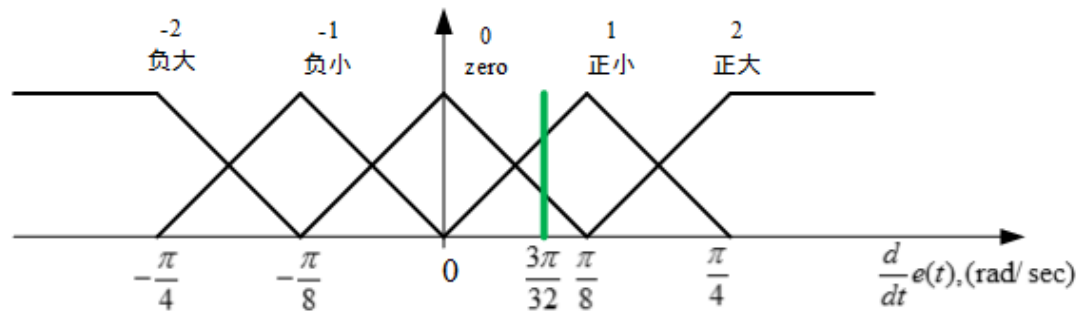
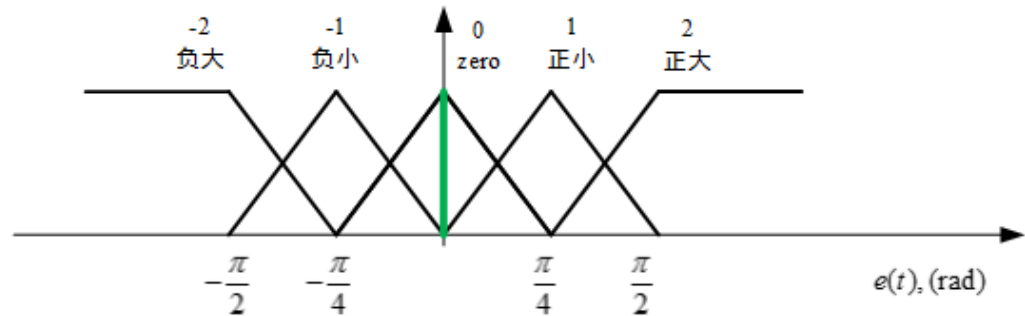
◆ MIN-MAX-重心法(MIN-MAX- Center of Gravity)

确定适用的模糊规则

误差为零

误差变化为零

误差变化为正小



模糊规则1： If 误差为零， 且误差变化为零， Then 控制力为零

模糊规则2： If 误差为零， 且误差变化为正小， Then 作用力为负小

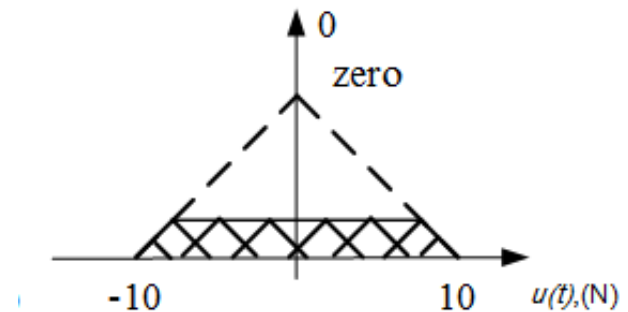


4.3 模糊控制器组成--模糊推理 MIN-MAX-重心法

◆ MIN-MAX-重心法(MIN-MAX- Center of Gravity)

模糊规则1： If 误差为零， 且误差变化为零，
Then 作用力为零

F		DE				
		-2	-1	0	1	2
E	-2	2	2	2	1	0
	-1	2	2	1	0	-1
	0	2	1	0	-1	-2
	1	1	0	-1	-2	-2
	2	0	-1	-2	-2	-2



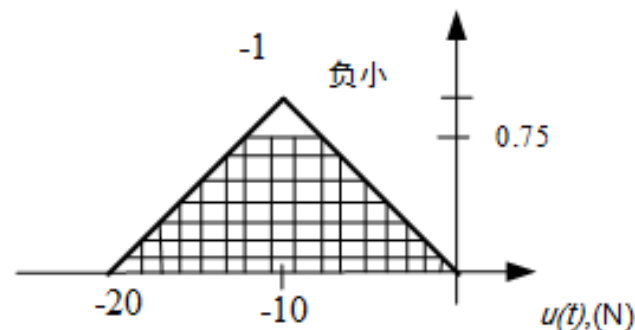


4.3 模糊控制器组成--模糊推理 MIN-MAX-重心法

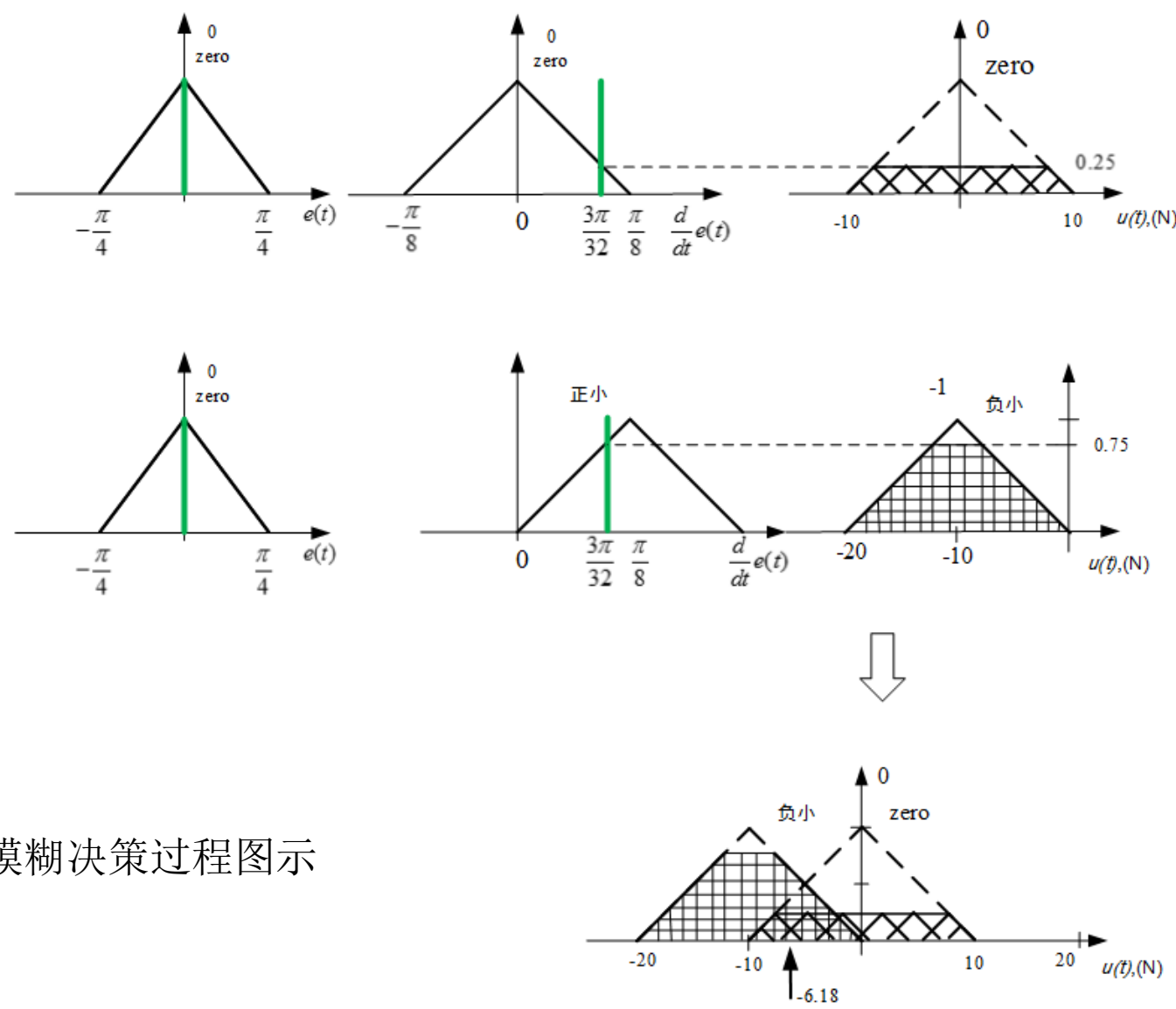
◆ MIN-MAX-重心法(MIN-MAX- Center of Gravity)

