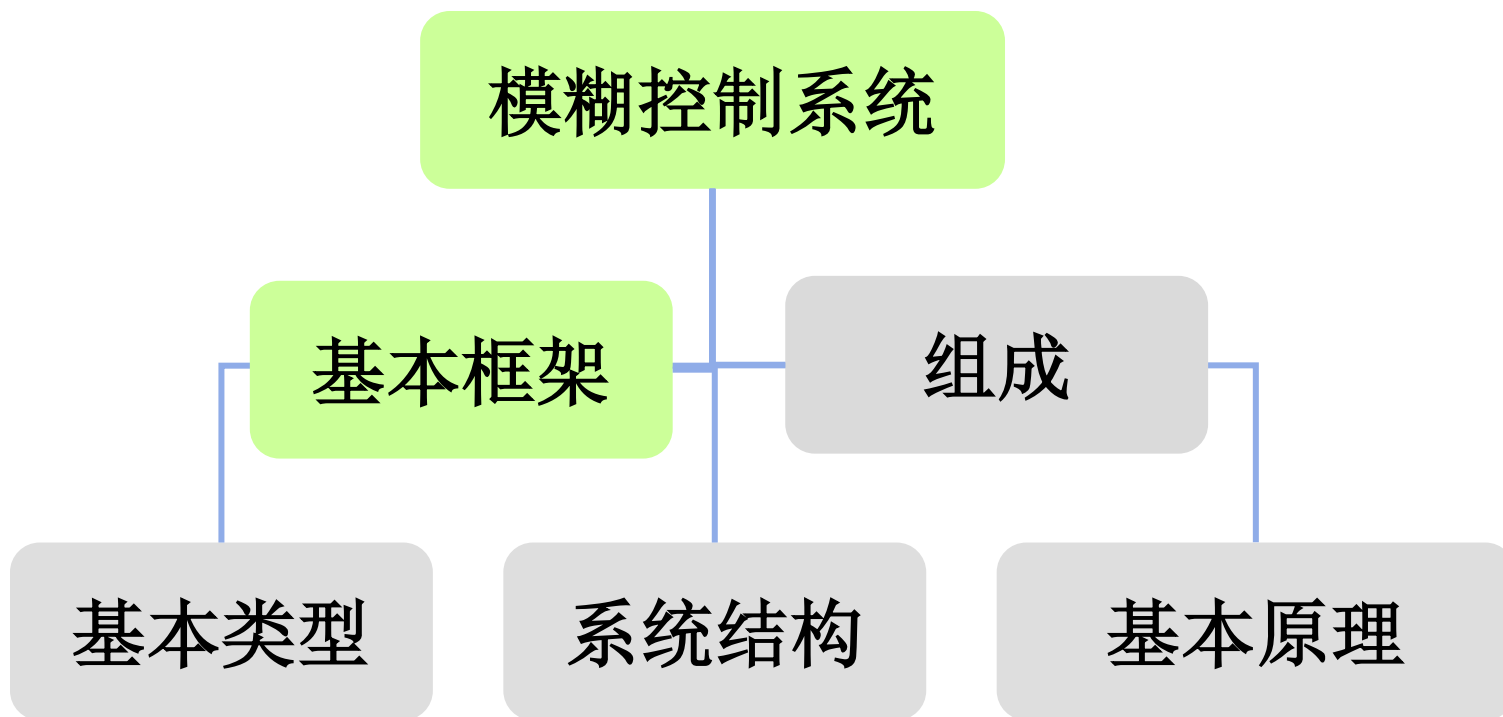
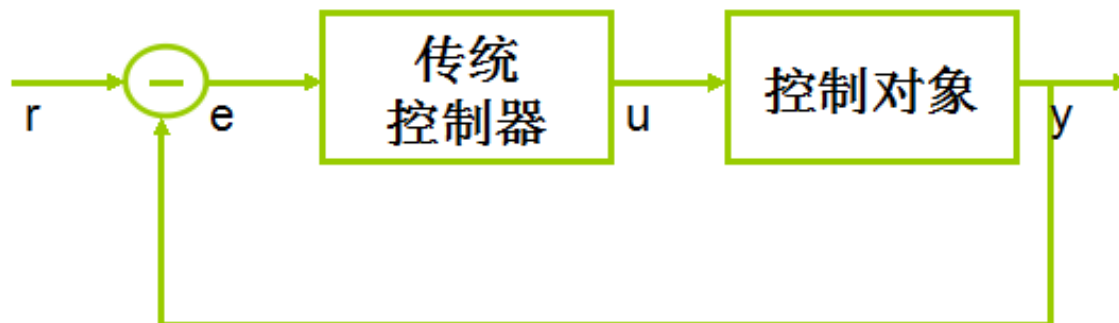


模糊控制系统



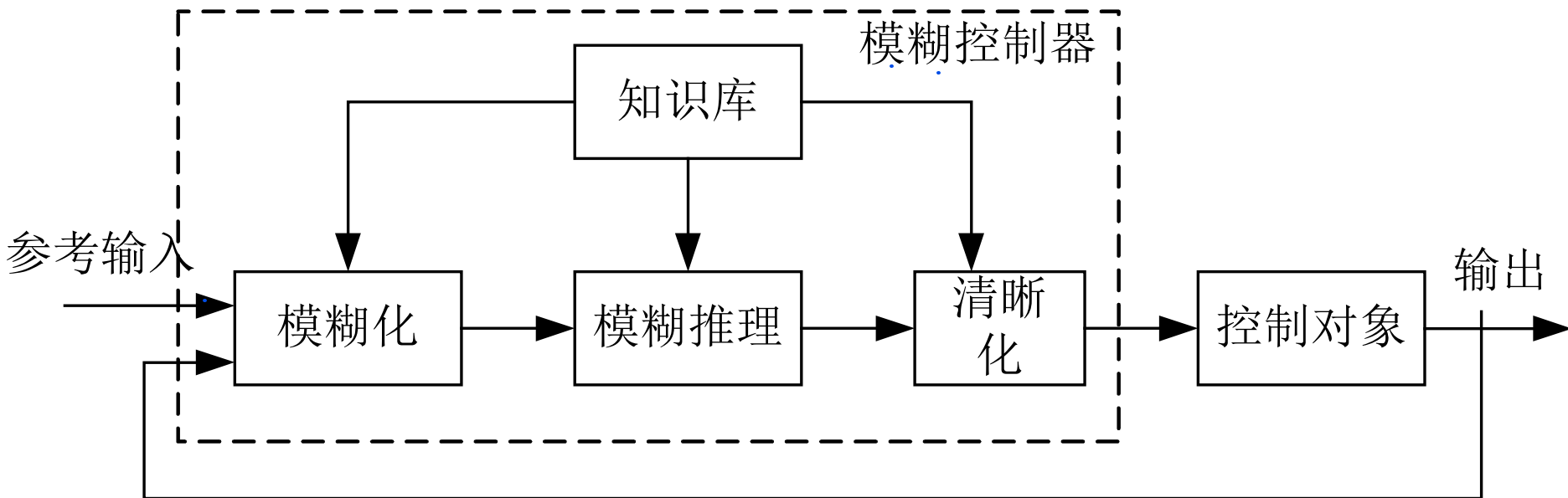
1 模糊控制器—基本框架



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

传统控制器

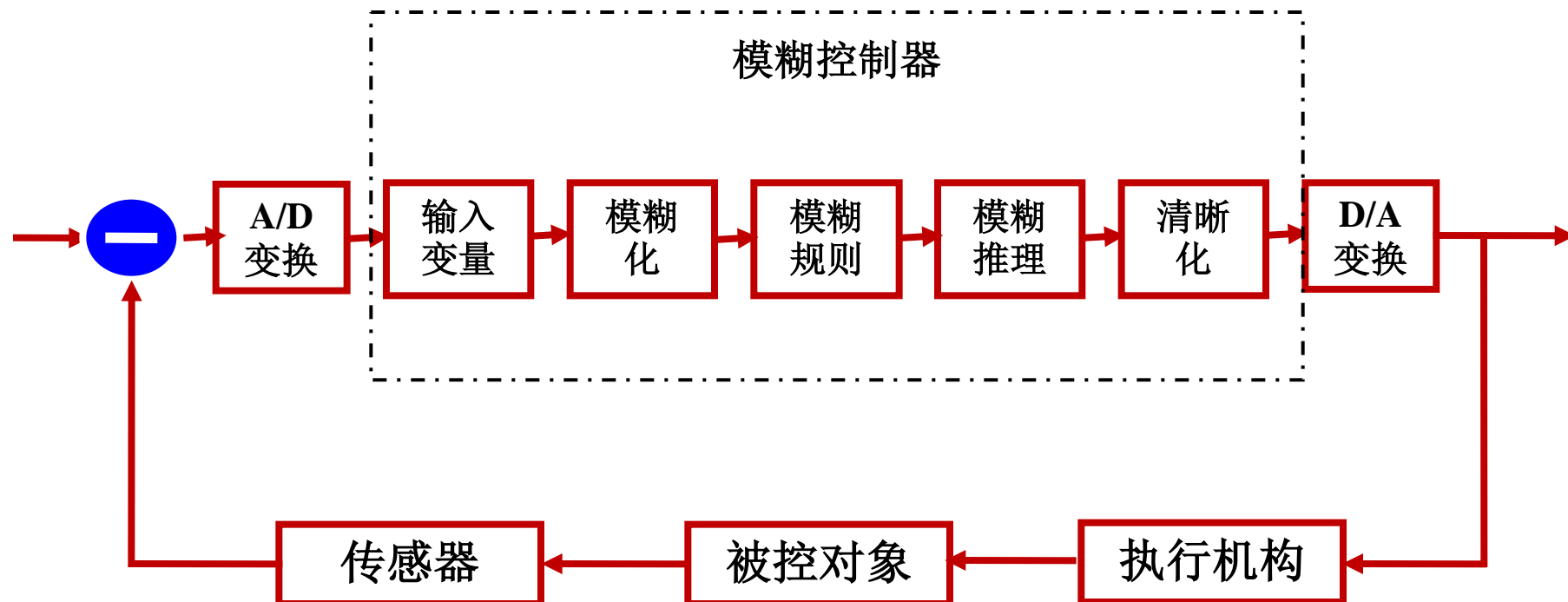
1 模糊控制器—基本框架 (2)



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

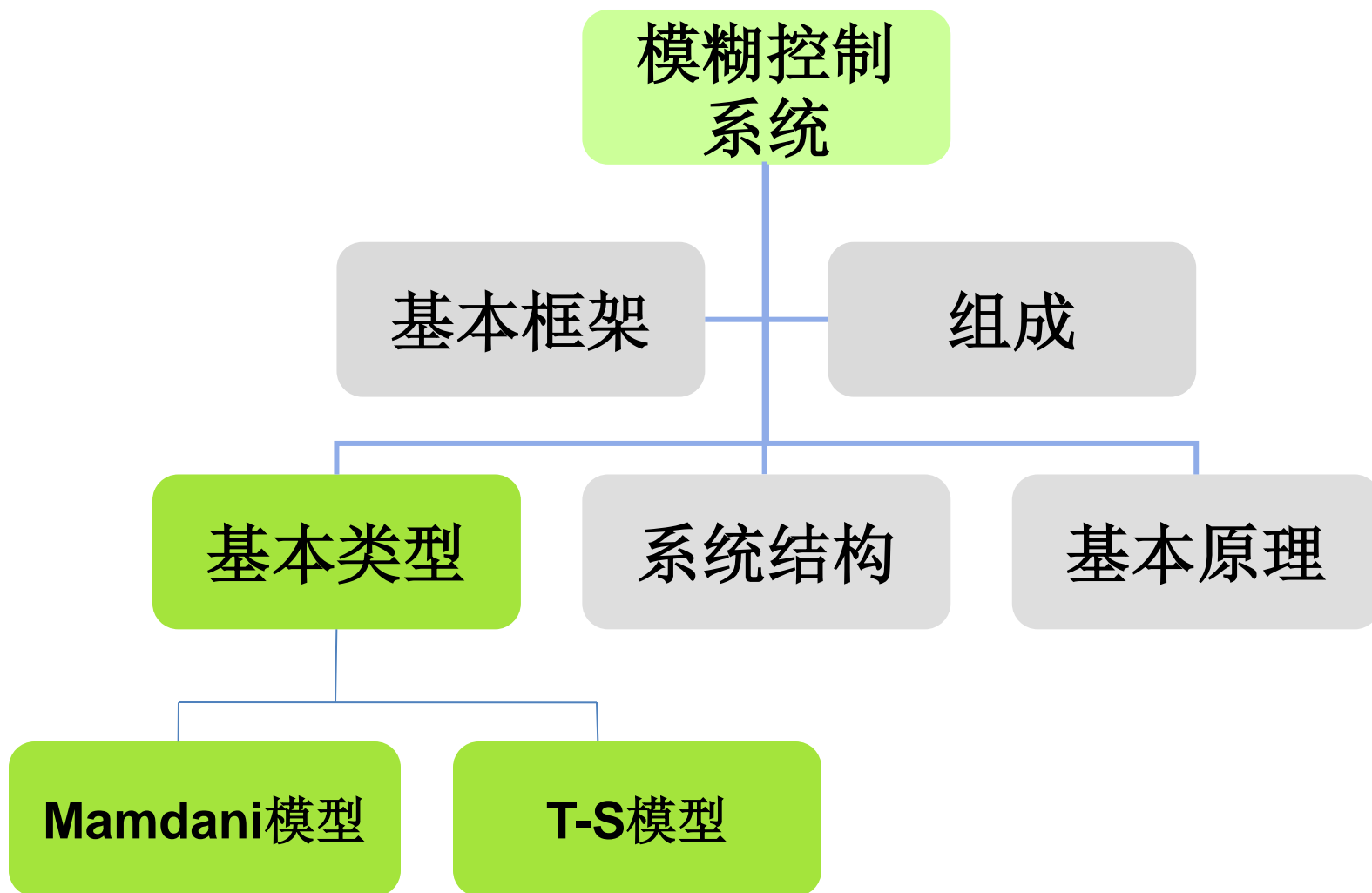
将各种非电量如流量、温度、压力、速度、浓度等转换为电信号，通常由各类数字或模拟测量仪器、检测元件或传感器组成