模糊规则2： If 误差为零， 且误差变化为正小，
Then 作用力为负小

F		DE				
		-2	-1	0	1	2
E	-2	2	2	2	1	0
	-1	2	2	1	0	-1
	0	2	1	0	-1	-2
	1	1	0	-1	-2	-2
	2	0	-1	-2	-2	-2



4.3模糊控制器组成--模糊推理图示



模糊决策过程图示

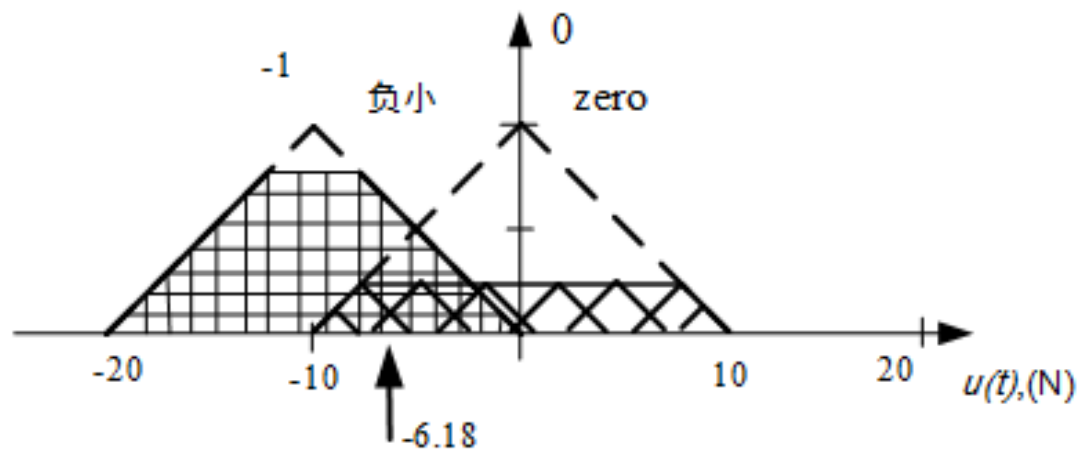


4.3 模糊控制器组成--模糊推理 MIN-MAX-重心法

◆ MIN-MAX-重心法(MIN-MAX- Center of Gravity)

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{C'}(z_i) z_i}{\sum_{i=1}^m \mu_{C'}(z_i)},$$

$$\text{或 } z_0 = \frac{\sum_i z_i \int \mu_i}{\sum_i \int \mu_i}$$



此处求得两个阴影梯形的面积，有

$$z_0 = \frac{(0)(4.375) + (-10)(9.375)}{4.375 + 9.375} = -6.18$$

- 代数积-加法-重心法

推理结果 C'_i 采用代数积:

$$\mu_{C'_i}(z) = \mu_{A_i}(x_0) \cdot \mu_{B_i}(y_0) \cdot \mu_{C_i}(z)$$

综合结果采用加法, 得

$$\mu_{C'}(z) = \mu_{C'_1}(z) + \mu_{C'_2}(z) + \cdots + \mu_{C'_n}(z)$$

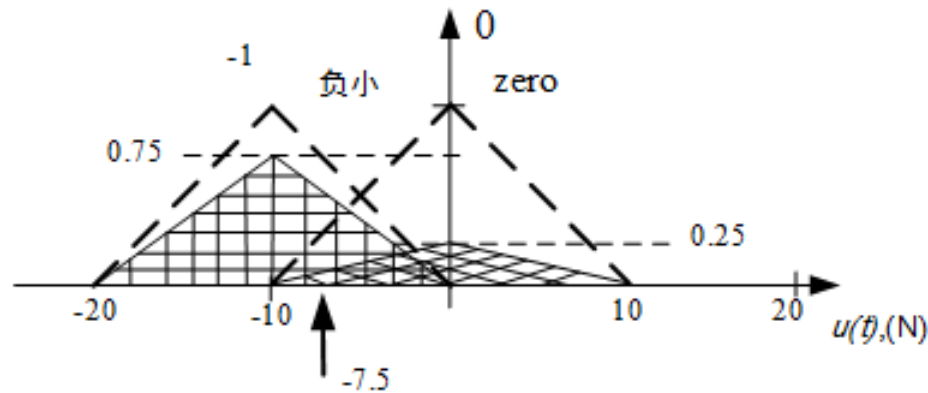
模糊集合 C' 的“重心”由下式确定

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{C'}(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^m \mu_{C'}(z_i)}$$



4.3 模糊控制器组成--模糊推理 代数积-加法-重心法

◆ 模糊推理——代数积-加法-重心法



$$z_0 = \frac{(0)(2.5) + (-10)(7.5)}{2.5 + 7.5} = -7.5$$

- 关系合成推理法

先求出模糊关系 R ，再根据输入求取控制量，将控制量清晰化，最终导出模糊控制表（查询表）。

设有 k 条模糊控制规则：

$$IF \ A_i \ and \ B_j \ THEN \ C_{ij}$$

其中， $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$.

每条模糊规则对应的模糊关系为

$$R_1 = A_1 \times B_1 \times C_{11}$$

$$R_2 = A_1 \times B_2 \times C_{12}$$

.....

$$R_k = A_m \times B_n \times C_{mn}$$

总模糊关系 R 为

$$R = \bigcup_{ij} A_i \times B_j \times C_{ij} = \bigcup_{s=1}^k R_s$$

若 A_i ($i=1, 2, \dots, m$) 对应的量化后论域 X 为

$$\{-p, -p+1, \dots, 0, \dots, p-1, p\}$$

则对输入值 a^* ，量化后的值必为该论域中的元素，也就是说， a^* 量化后对应的模糊量 X_i 为以下 $2p+1$ 个模糊量中的一个：

$$X_1 = \frac{1}{-p} + \frac{0}{-p+1} + \dots + \frac{0}{0} + \dots + \frac{0}{p-1} + \frac{0}{p}$$

$$X_2 = \frac{0}{-p} + \frac{1}{-p+1} + \dots + \frac{0}{0} + \dots + \frac{0}{p-1} + \frac{0}{p}$$

.....

$$X_{2p} = \frac{0}{-p} + \frac{0}{-p+1} + \dots + \frac{0}{0} + \dots + \frac{1}{p-1} + \frac{0}{p}$$

$$X_{2p+1} = \frac{0}{-p} + \frac{0}{-p+1} + \dots + \frac{0}{0} + \dots + \frac{0}{p-1} + \frac{1}{p}$$

论域映射，
作用类归一化

同样，设 B_j ($j=1, 2, \dots, n$) 对应的量化后论域 Y 为

$$\{-q, -q+1, \dots, 0, \dots, q-1, q\}$$

那么，对于输入值 b^* ，在经过量化后，它必定为该论域中的某个元素。因此 b^* 量化后所对应的模糊量 Y_j 可以简化为以下 $2q+1$ 个模糊量中之一。

$$\begin{aligned} Y_1 &= \frac{1}{-q} + \frac{0}{-q+1} + \dots + \frac{0}{0} + \dots + \frac{0}{q-1} + \frac{0}{q} \\ Y_2 &= \frac{0}{-q} + \frac{1}{-q+1} + \dots + \frac{0}{0} + \dots + \frac{0}{q-1} + \frac{0}{q} \\ &\dots\dots\dots \\ Y_{2q} &= \frac{0}{-q} + \frac{0}{-q+1} + \dots + \frac{0}{0} + \dots + \frac{1}{q-1} + \frac{0}{q} \\ Y_{2q+1} &= \frac{0}{-q} + \frac{0}{-q+1} + \dots + \frac{0}{0} + \dots + \frac{0}{q-1} + \frac{1}{q} \end{aligned}$$

再设 C_{ij} 对应的量化后论域 Z 为

$$\{-r, -r+1, \dots, 0, \dots, r-1, r\}$$

那么，由模糊关系 R ，并根据输入值 a^* 和 b^* ，可以求出对应的模糊控制量 C_{ij} ，即

$$C_{ij} = (A_i \times B_j) \circ R$$

在求出了模糊控制量 C_{ij} 之后，若以最大隶属度法进行清晰化处理，可以获得 C_{ij} 对应论域中的隶属度最大的元素。这个元素就是控制量的清晰值。

将输入变量的量化后论域的所有组合作为输入，依次求出全部相应的控制量清晰值，共 $(2p+1) \times (2q+1)$ 组。以 A_i 的论域 X 为列，以 B_j 的论域 Y 为行，以对应的控制量清晰值为交点，则可以得到模糊控制表，即查询表。