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

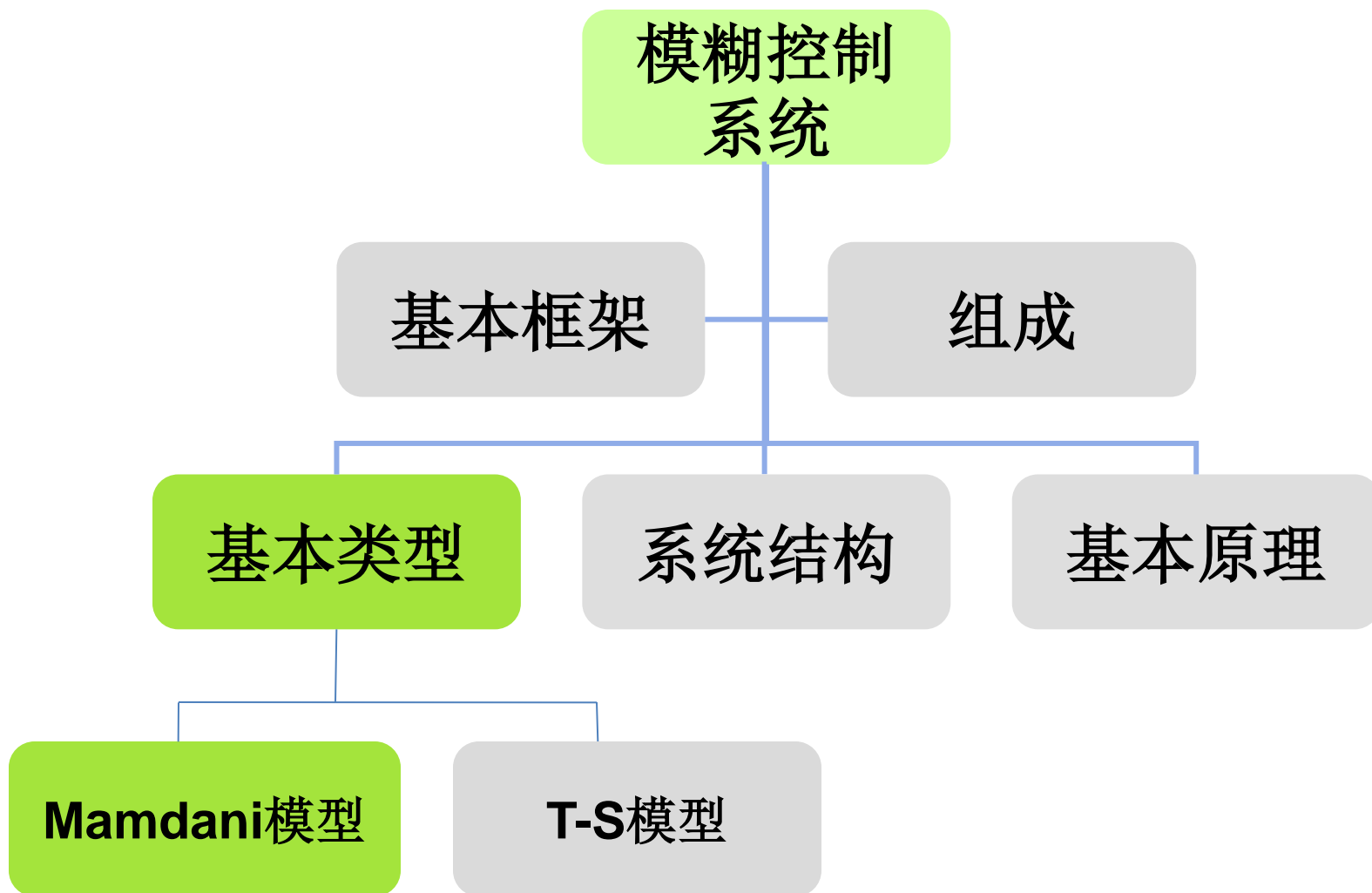
□ Mamdani模糊模型

- 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

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

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

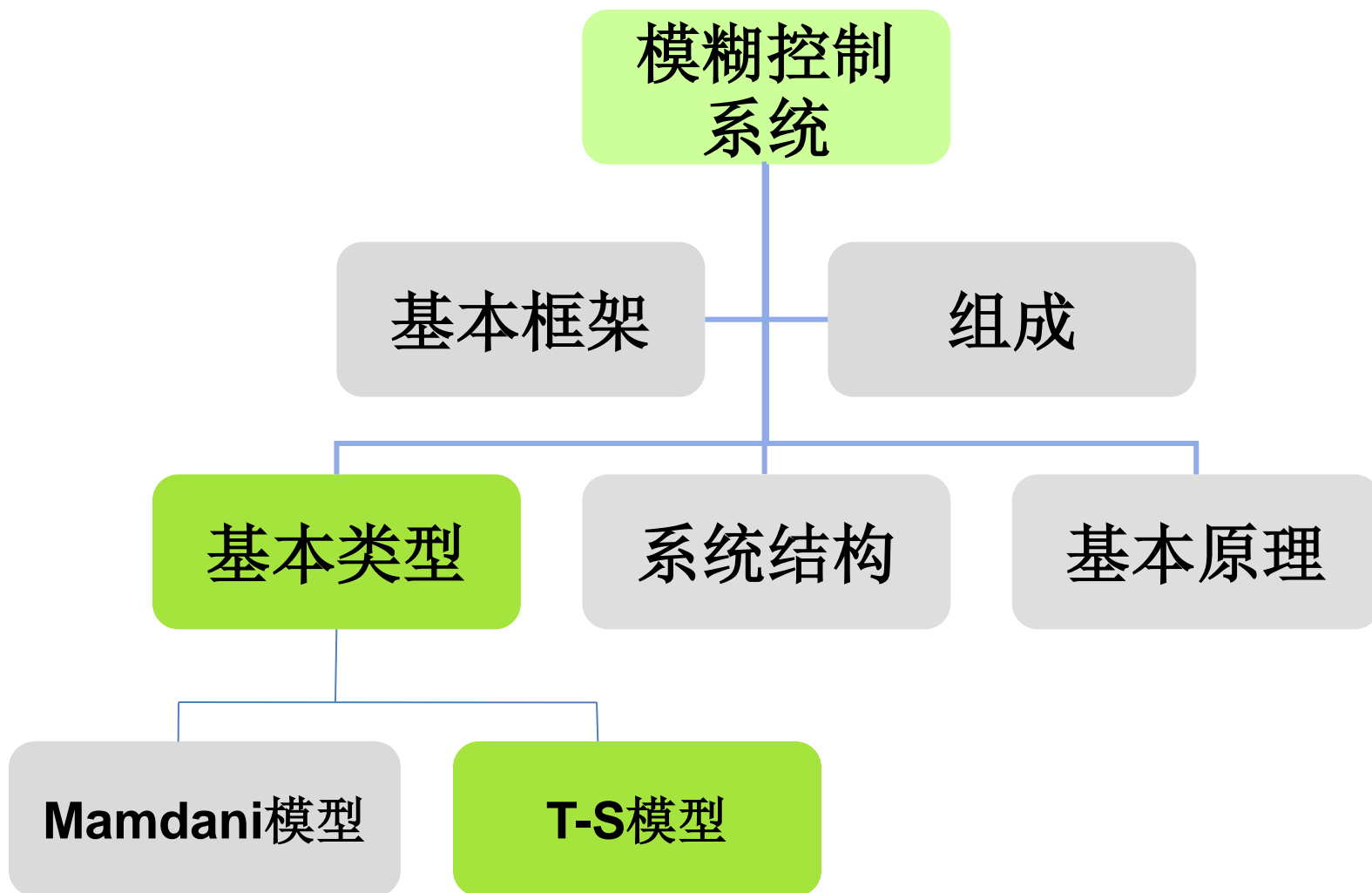
m条规则全体构成的模糊关系为

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

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）。

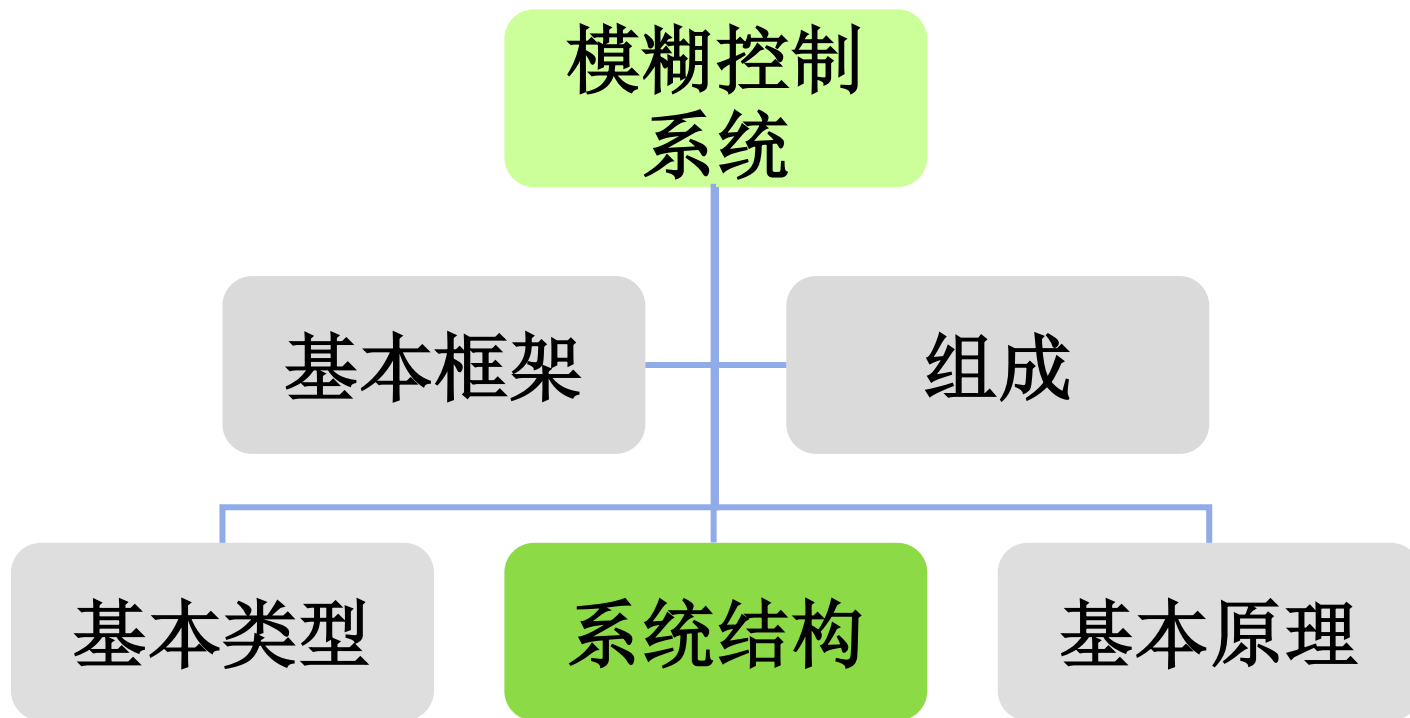
如采用 “ $\vee - \wedge$ ”（Max-Min）推理方法，有：

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

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：

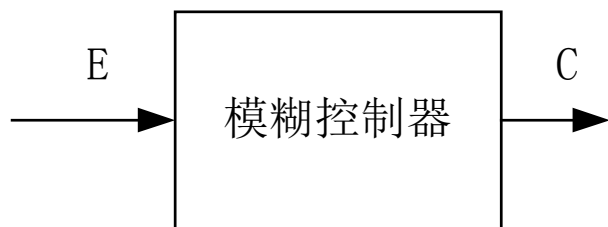
(1)误差

(2)误差的变化

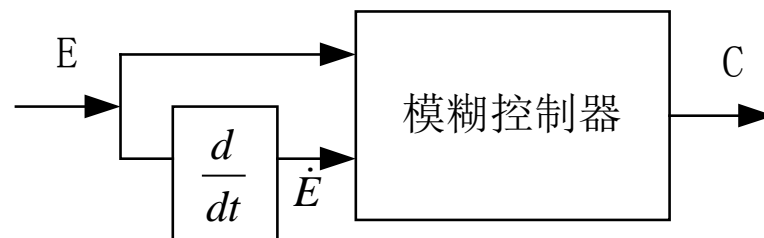
(3)误差变化的速率

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。

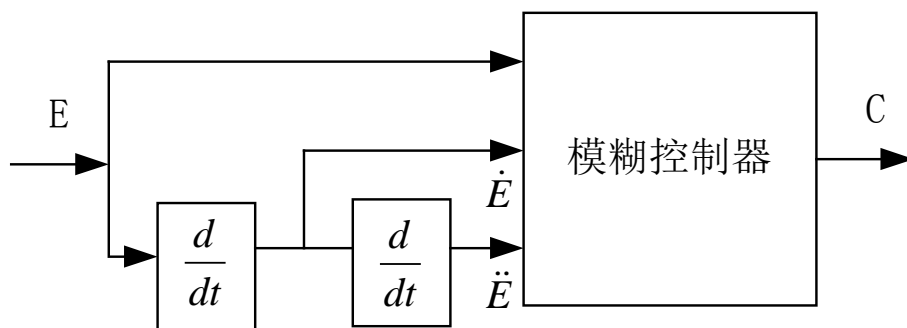
3 模糊控制系统结构 (2)