4.3模糊控制器组成--模糊推理查表法图示

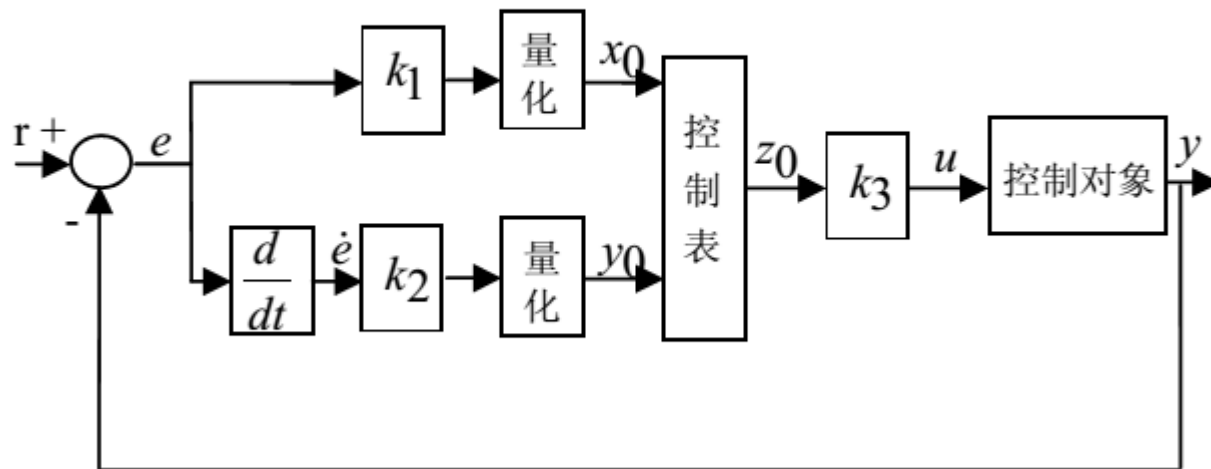
A	C	B												
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6		-9	-9	-9	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
-5		-9	-9	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1
-4		-9	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2
-3		-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
-2		-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-1		-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
0		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
1		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
2		-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
3		-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4		-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9
5		-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9	9
6		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9	9	9

MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

MATLAB 教程例

MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

例2 通过查表法设计PID控制器



论域为离散时的模糊控制系统结构

MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

通过查表法设计PID控制器

语言变量x的隶属度函数

<div>隶属度 模糊集合</div> <div>x</div>	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
NB	1.0	0.8	0.7	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NS	0.0	0.1	0.3	0.7	1.0	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NZ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.6	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PZ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
PS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.3	0.1	0.0
PM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.3
PB	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.7	0.8	1.0

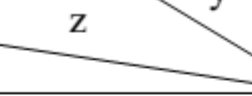
通过查表法设计PID控制器

语言变量y、z的隶属度函数

[illegible]

通过查表法设计PID控制器

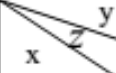
模糊控制规则

	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	ZE	ZE
NM	NB	NB	NB	NB	NM	ZE	ZE
NS	NM	NM	NM	NM	ZE	PS	PS
NZ	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PZ	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZE	PM	PM	PM	PM
PM	ZE	ZE	PM	PB	PB	PB	PB
PB	ZE	ZE	PM	PB	PB	PB	PB

MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

通过查表法设计PID控制器

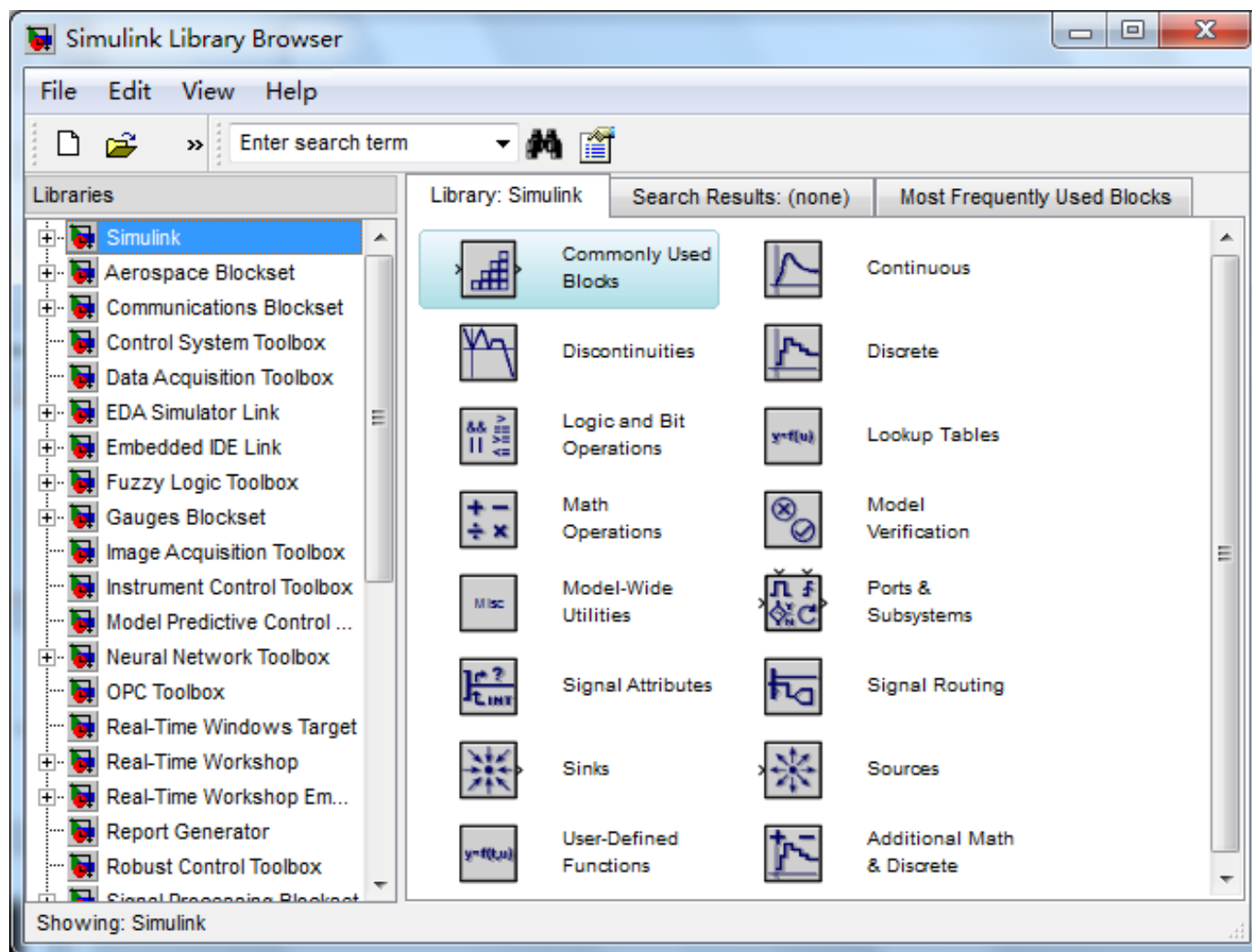
完整的模糊控制表

	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-5.35	-5.24	-5.35	-5.24	-5.35	-5.24	-4.69	-4.26	-2.71	-2	-1.29	0	0
-5	-5	-4.95	-5	-4.95	-5	-4.95	-3.86	-3.71	-2.36	-1.79	-1.12	0.24	0.23
-4	-4.69	-4.52	-4.69	-4.52	-4.69	-4.52	-3.05	-2.93	-1.94	-1.42	-0.69	0.64	0.58
-3	-4.26	-4.26	-4.26	-4.26	-4.26	-4.26	-2.93	-2.29	-1.42	-0.94	-0.25	1	1
-2	-4	-4	-3.78	-3.76	-3.47	-3.42	-2.43	-1.79	-0.44	-0.04	0.16	1.6	1.63
-1	-4	-4	-3.36	-3.08	-2.47	-2.12	-1.5	-1.05	0.26	1.91	2.33	2.92	2.92
0	-3.59	-3.55	-2.93	-2.6	-0.96	-0.51	0	0.51	0.96	2.6	2.93	3.55	3.59
1	-2.92	-2.92	-2.33	-1.91	-0.26	1.05	1.5	2.12	2.47	3.08	3.36	4	4
2	-1.81	-1.79	-0.57	-0.31	0.44	1.79	2.43	3.42	3.47	3.76	3.78	4	4
3	-1	-1	0.25	0.94	1.42	2.29	2.93	4.26	4.26	4.26	4.26	4.26	4.26
4	-0.58	-0.64	0.69	1.42	1.94	2.93	3.05	4.52	4.69	4.52	4.69	4.52	4.69
5	-0.23	-0.24	1.12	1.79	2.36	3.71	3.86	4.95	5	4.95	5	4.95	5
6	0	0	1.29	2	2.71	4.26	4.69	5.24	5.35	5.24	5.35	5.24	5.35