(1)一维模糊控制器



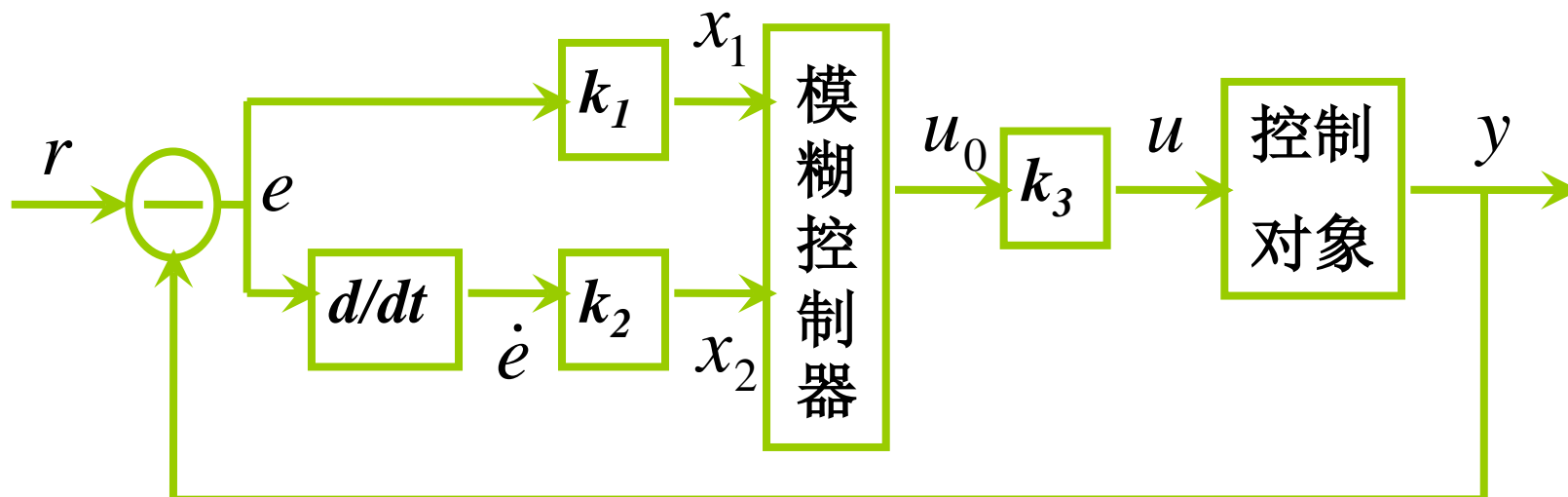
(2)二维模糊控制器



(3)三维模糊控制器

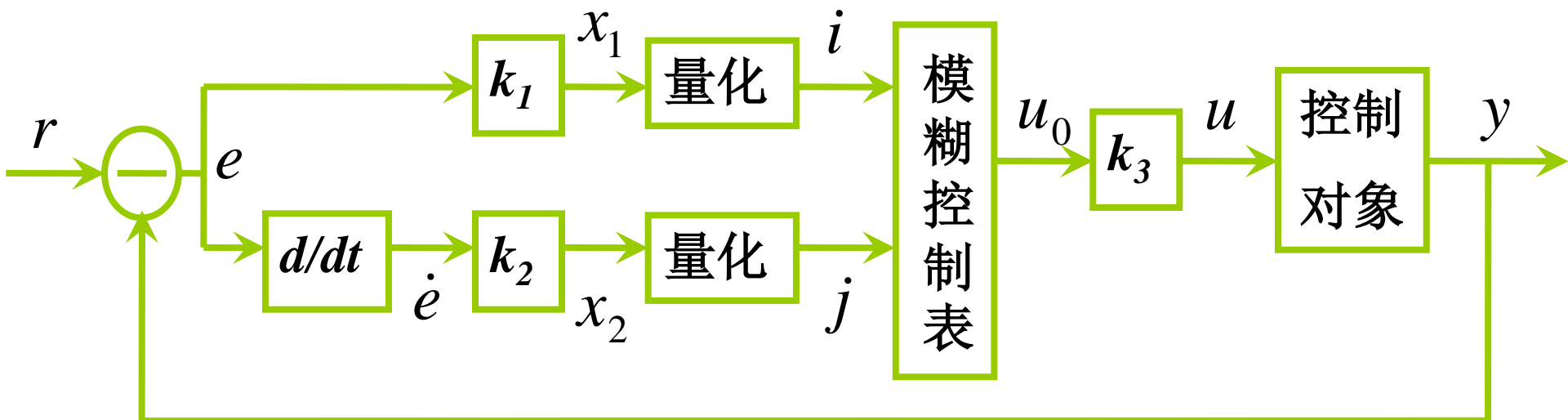
三种常用的模糊控制器

3 模糊控制系统结构 (3)



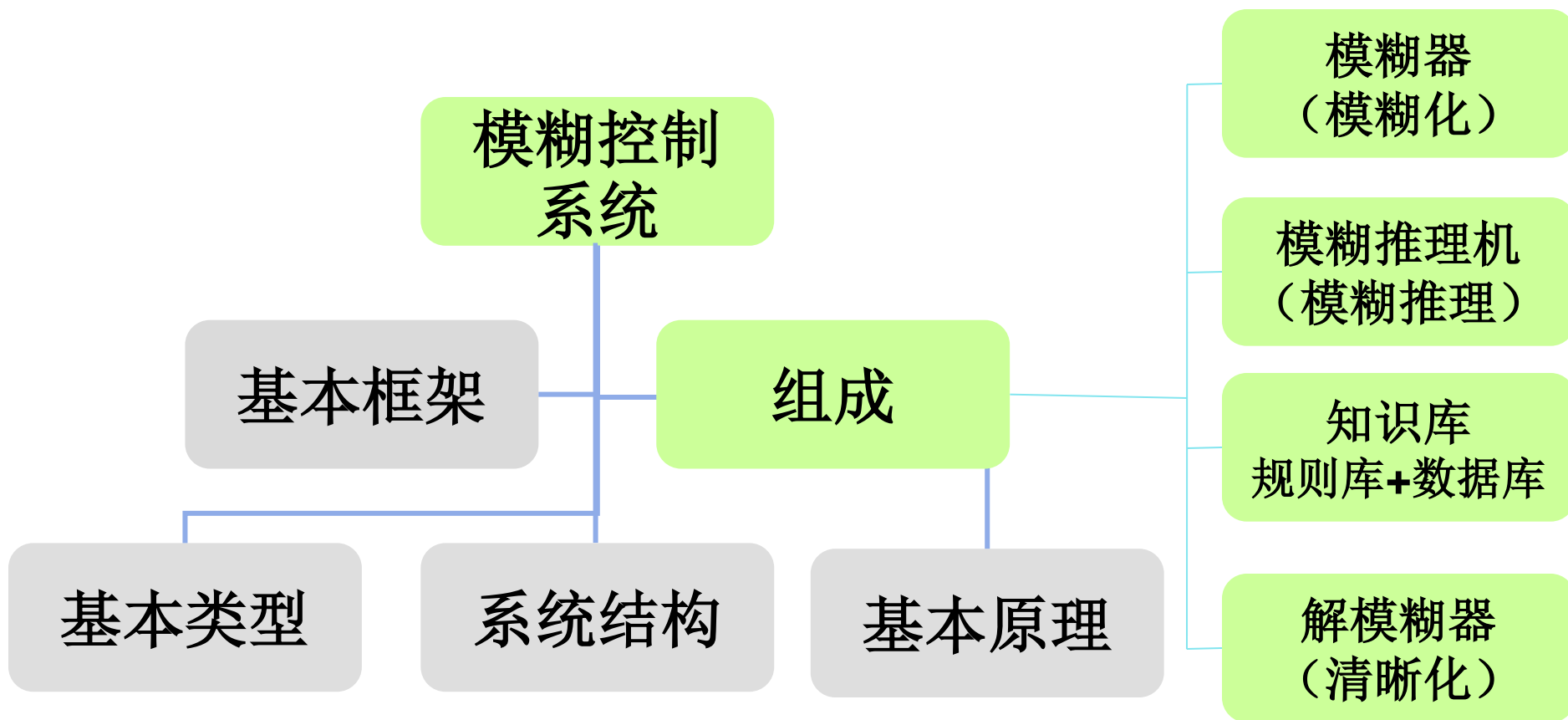
论域为连续时的模糊控制系统结构

3 模糊控制系统结构 (4)

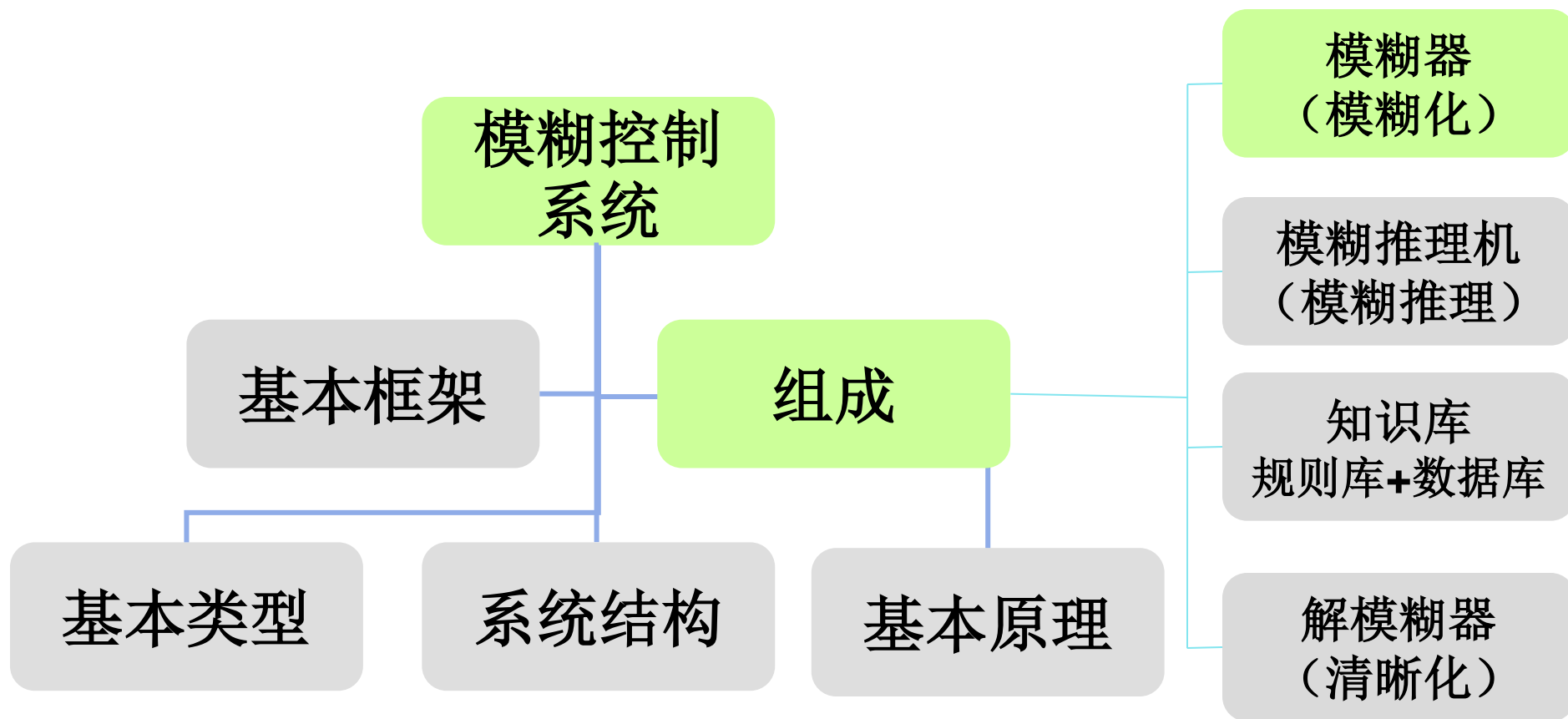


论域为离散时的模糊控制系统结构

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）

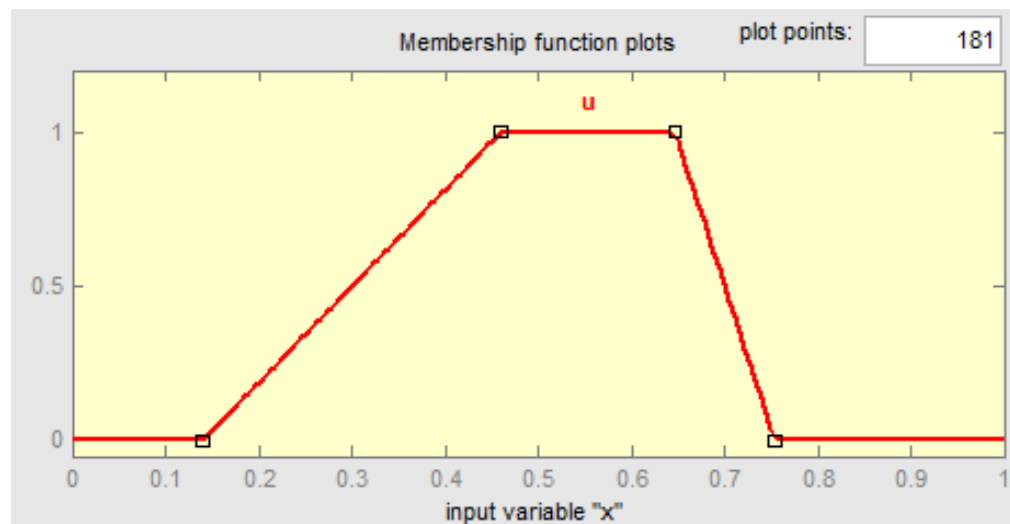
——将输入的精确量转化为模糊量

- 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

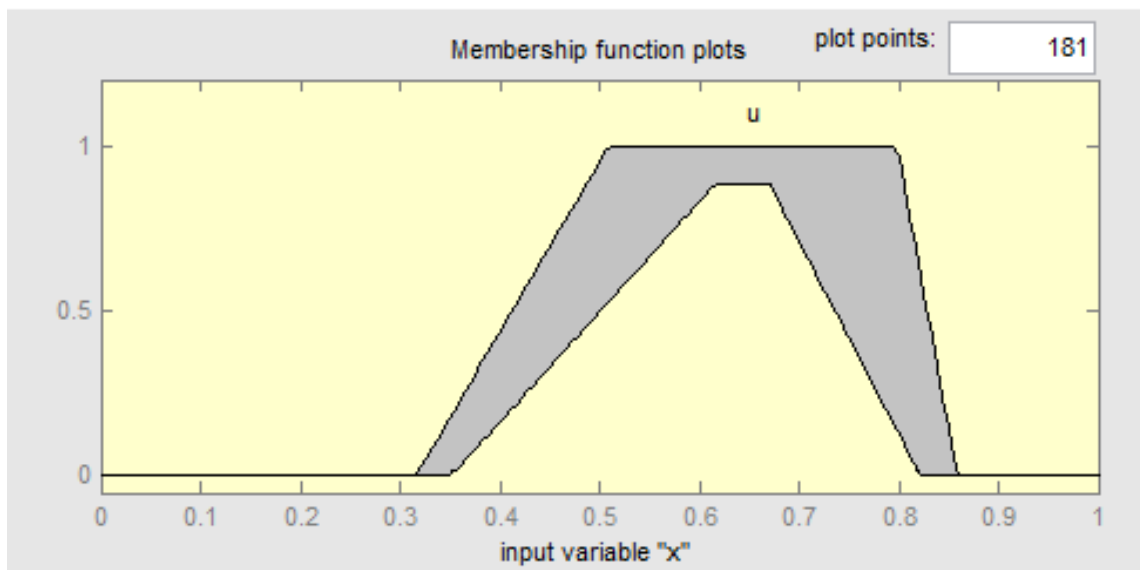
II型模糊集合：

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；

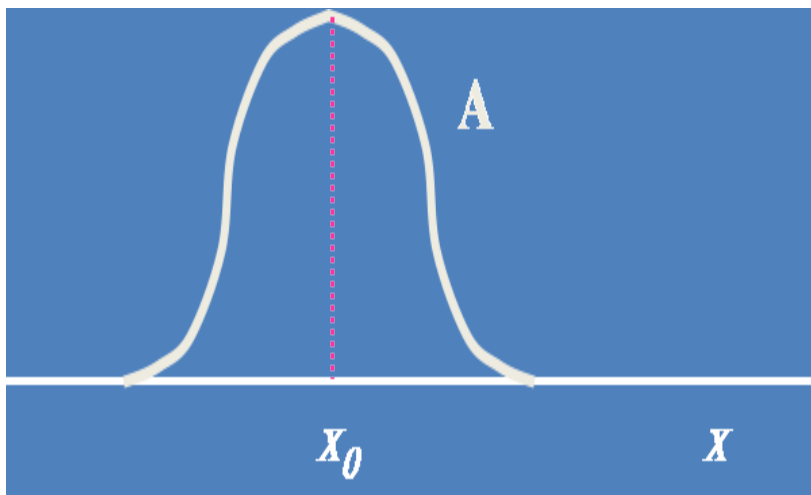
若 $A^L = A^R = A$ ，则 \tilde{A} 即为 I 型模糊集合。



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。

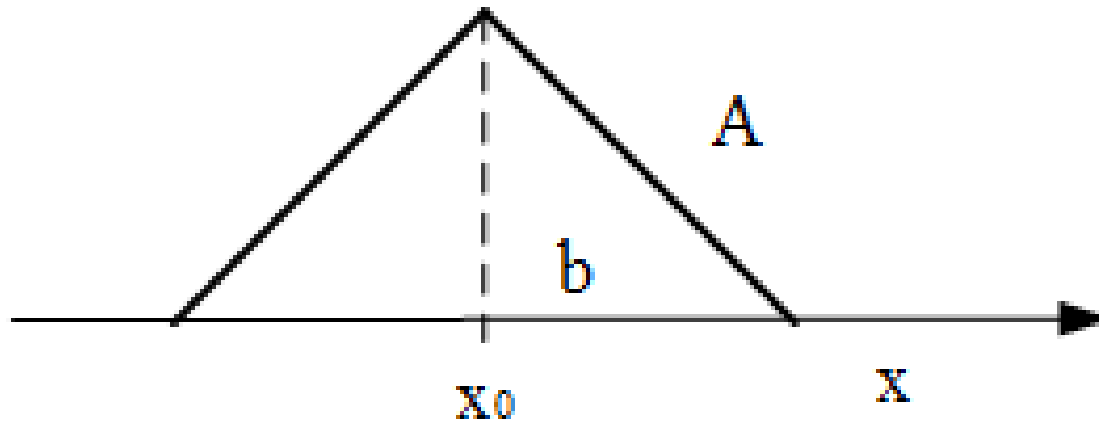
$$\mu_A(x) = \exp\left[-\left(\frac{x - x_0}{\sigma}\right)^2\right]$$



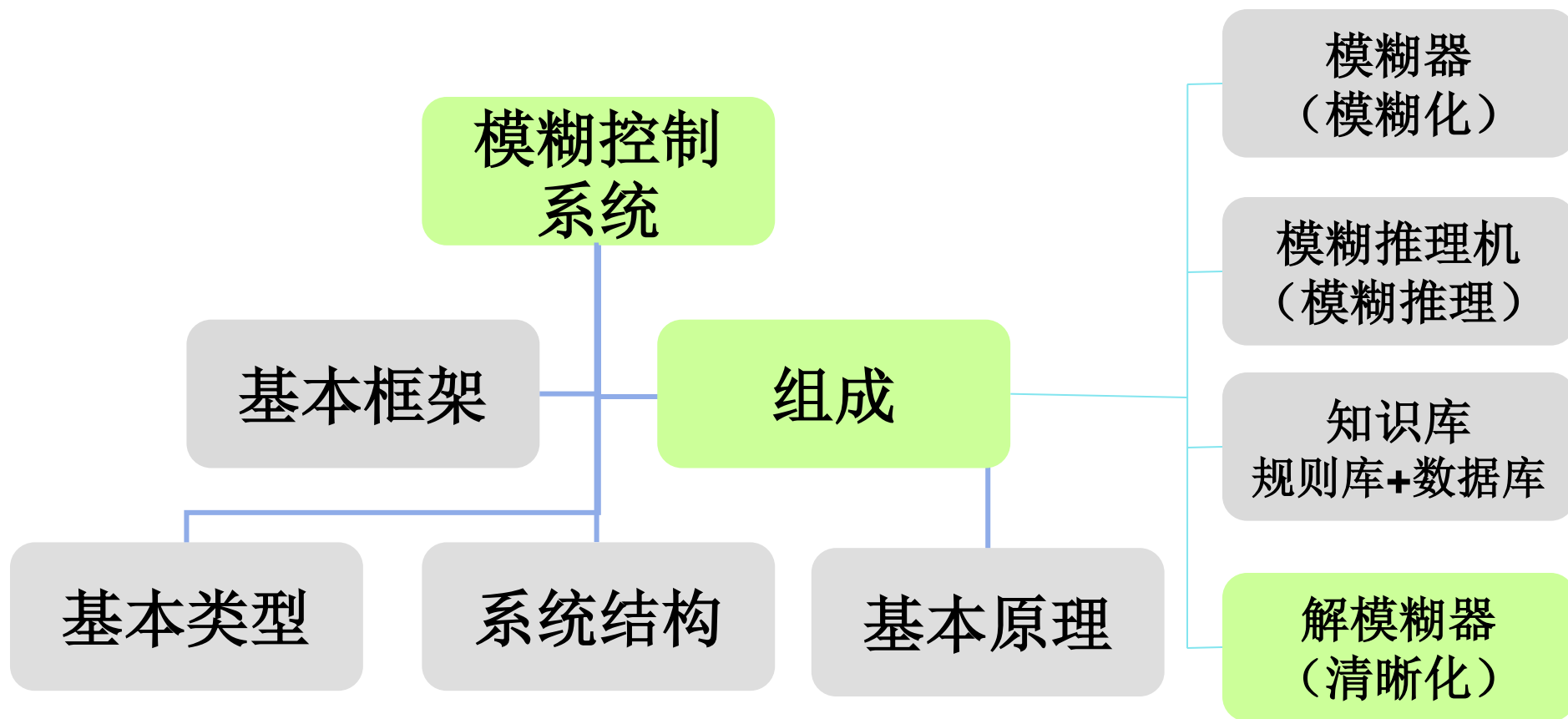
4.1.2 模糊控制器组成--模糊器（模糊化） (2)

- 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

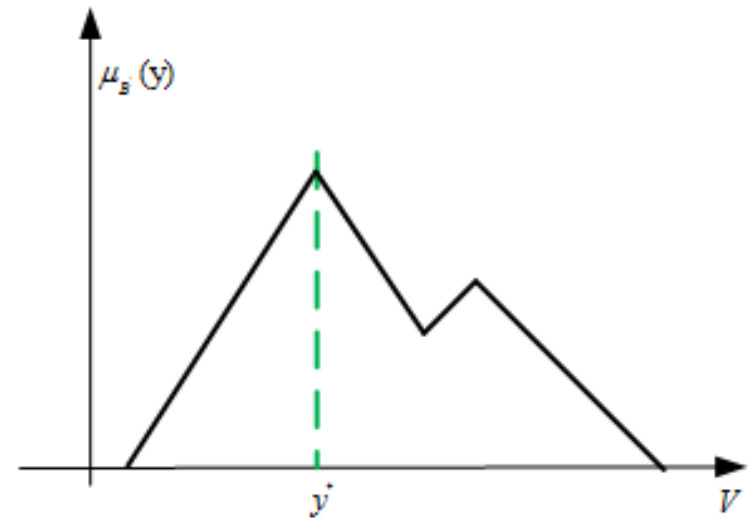
直接选择输出模糊子集的隶属度函数的峰值作为输出的确定值，即把 y^* 确定为 V 上的 $\mu_{B'}(y)$ 取得最大值的点，定义集合：