(采用Mamdani模糊推理法，节点采用重心法进行反模糊化)

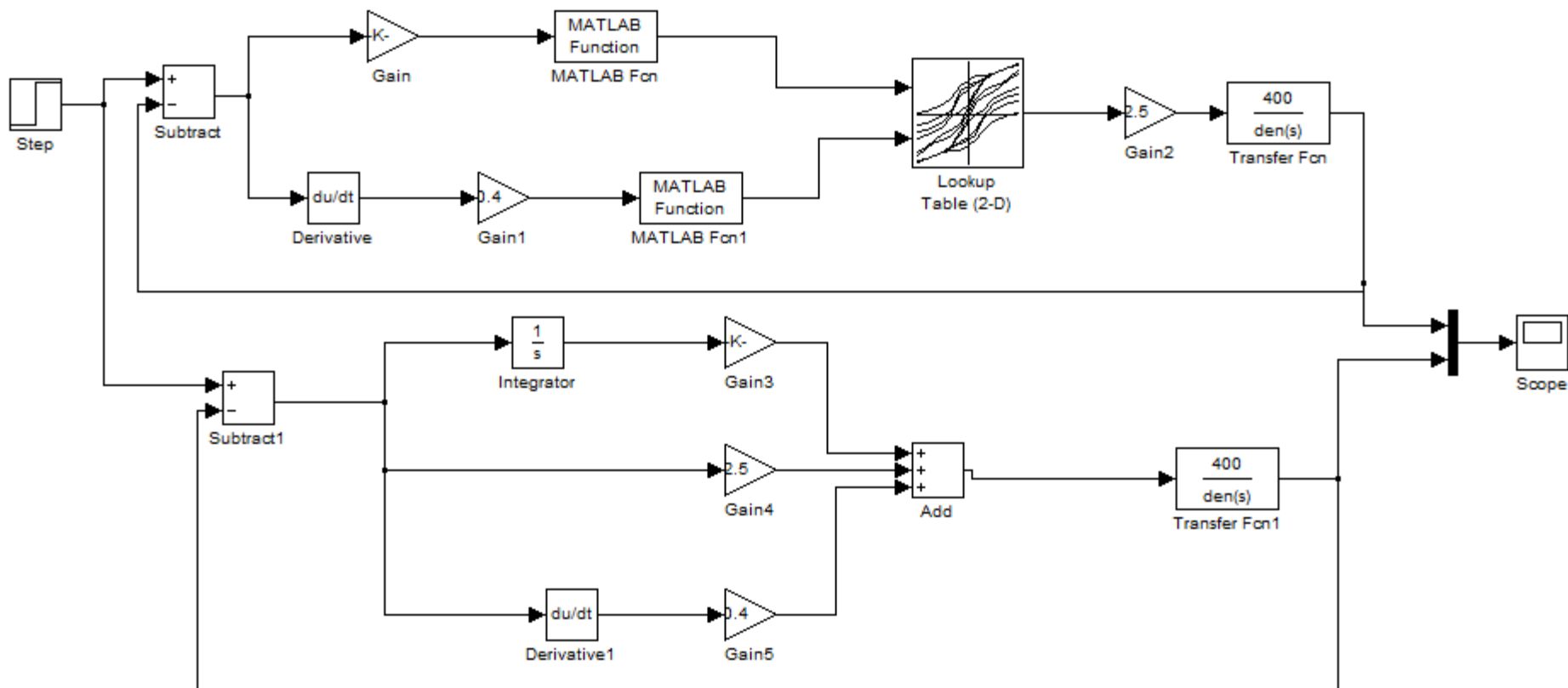
MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

在command窗口中输入simulink，弹出对话框，并新建模型



MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

在新建模型中绘制如下控制图，可以通过搜索功能快速查找元件



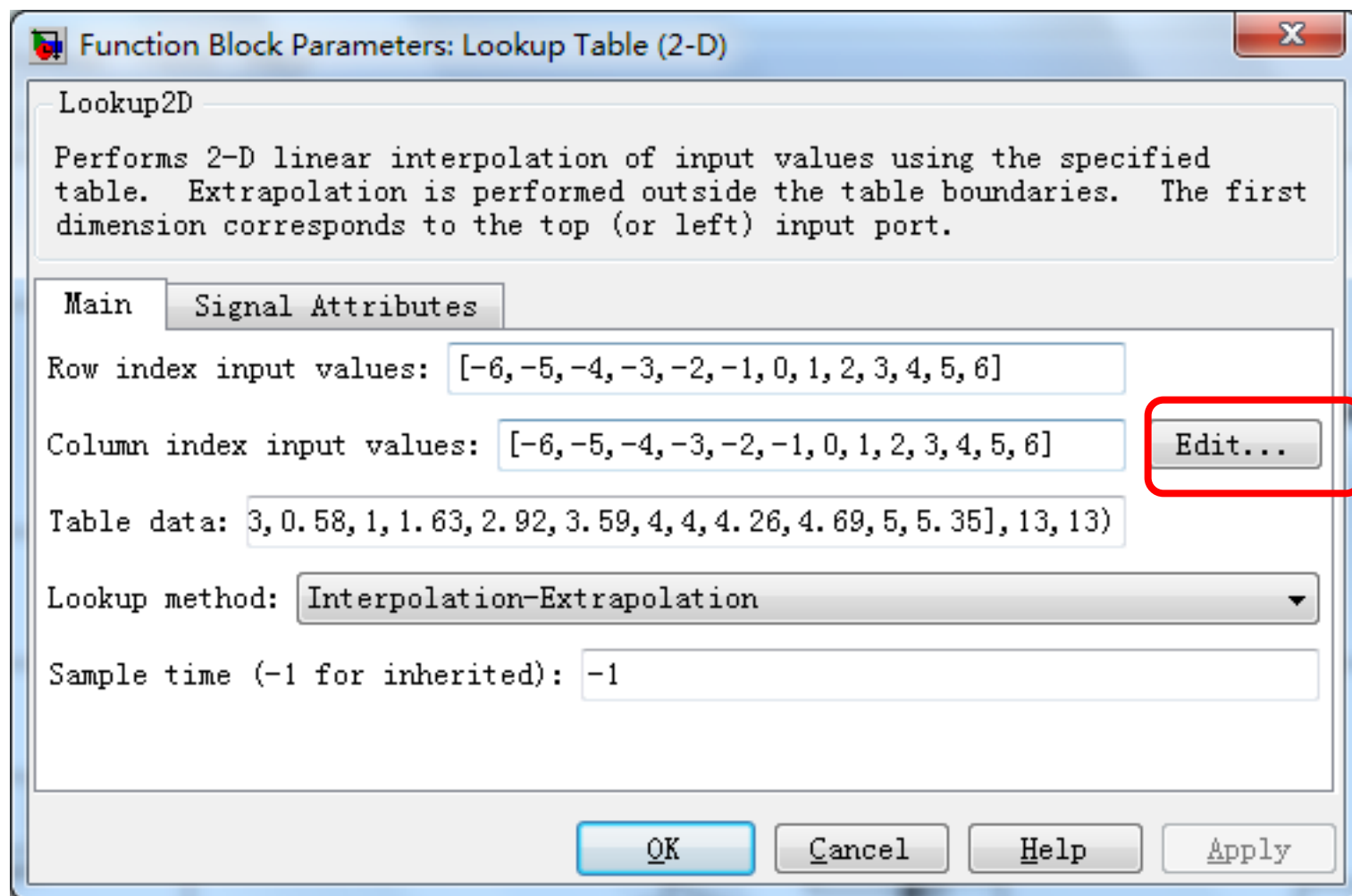
Simulink仿真

MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

- 元件参数设置：Gain: 1.523 , Gain1: 0.4
Gain2: 2.5 , Gain3: 1.523
Gain4:2.5 , Gain5: 0.4
- Matlab Fcn取round函数，实现四舍五入功能，即完成对输入量的模糊化；
- 将模糊化后的数据输入到Lookup Table中进行查询，即完成模糊推理过程；
- 在将查询得到的数值经过比例变换就变成了我们需要的实际控制量。

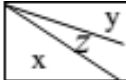
MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

双击Lookup Table进行参数设置：



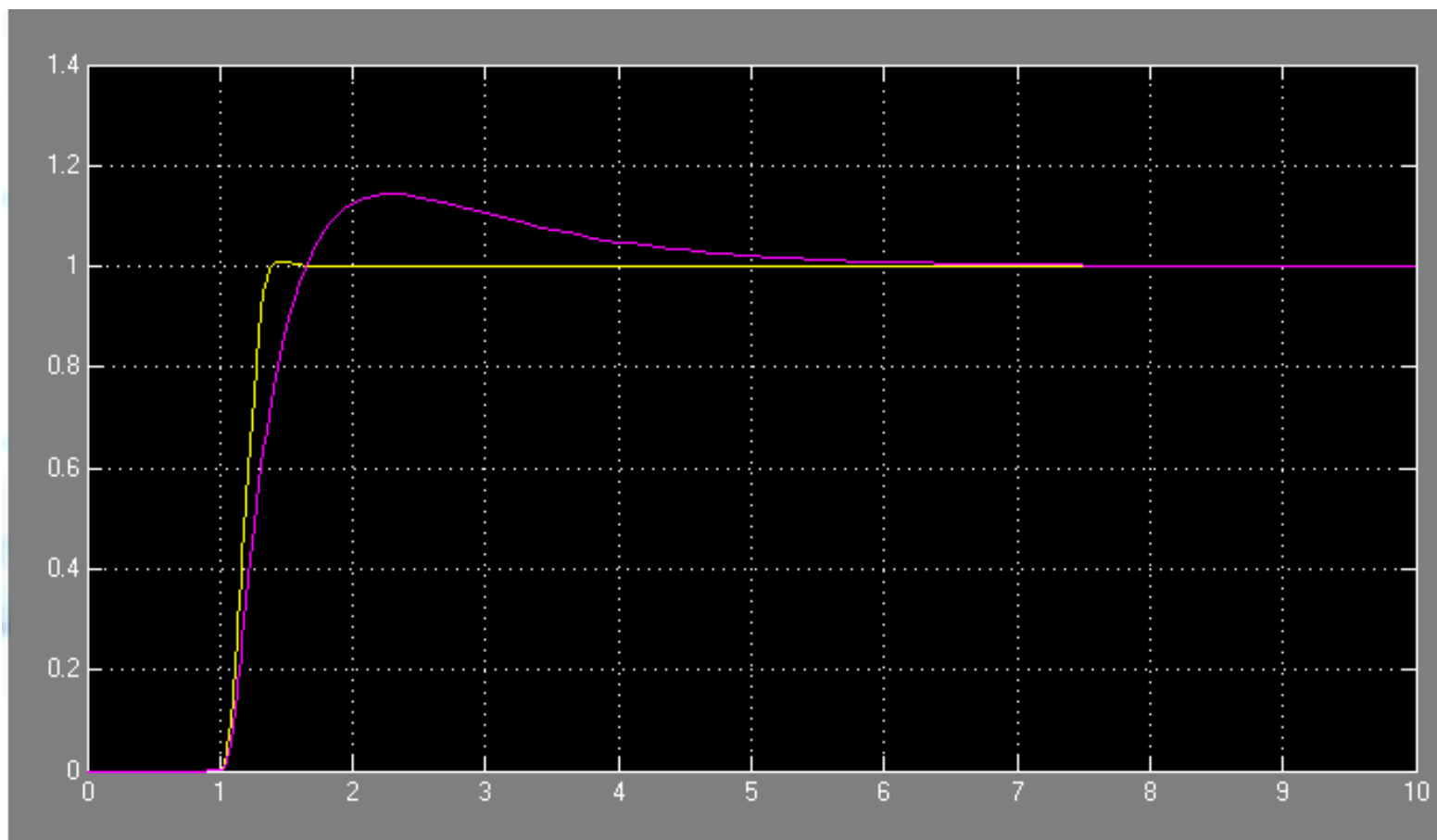
MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

双击Lookup Table进行参数设置，如下表：

	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-5.35	-5.24	-5.35	-5.24	-5.35	-5.24	-4.69	-4.26	-2.71	-2	-1.29	0	0
-5	-5	-4.95	-5	-4.95	-5	-4.95	-3.86	-3.71	-2.36	-1.79	-1.12	0.24	0.23
-4	-4.69	-4.52	-4.69	-4.52	-4.69	-4.52	-3.05	-2.93	-1.94	-1.42	-0.69	0.64	0.58
-3	-4.26	-4.26	-4.26	-4.26	-4.26	-4.26	-2.93	-2.29	-1.42	-0.94	-0.25	1	1
-2	-4	-4	-3.78	-3.76	-3.47	-3.42	-2.43	-1.79	-0.44	-0.04	0.16	1.6	1.63
-1	-4	-4	-3.36	-3.08	-2.47	-2.12	-1.5	-1.05	0.26	1.91	2.33	2.92	2.92
0	-3.59	-3.55	-2.93	-2.6	-0.96	-0.51	0	0.51	0.96	2.6	2.93	3.55	3.59
1	-2.92	-2.92	-2.33	-1.91	-0.26	1.05	1.5	2.12	2.47	3.08	3.36	4	4
2	-1.81	-1.79	-0.57	-0.31	0.44	1.79	2.43	3.42	3.47	3.76	3.78	4	4
3	-1	-1	0.25	0.94	1.42	2.29	2.93	4.26	4.26	4.26	4.26	4.26	4.26
4	-0.58	-0.64	0.69	1.42	1.94	2.93	3.05	4.52	4.69	4.52	4.69	4.52	4.69
5	-0.23	-0.24	1.12	1.79	2.36	3.71	3.86	4.95	5	4.95	5	4.95	5
6	0	0	1.29	2	2.71	4.26	4.69	5.24	5.35	5.24	5.35	5.24	5.35