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

注意：

- 若有多个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



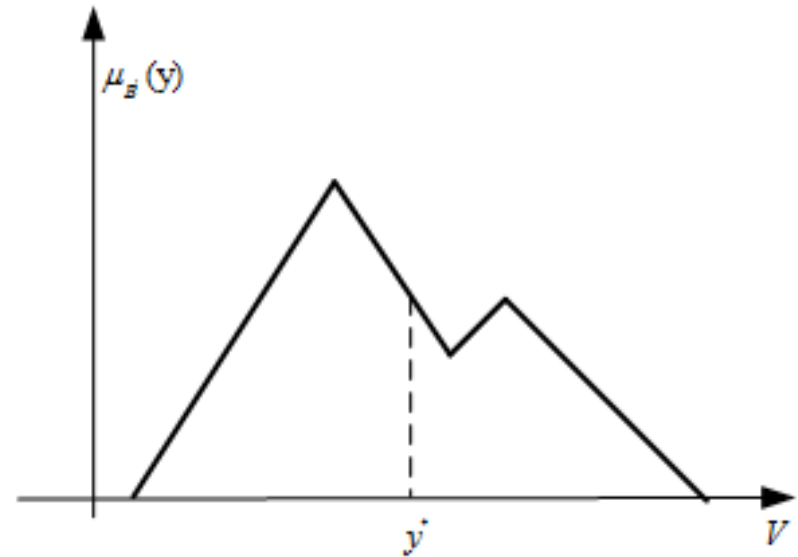
4.2 模糊控制器组成--解模糊器（清晰化）(3)

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



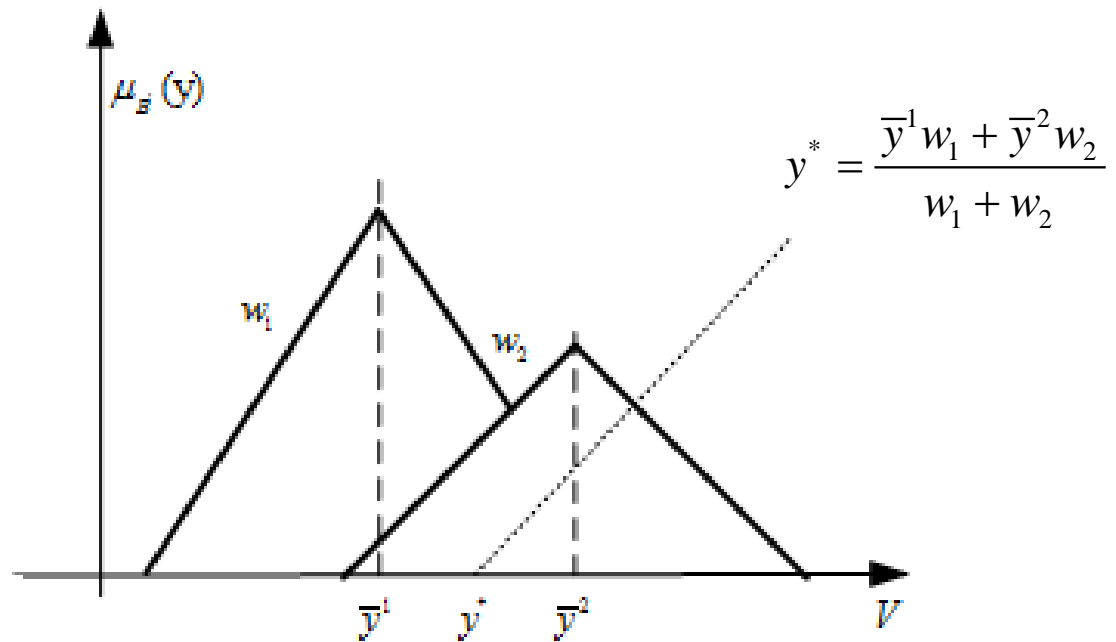
重心解模糊器示意图

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：

$$z_{10} = 5$$

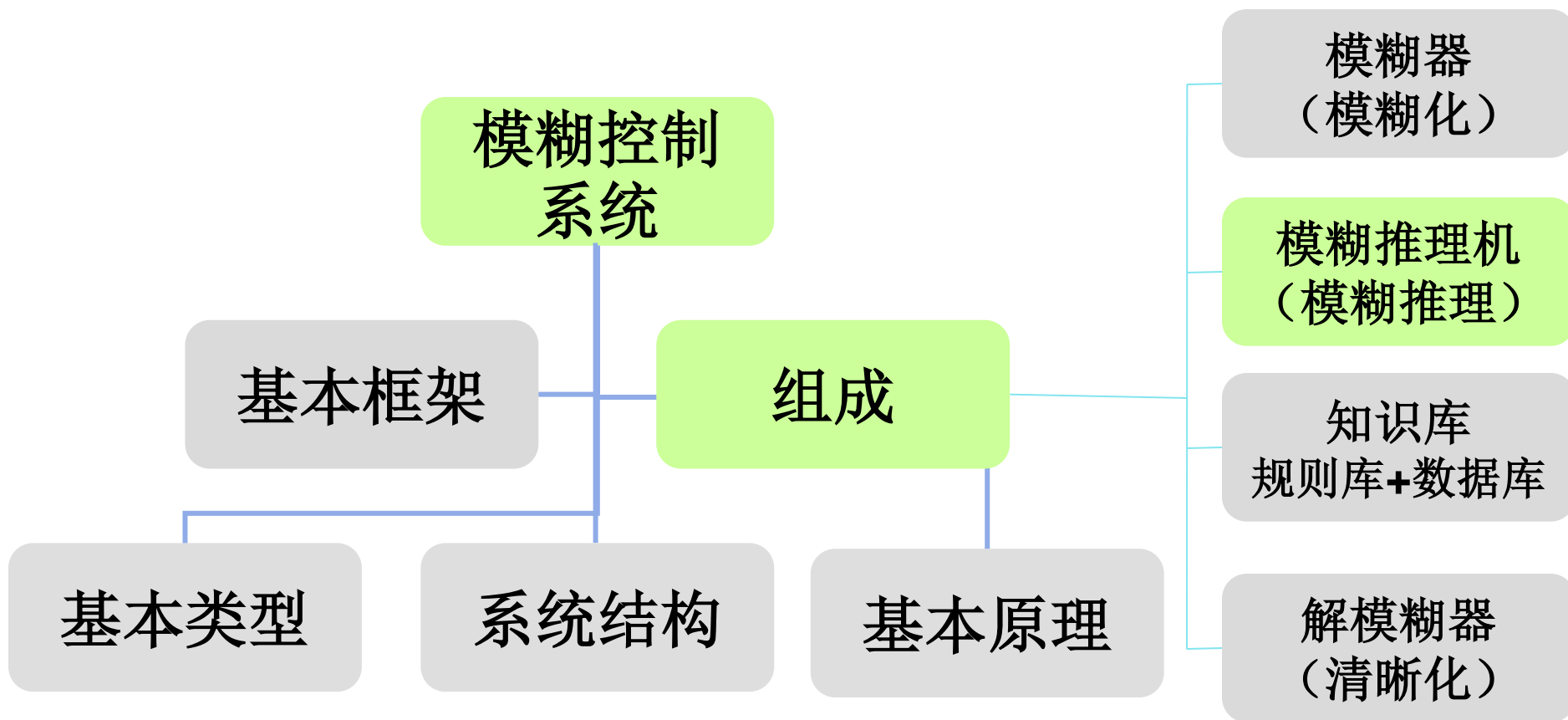
$$z_{20} = \frac{-2-1}{2} = -1.5$$

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

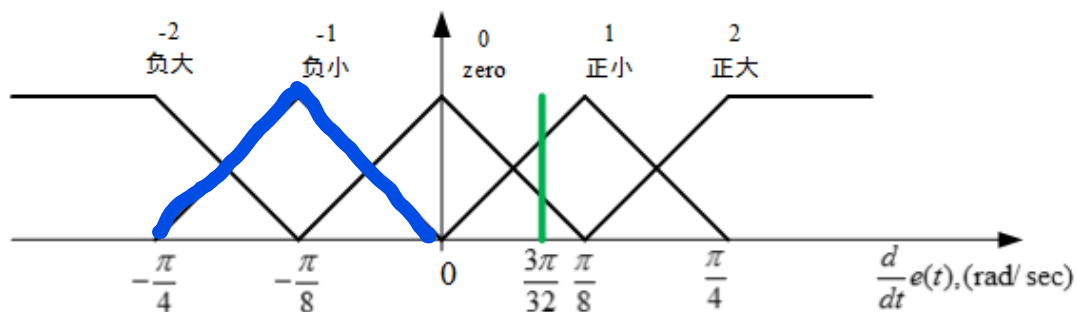
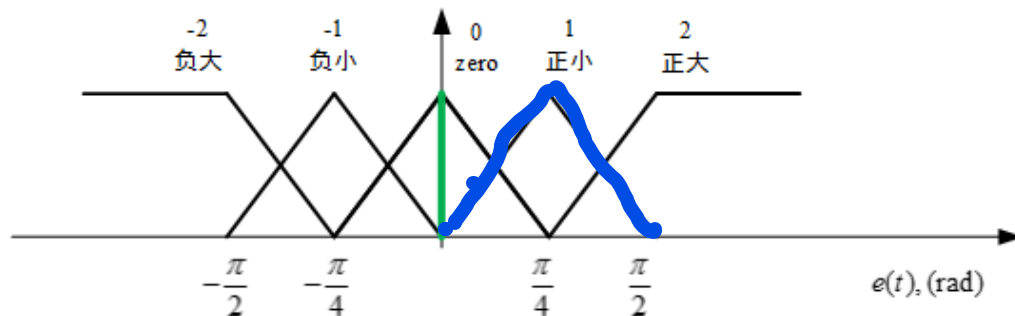
◆ MIN-MAX-重心法(MIN-MAX- Center of Gravity)