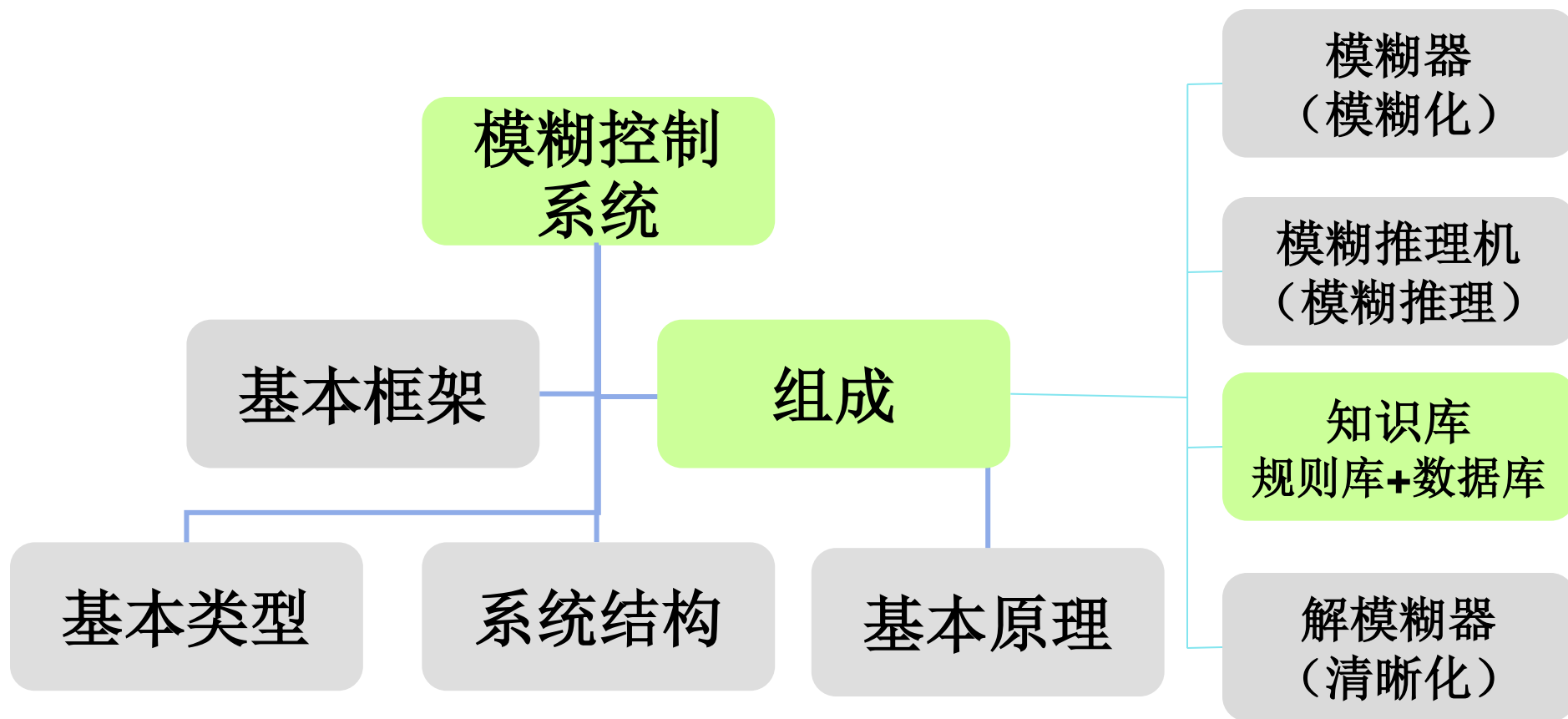
MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

运行后，可以在Scope中看到相同参数时，模糊控制与普通PID控制的输出曲线



模糊控制器输出（黄）与PID输出（红）

模糊控制系统



4.4 模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库）

知识库（数据库+规则库）

知识库由数据库和模糊控制规则库两部分组成：

- 数据库包括各语言变量的隶属度函数、尺度变换因子以及模糊空间的分级数等；
- 规则库包括用模糊语言变量表示的一系列控制规则，反映了控制专家的经验 and 知识。

4.4模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库） (2)

数据库

A 尺度变换参数

- 对实际输入量，首先需进行尺度变换，将其变换到要求的论域范围；
- 变换方法可是线性的，也可是非线性的；
- 若实际的输入量为 x' ，其变化范围为 $[x'_{\min}, x'_{\max}]$ ，若要求的论域为 $[x_{\min}, x_{\max}]$ ，则采用线性变换：

$$x = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} + k(x' - \frac{x'_{\max} + x'_{\min}}{2})$$

$$k = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{x'_{\max} - x'_{\min}}$$

4.4模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库） (3)

量化变换：

- 论域可以是连续的也可以是离散的
- 量化可以是均匀的，也可以是非均匀的

均匀量化

量化等级	-3	-2	-1	0	1	2	3
变化范围	$(-7, -5]$	$(-5, -3]$	$(-3, -1]$	$(-1, 1]$	$(1, 3]$	$(3, 5]$	$(5, 7]$

非均匀量化

量化等级	-3	-2	-1	0	1	2	3
变化范围	$(-7, -4]$	$(-4, -2]$	$(-2, -0.5]$	$(-0.5, 0.5]$	$(0.5, 2]$	$(2, 4]$	$(4, 7]$

4.4模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库） (4)

B 模糊空间分割

- 模糊控制规则中，前提的语言变量构成模糊输入空间，结论的语言变量构成模糊输出空间；
- 每个语言变量的取值为一组模糊语言名称，每个语言名称对应一个模糊集合；
- 对于每个语言变量，其取值的模糊集合都具有相同的论域；

4.4模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库） (5)

● 模糊空间分割要点

- 模糊分割需要确定每个语言变量取值的模糊语言名称的个数，其分割的大小决定模糊控制精细化的程度
- 模糊分割的个数决定了最大可能的模糊规则的个数。如对于两输入单输出的模糊系统，两输入语言变量的模糊分割数分别设为3和7，则最大可能的规则数为 $3 \times 7 = 21$
- 模糊分割数越多，控制规则也越多，所以模糊分割不可太细
- 模糊分割数太少将导致控制太粗略，难以对控制性能进行精细的调整
- 目前，仍主要依靠经验和试凑来决定分割数

4.4 模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库） (6)

分割区域语言名称通常具有一定的含义：

NB (Negative Big , 负大)

NM (Negative Medium , 负中)

NS (Negative Small , 负小)

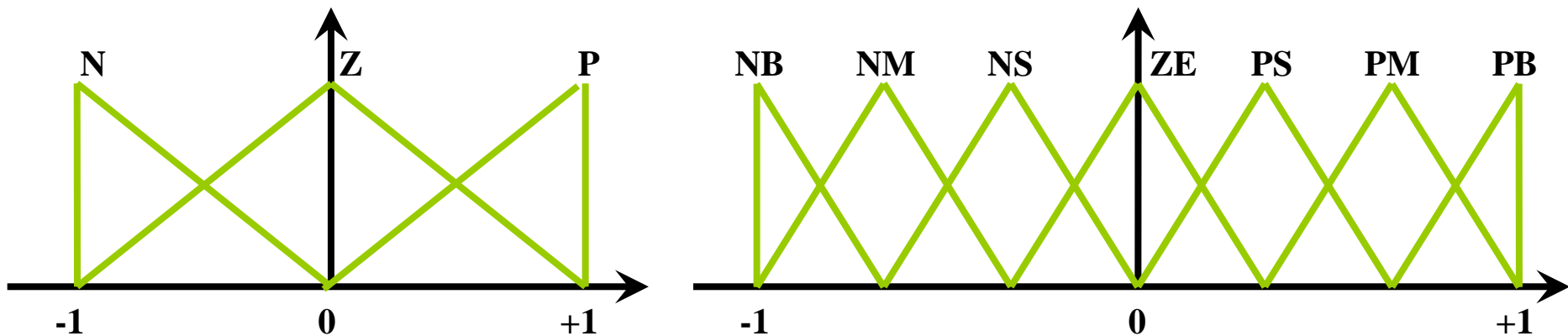
ZE (Zero , 零)

PS (Positive Small , 正小)

PM (Positive Medium , 正中)

PB (Positive Big , 正大)

或 N (Negative , 负) ; Z (Zero , 零) ; P (Positive , 正)



4.4模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库） (7)

C 模糊集合的隶属（度）函数选择

论域为离散、且元素个数为有限时，模糊集合的隶属度函数可用向量或表格的形式表示

元素 隶属度 模糊集合	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
NB	1.0	0.7	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.3	0.7	1.0	0.7	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.3	0.7	1.0	0.7	0.3	0	0	0	0	0	0
ZO	0	0	0	0	0.3	0.7	1.0	0.7	0.3	0	0	0	0
PS	0	0	0	0	0	0	0.3	0.7	1.0	0.7	0.3	0	0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.7	1.0	0.7	0.3
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.7	1.0

$$NS = \frac{0.3}{-4} + \frac{0.7}{-3} + \frac{1.0}{-2} + \frac{0.7}{-1} + \frac{0.3}{0}$$

4.4模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库） (8)

● 隶属度函数的选泽

- ✓对于论域为连续的情况，隶属度常常用函数的形式来描述，最常见的隶属度函数有铃形函数、三角形函数、梯形函数等
- ✓ 隶属度函数的形状对模糊控制器的性能有很大影响。当隶属度函数比较窄瘦时，控制较灵敏；反之，控制较粗略和平稳
- ✓ 通常当误差较小时，隶属度函数可取得较为窄瘦；误差较大时，隶属度函数可取得宽胖些

4.4模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库）

规则库 由一系列“IF-THEN”型的模糊条件句所构成，
条件句的前提为输入和状态，结论为控制变量

I. 模糊控制规则的前件和后件变量的选择

- ✓ 模糊控制规则的前件和后件变量
——模糊控制器的输入和输出的语言变量
- ✓ 输入和输出语言变量的选择对模糊控制器性能作用关键
- ✓ 输出量即控制量，较易确定
- ✓ 输入量选择及数量需据要求
- ✓ 输入量较常见的是误差及其导数，或加其积分