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

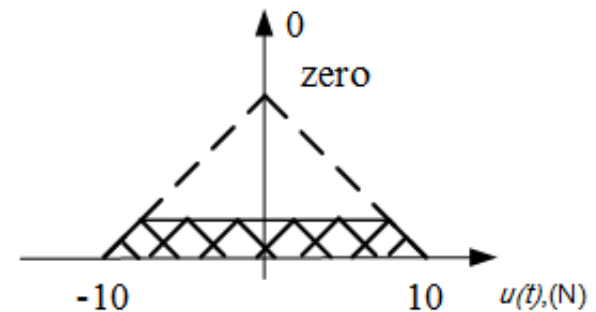


4.3 模糊控制器组成--模糊推理 MIN-MAX-重心法

◆ 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 |



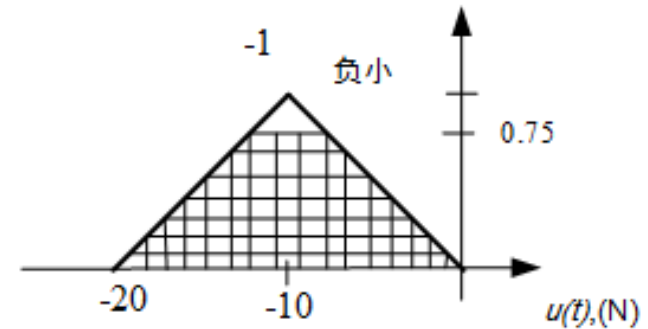


4.3 模糊控制器组成--模糊推理 MIN-MAX-重心法

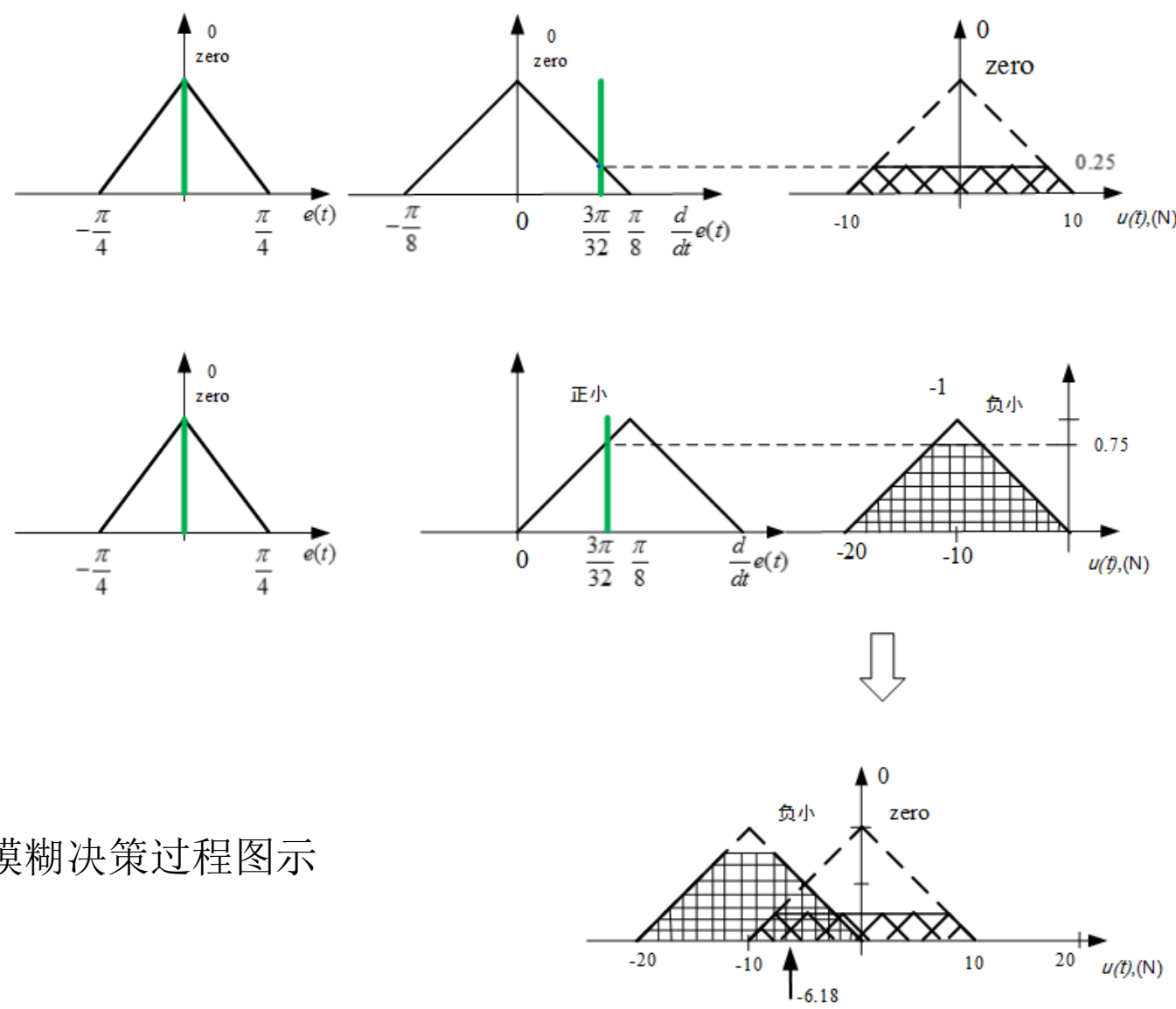
◆ MIN-MAX-重心法(MIN-MAX- Center of Gravity)

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

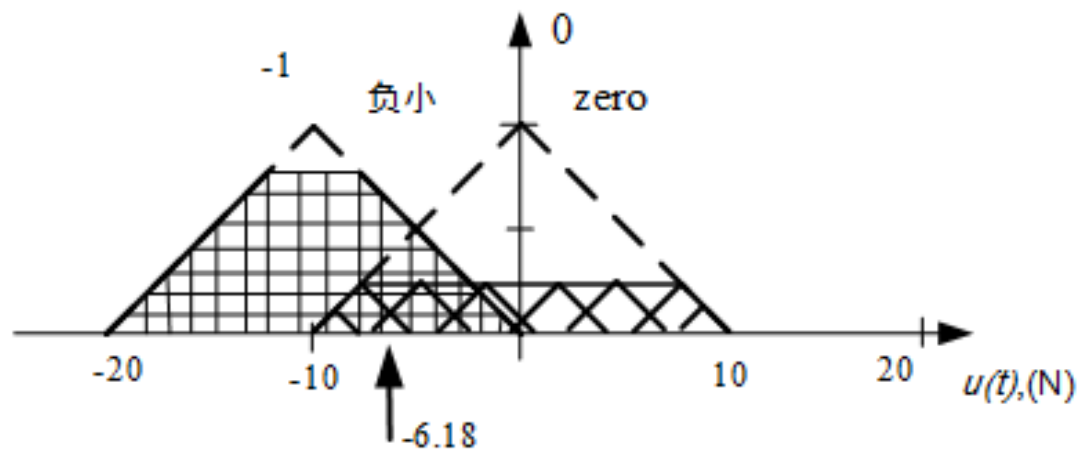


4.3 模糊控制器组成--模糊推理 MIN-MAX-重心法

◆ 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

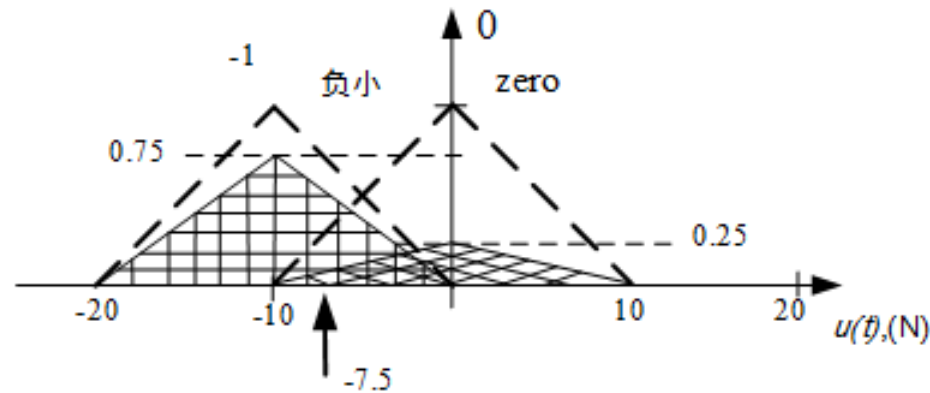
$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{C'}(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^m \mu_{C'}(z_i)}$$



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 |

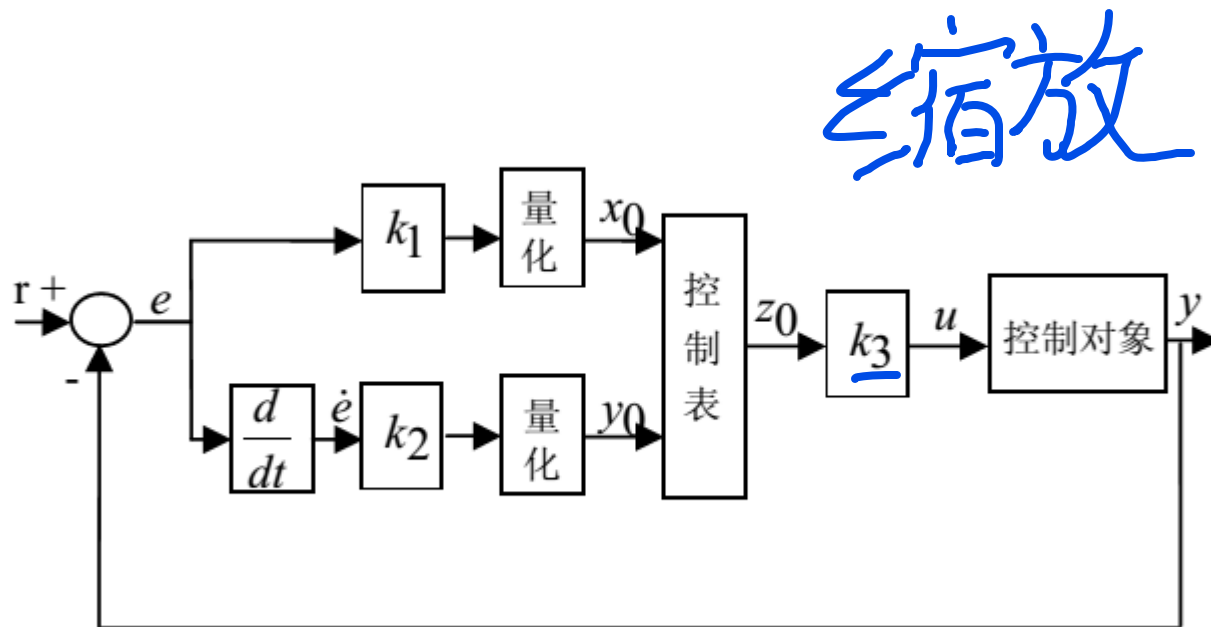
-6~6

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 |

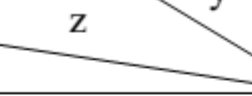
通过查表法设计PID控制器

语言变量y、z的隶属度函数

[illegible]

通过查表法设计PID控制器

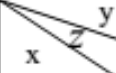
模糊控制规则

|  | 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

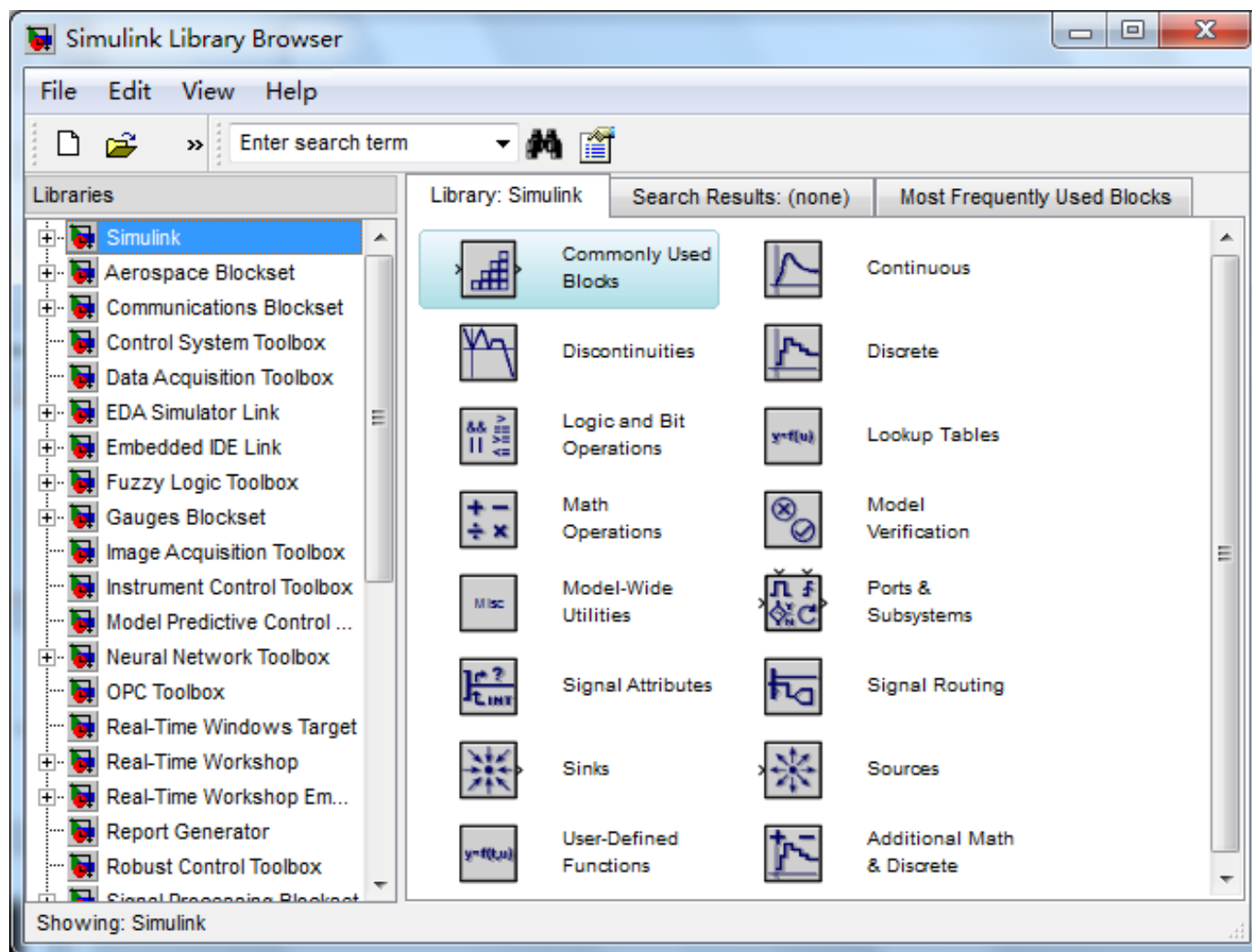
完整的模糊控制表

|  x \ y | -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)

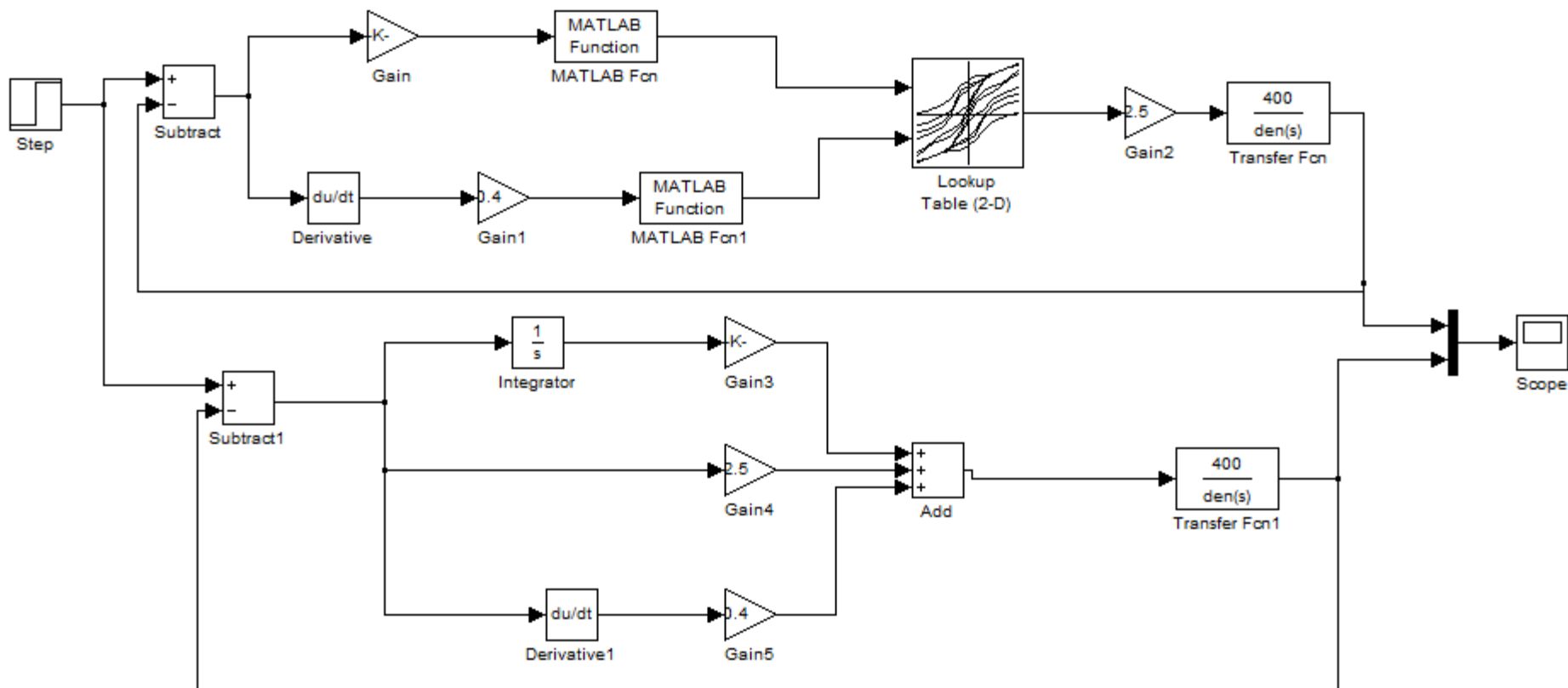
MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

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



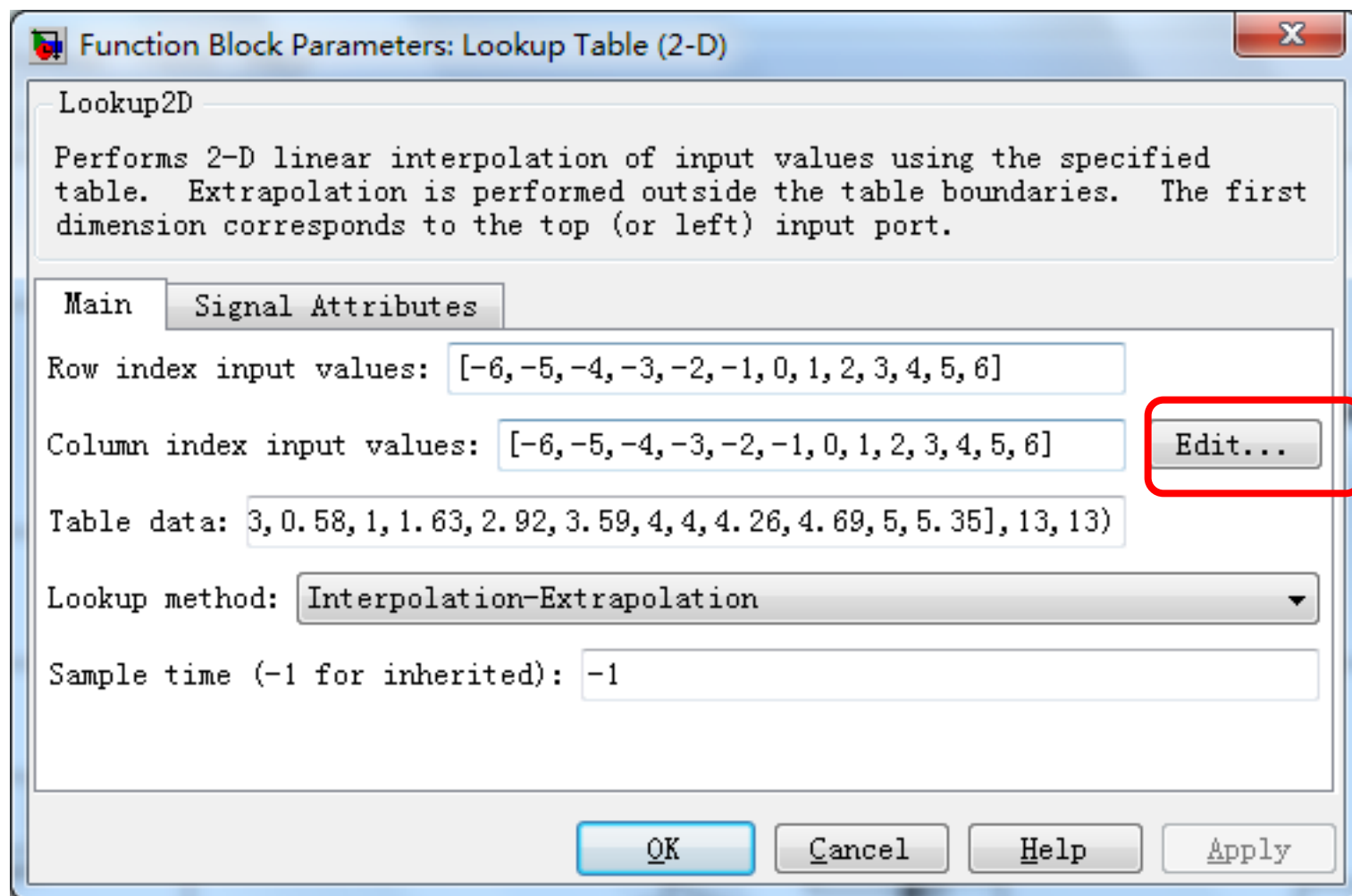
Simulink仿真

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。

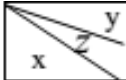
MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

双击Lookup Table进行参数设置：



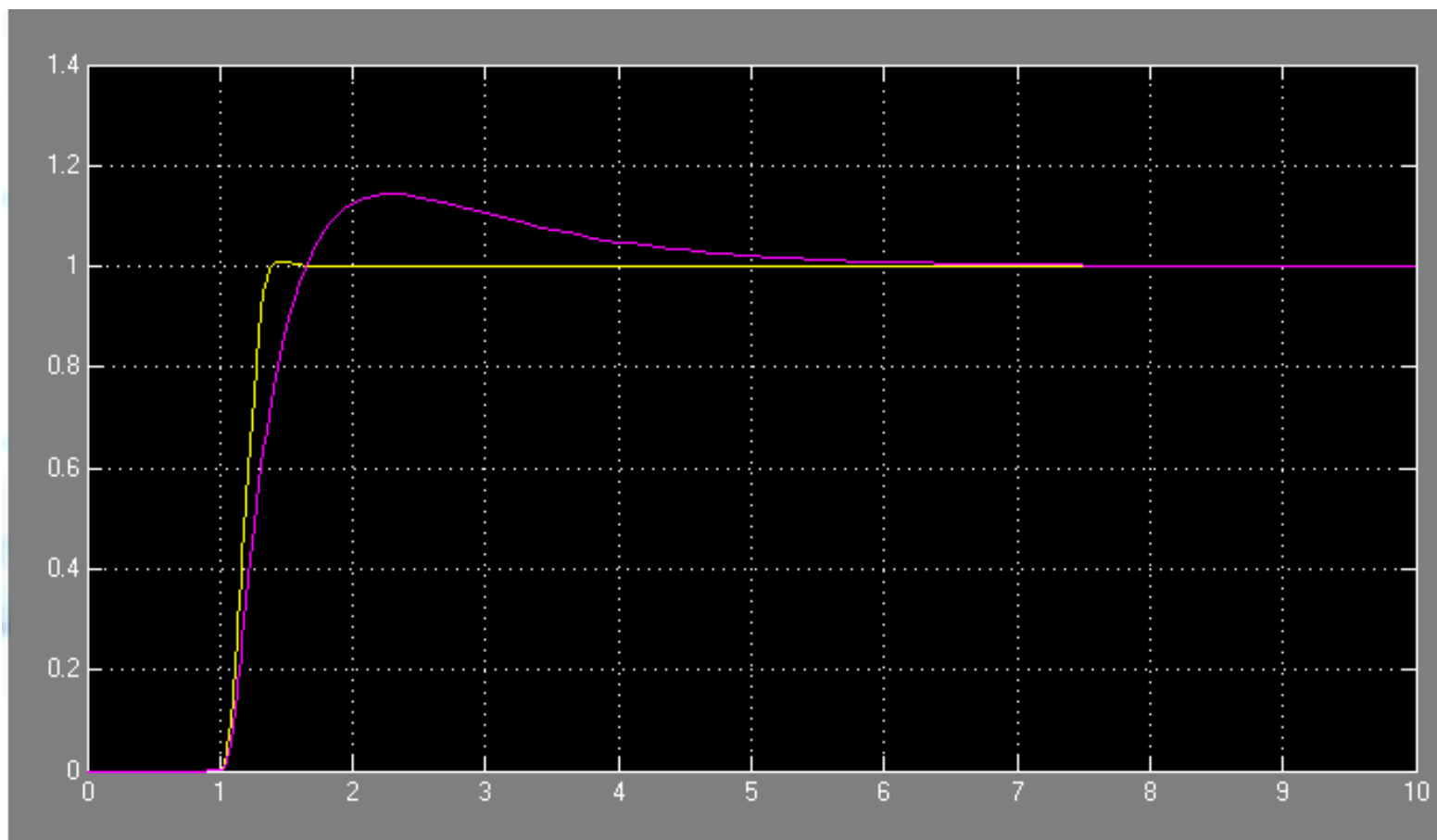
MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

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 |

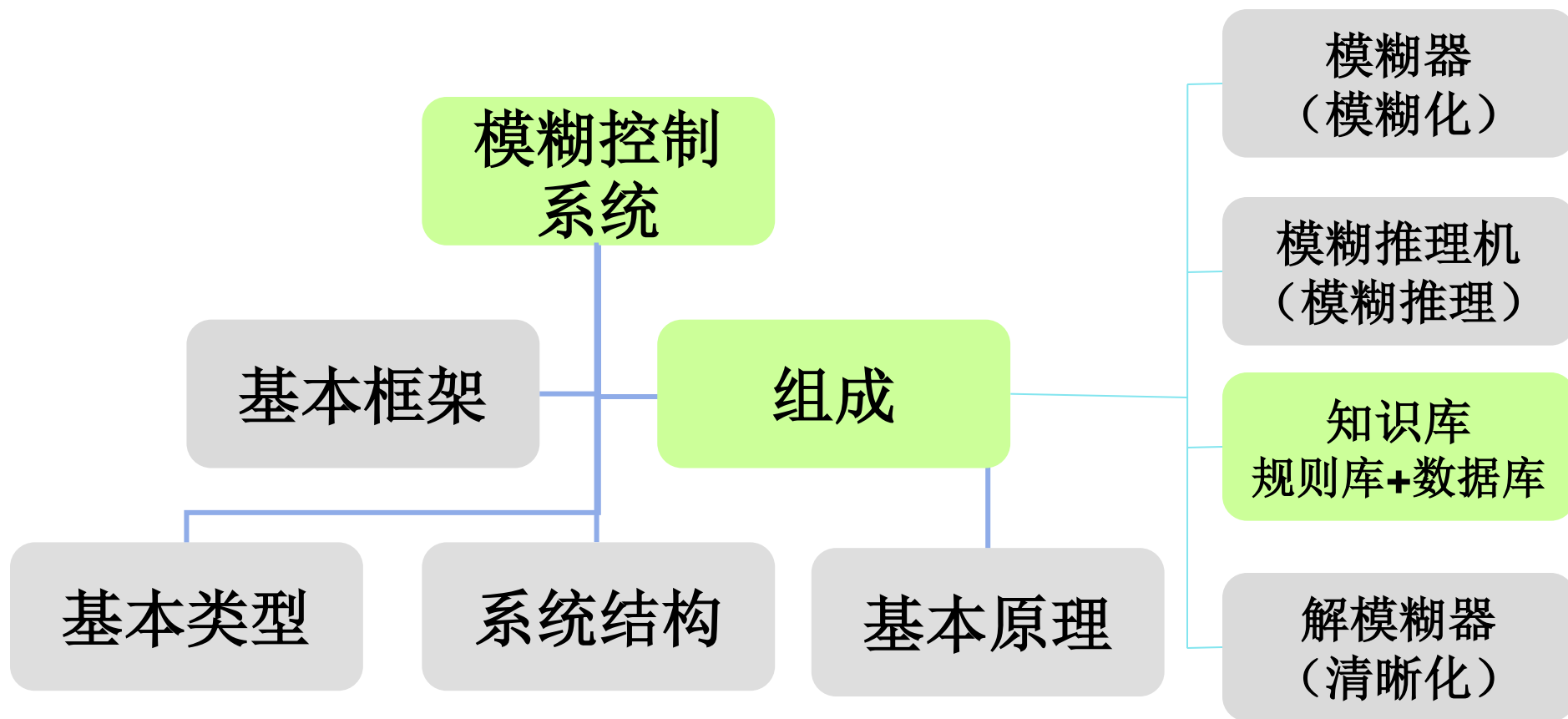
MATLAB Fuzzy Toolbox 及 Simulink 演示

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)