4.4 模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库）

II. 模糊控制规则的建立：模糊控制的核心

基于专家的经验和控制工程知识

- ✓ 基于语义方式而非数值，模糊控制规则——最自然的描述方式
- ✓ 人类专家经验，适当语言表述，形成模糊控制规则
- ✓ 从操作人员处获得特定应用领域模糊控制规则的原型

基于操作人员的实际控制过程数据

- ✓ 熟练操作人员使用IF-THEN模糊规则但未能用语言明确将表达
- ✓ 总结、记录操作员控制过程输入输出，获得模糊控制规则

基于过程的模糊模型

- ✓ 用语言描述控制对象动态特性，如TS模型
- ✓ 控制器和控制对象均采用模糊的方法来加以描述
- ✓ 理论方法

基于学习

- ✓ 根据经验和知识生成、修改模糊控制规则
- ✓ 根据已有数据或者环境变化调整控制规则

4.4 模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库）

III. 模糊控制规则的类型

状态评估模糊控制规则：大多数情况下都采用这种形式。

$R_1: IF\ x\ is\ A_1\ and\ y\ is\ B_1\ THEN\ z\ is\ C_1$

$R_2: IF\ x\ is\ A_2\ and\ y\ is\ B_2\ THEN\ z\ is\ C_2$

:

$R_n: IF\ x\ is\ A_n\ and\ y\ is\ B_n\ THEN\ z\ is\ C_n$

一般地，模糊控制规则的后件亦可为过程状态变量的函数，即：

$R_i: IF\ x\ is\ A_i\ and\ y\ is\ B_i\ THEN\ z=f_i(x, y)$

4.4模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库）

IV. 模糊控制规则的其他性能要求

- ✓ 完备性：如果对任意的 $x \in U$ ，在模糊规则库中至少存在一条规则满足 $\mu_{A'_i}(x_i) \neq 0$ ；
- ✓ 一致性：模糊IF - THEN规则集合中不存在“IF部分相同，THEN部分不同”的规则；
- ✓ 连续性：临近规则的THEN部分的模糊交集不为空集。

4.4模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库）

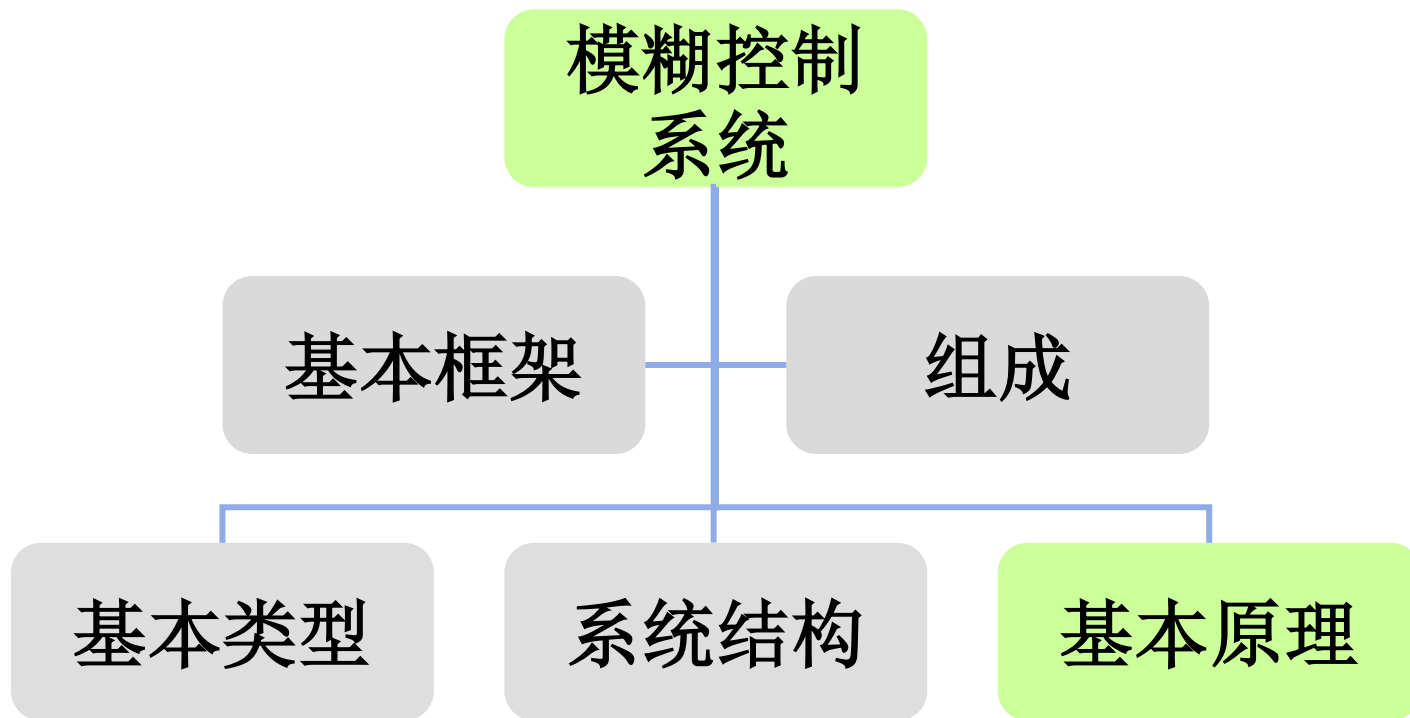
<div>y</div>		<div>x₂</div>		
		NB	ZO	PB
<div>x₁</div>	NB	NB	NS	ZO
	ZO	NS	ZO	PS
	PB	ZO	PS	PB

<div>y</div>		<div>x₂</div>				
		NB	NS	ZO	PS	PB
<div>x₁</div>	NB	NB	NB	NS	NS	ZO
	NS	NB	NS	NS	ZO	PS
	ZO	NS	NS	ZO	PS	PS
	PS	NS	ZO	PS	PS	PB
	PB	ZO	PS	PS	PB	PB

4.4 模糊控制器组成--知识库（数据库+规则库）

y		x ₂						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
x ₁	NB	NB	NB	NM	NS	NS	NS	ZO
	NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NS	NS	NS	ZO	PS	PS	PS
	PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
	PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
	PB	ZO	PS	PS	PS	PM	PB	PB

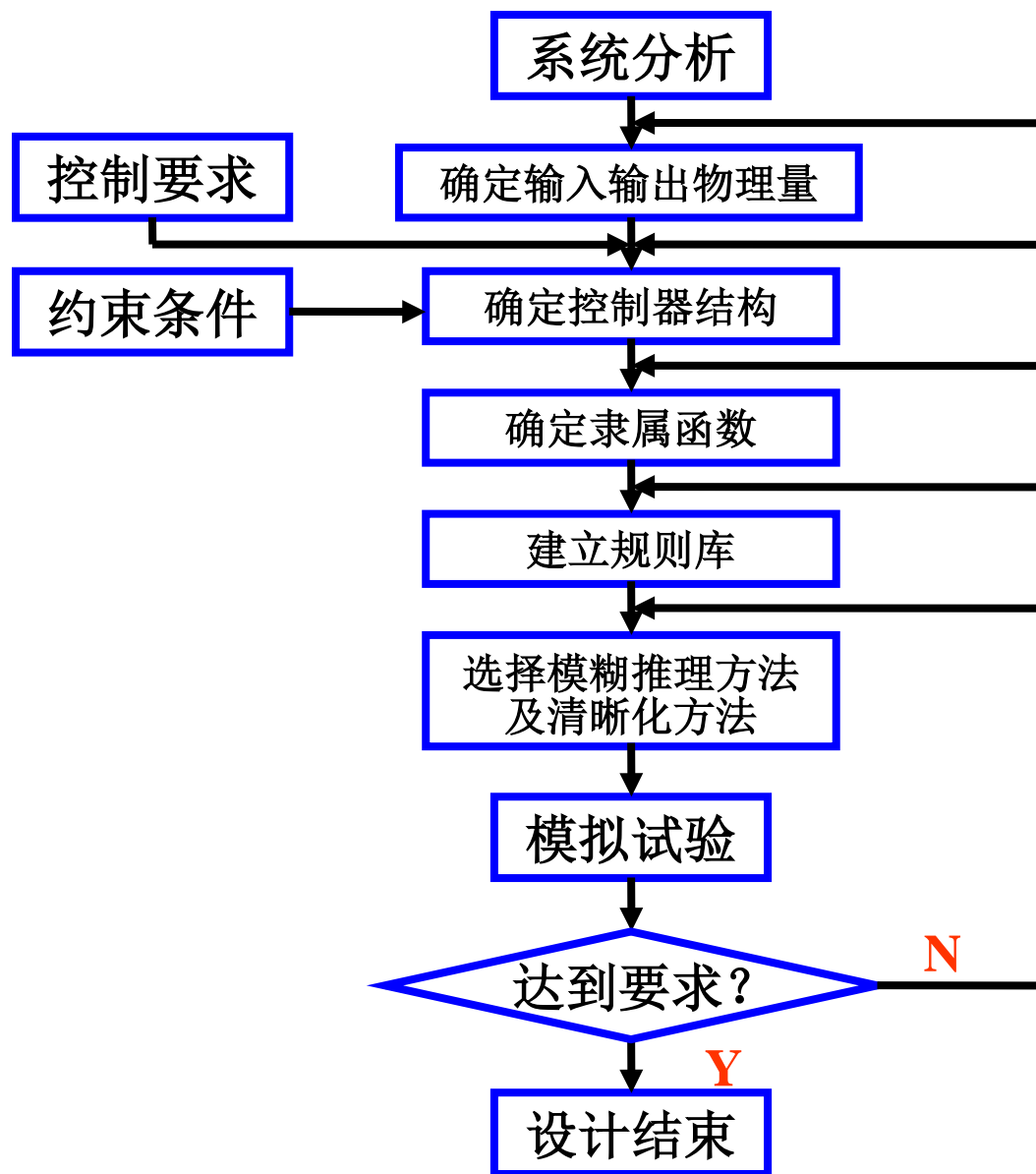
模糊控制系统



5 模糊控制系统——基本原理

- (1) 在控制的每一采样周期，先获取被控量的精确值，并与给定目标值进行比较，求得误差信号；
- (2) 由当前及以前的误差信号计算误差的变化及误差变化的变化；
- (3) 对误差及误差的变化等输入变量进行模糊化处理，计算相应的隶属度；
- (4) 由输入变量和模糊规则，根据模糊推理方法进行模糊决策，获得模糊控制量；
- (5) 将模糊控制量清晰化，求得精确的控制量；
- (6) 将精确的控制量发送给执行机构，进一步控制。

5 模糊控制系统——基本原理



举例

举例

例1：单输入单输出电热炉温控系统的模糊控制。

人工操作经验，用语言描述如下：

- (1) 若炉温低于600度则升压，低得越多升压越高；
- (2) 若炉温高于600度则降压，高得越多降压越多；
- (3) 若炉温等于600度则保持电压不变。

设计过程：

a 模糊控制器的输入输出变量

输入：炉温的偏差 $e(k) = t(k) - 600$

输出：电压的变化 $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$

举例

b 输入输出变量的模糊化

- 模糊子集为

{负大NB、负小NS、0、正小PS、正大PB}

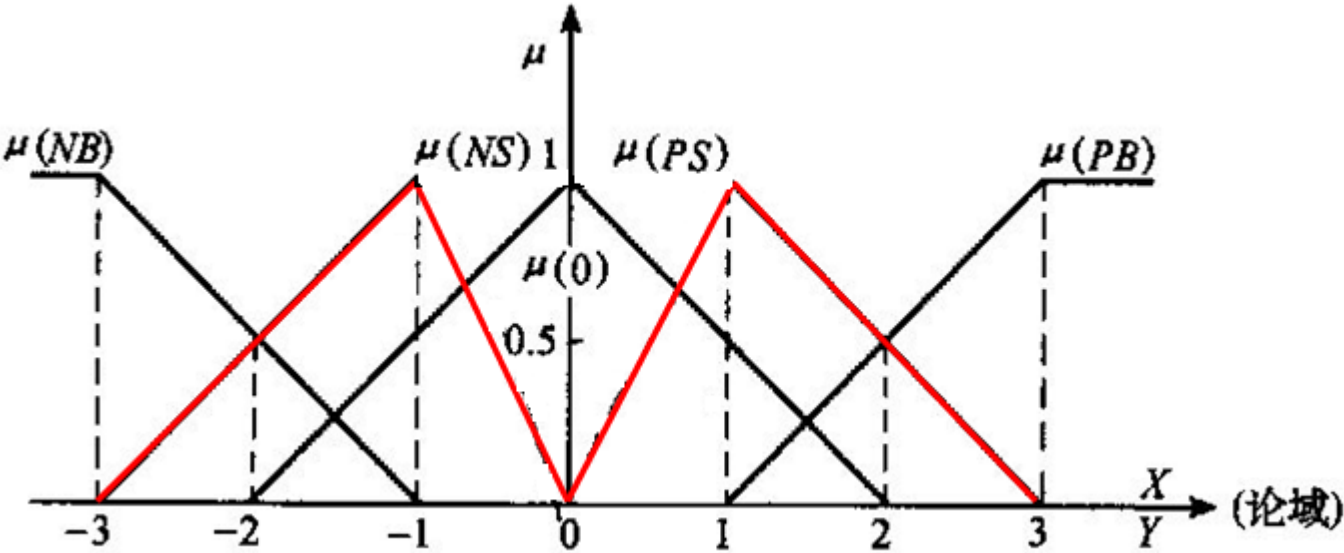
- 误差 e 的论域为 X ，控制量的论域为 Y ，把大小量分为七个等级，表示为

$$X = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$$

$$Y = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$$

- 给出语言变量的隶属函数曲线，由此得到模糊变量的赋值表

举例



语言变量的隶属函数

模糊变量的赋值表

隶属度 语言变量 \ 量化等级		-3	-2	-1	0	1	2	3
语言变量	PB	0	0	0	0	0	0.5	1
	PS	0	0	0	0	1	0.5	0
	O	0	0	0.5	1	0.5	0	0
	NS	0	0.5	1	0	0	0	0
	NB	1	0.5	0	0	0	0	0

c 模糊控制规则的语言描述

- (1) If $e=NB$ then $\Delta u=PB$
- (2) If $e=NS$ then $\Delta u=PS$
- (3) If $e=0$ then $\Delta u=0$
- (4) If $e=PS$ then $\Delta u=NS$
- (5) If $e=PB$ then $\Delta u=NB$

d 求模糊关系

$$\begin{aligned}\tilde{R} = & (\text{NB}_e \times \text{PB}_u) \\ & + (\text{NS}_e \times \text{PS}_u) \\ & + (\text{O}_e \times \text{O}_u) \\ & + (\text{PS}_e \times \text{NS}_u) \\ & + (\text{PB}_e \times \text{NB}_u)\end{aligned}$$

举例

$$\begin{aligned} NB_e \times PB_u &= (1, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0) \times (0, 0, 0, 0, 0, 0.5, 1) \\ &= (1, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0)^T \circ (0, 0, 0, 0, 0, 0.5, 1) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

用同样的方法可求出

$$NS_e \times PS_u \quad O_e \times O_u \quad PS_e \times NS_u \quad PB_e \times NB_u$$

求出模糊控制规则的矩阵表达式

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

举例

e 模糊决策

$$\Delta \tilde{u} = \tilde{e} \circ \tilde{R}$$

当 $\tilde{e} = PS$ 时, 则

$$\Delta \tilde{u} = \tilde{e} \circ \tilde{R}$$

$$= (0, 0, 0, 0, 1, 0.5, 0) \circ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= (0.5, 0.5, 1, 0.5, 0.5, 0, 0)$$

举例

f 控制量的模糊量转化为精确量

上面求得的控制量 $\Delta\tilde{u}$ 为一模糊向量，可写为

$$\Delta\tilde{u} = \frac{0.5}{-3} + \frac{0.5}{-2} + \frac{1}{-1} + \frac{0.5}{0} + \frac{0.5}{1} + \frac{0}{2} + \frac{0}{3}$$

对控制量的模糊子集如果按照隶属度最大原则，应选控制量为“-1”级。即当炉温偏高时，应降低一点电压。

模糊控制表

e	-3	-2	-1	0	1	2	3
u	3	2	1	0	-1	-2	-3

欢迎提问和指正
谢谢!