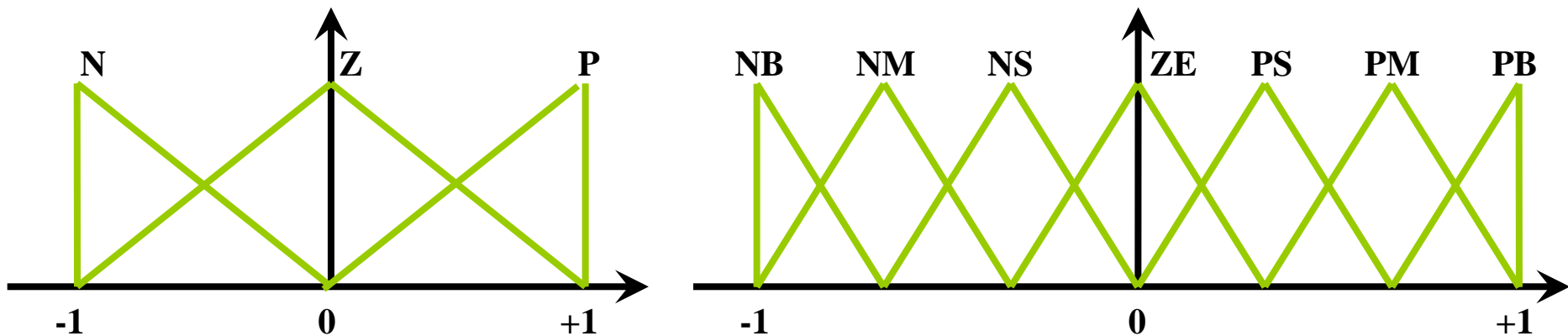
ZE (Zero , 零)

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）

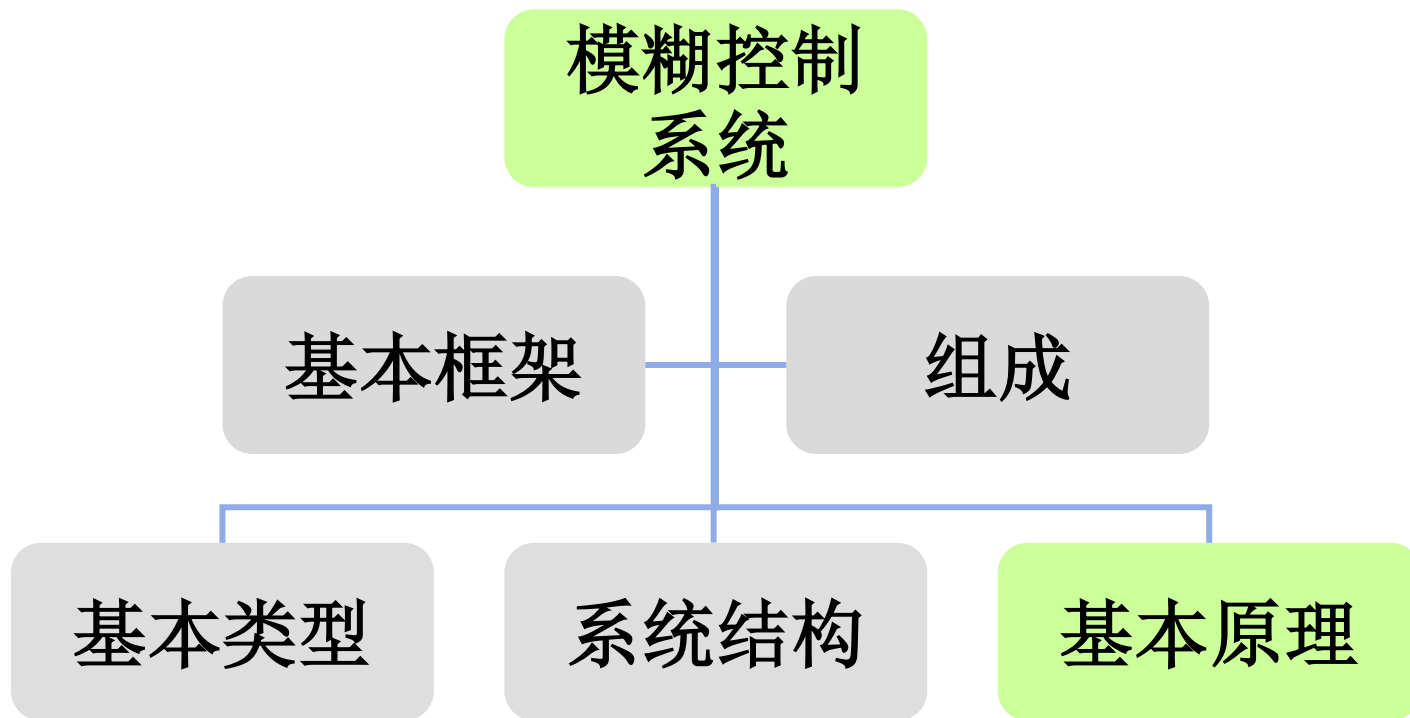
| y | | x ₂ | | |
|----------------|----|----------------|----|----|
| | | NB | ZO | PB |
| x ₁ | NB | NB | NS | ZO |
| | ZO | NS | ZO | PS |
| | PB | ZO | PS | PB |

| y | | x ₂ | | | | |
|----------------|----|----------------|----|----|----|----|
| | | NB | NS | ZO | PS | PB |
| x ₁ | 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 |

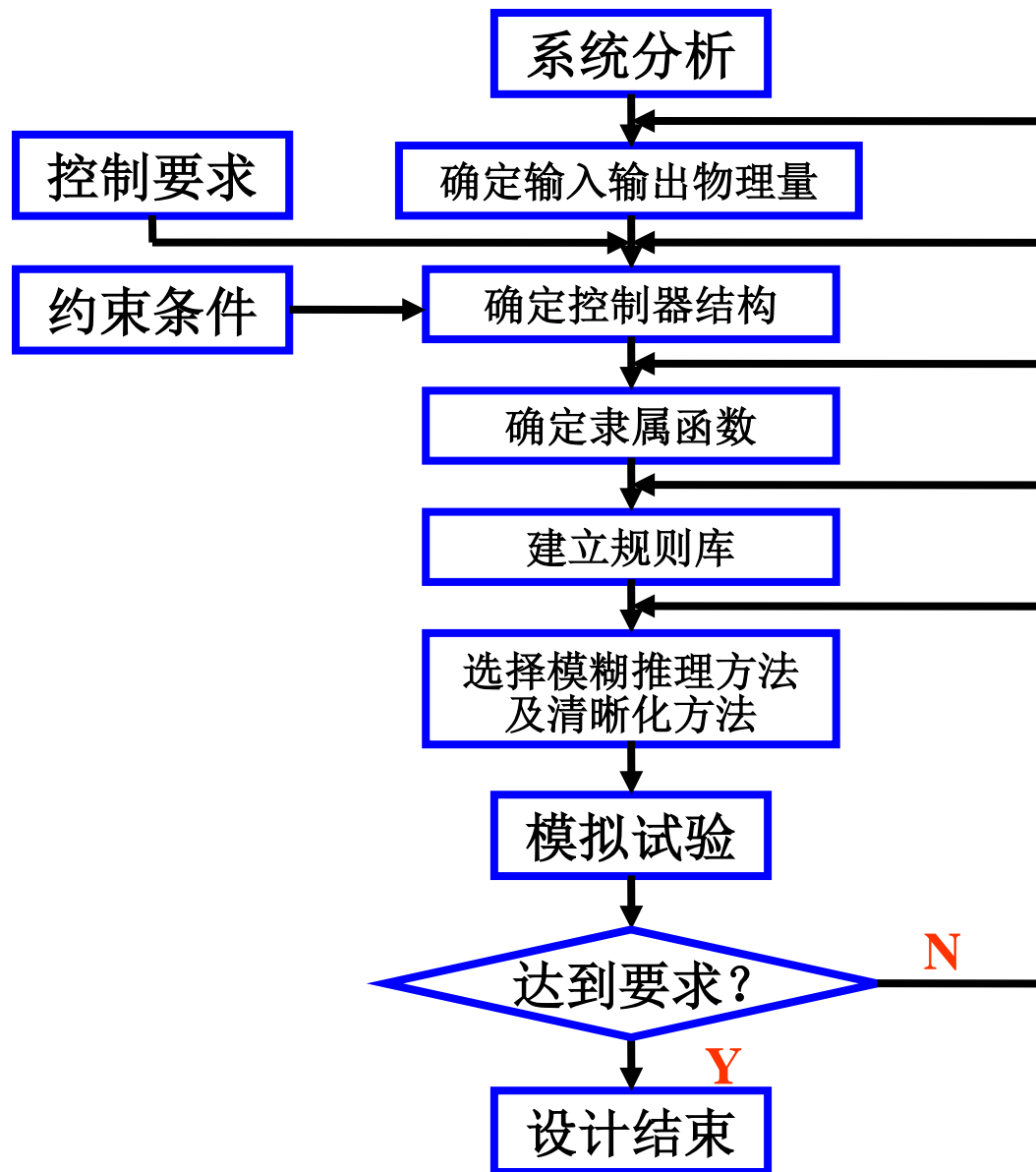
模糊控制系统



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}

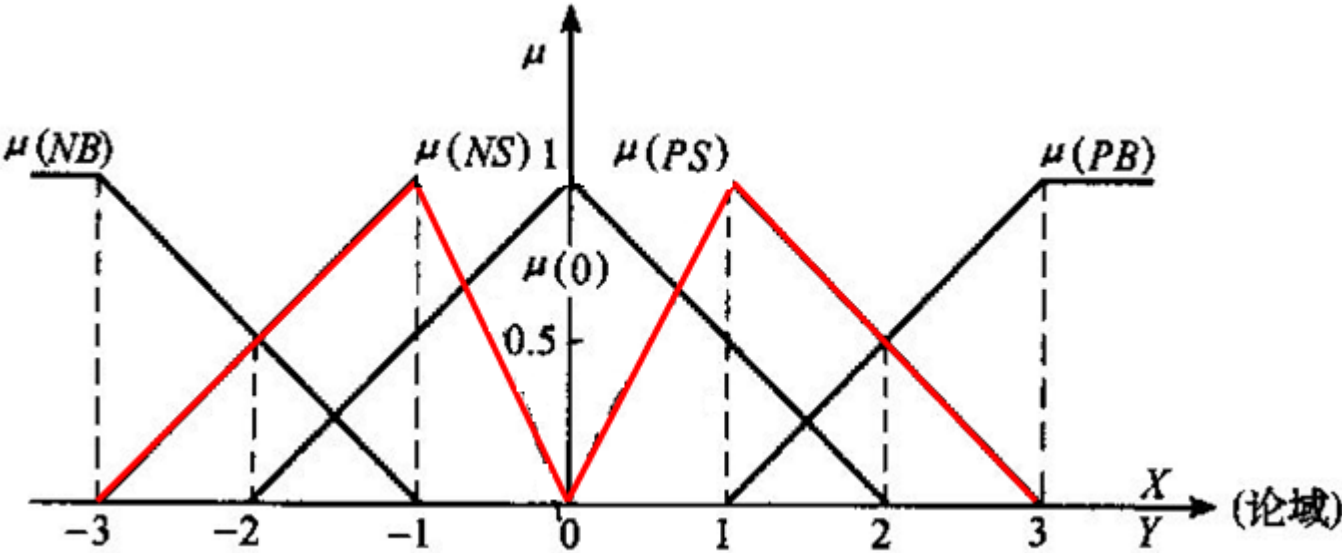
- 误差 e 的论域为 X ，控制量的论域为 Y ，把大小量分为七个等级，表示为

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

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

- 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



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

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

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{"\textasciitilde{^"}}$$

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!