

# 第3章 模糊控制器设计

- ◆ 模糊控制系统的组成
- ◆ 模糊控制系统的设计
- ◆ 模糊控制器的设计举例

# 第一节 模糊控制系统的组成

一、模糊化过程

二、知识库

三、推理决策逻辑

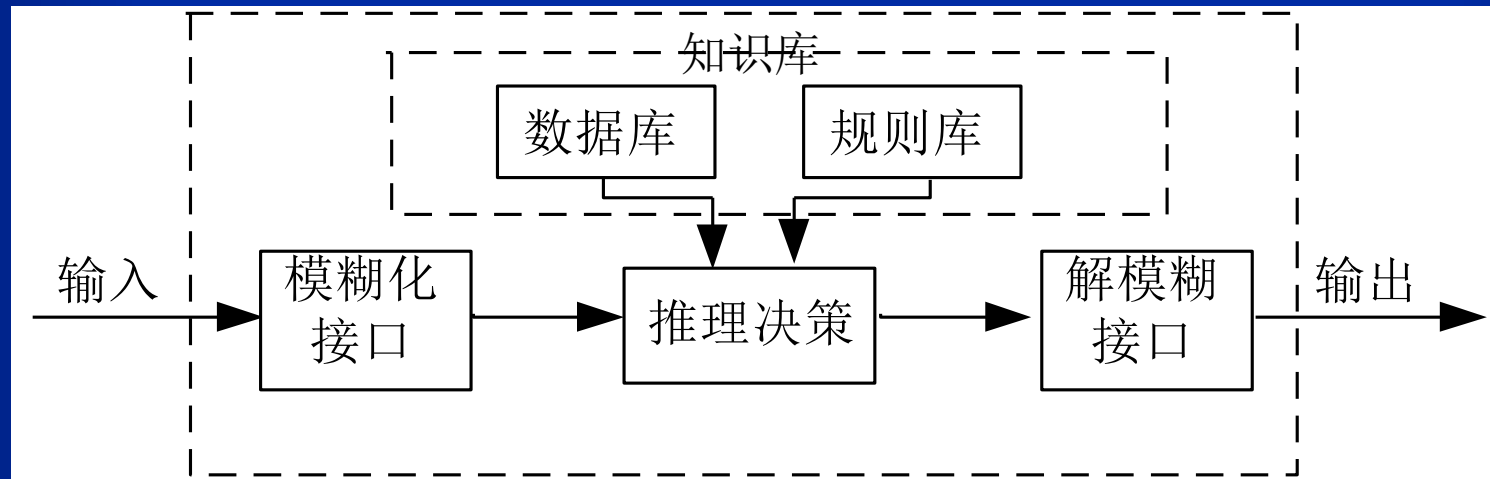
四、精确化过程

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 模糊控制系统的定义

模糊控制系统是一种自动控制系统，它是以模糊数学、模糊语言形式的知识表示和模糊逻辑推理为理论基础，采用计算机控制技术构成的一种具有闭环结构的数字控制系统。

# 第一节 模糊控制系统的组成

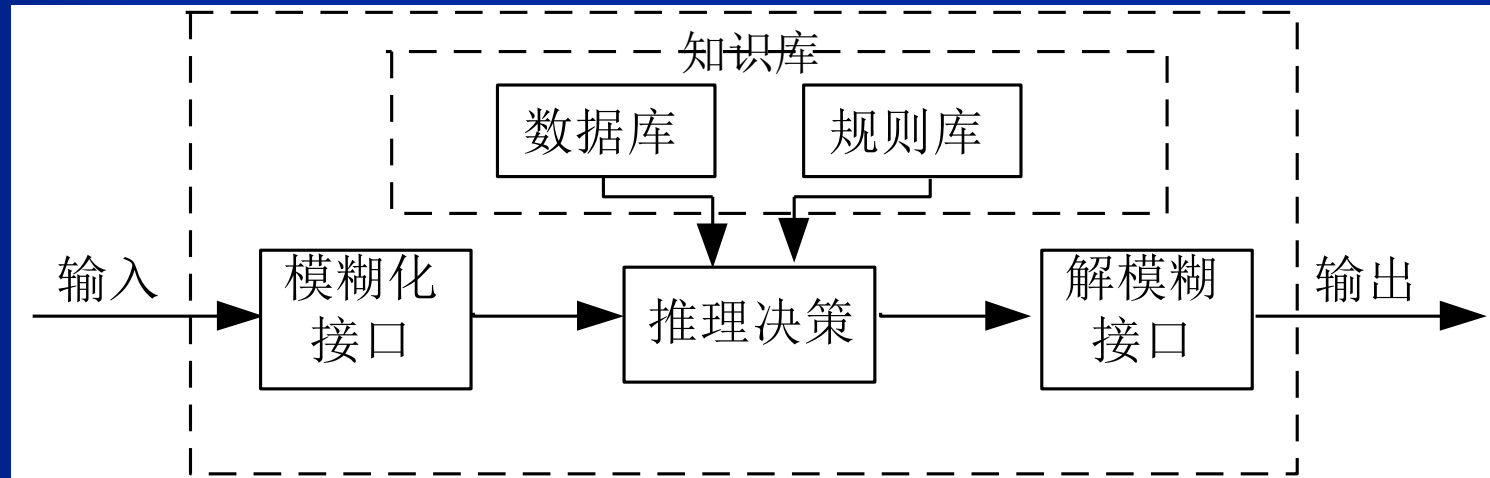


## 模糊控制系统的主要部件

- ◆ 模糊化过程（接口）
- ◆ 知识库（包含数据库和规则库）
- ◆ 推理决策机制
- ◆ 精确化计算（接口）

模糊控制是一种反映人类智慧思维的智能控制

# 第一节 模糊控制系统的组成



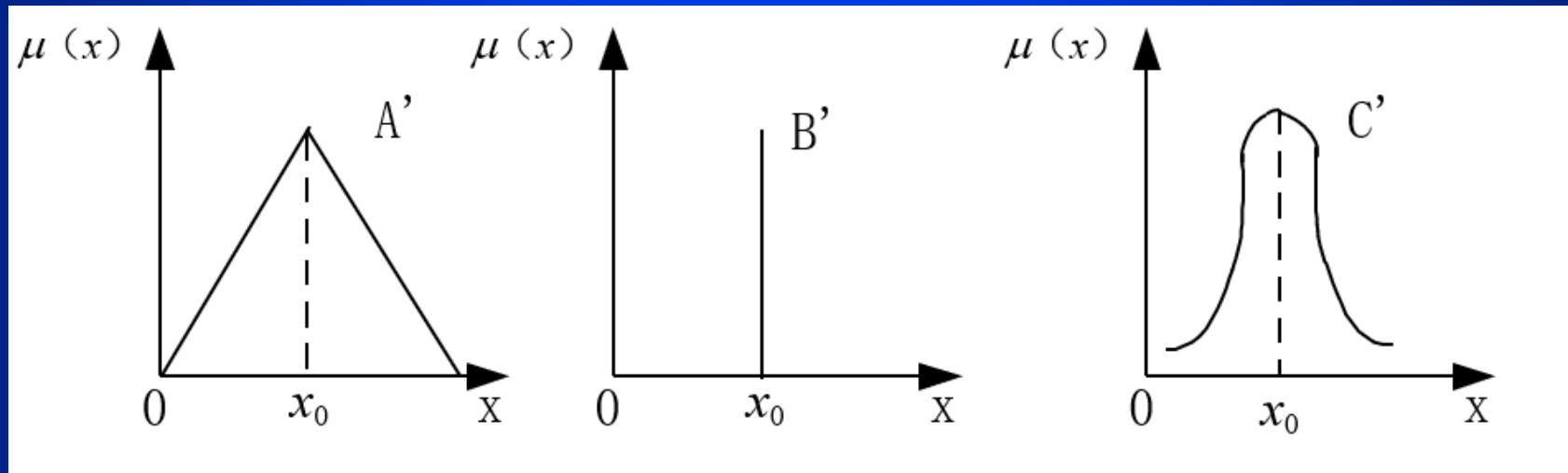
模糊控制器的三个功能：

1. 把系统的偏差从**数字量转化为模糊量**（模糊化过程、数据库两块完成）；
2. 对模糊量由给定的规则进行**模糊推理**（规则库、推理决策完成）；
3. 把推理结果的**模糊输出量**转化为实际系统能够接受的**精确数字量**或模拟量（精确化接口，**模糊数据清晰化**）

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 一、模糊化过程

模糊化过程主要完成：测量输入变量的值；并将数字表示形式的输入量转化为通常用语言值表示的某一限定码的序列（表示论域内的一个模糊子集，并由隶属度函数定义）。



常用的三种模糊化函数：三角形函数、单点模糊化和高斯函数。

单点模糊化只是形式上将清晰量变成了模糊量

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 二、知识库

知识库 { 数据库 (KB-Knowledge Base)  
规则库 (RB-Rule Base)

- A. 数据库 存放的是所有输入、输出变量的全部模糊子集的隶属度函数，因此它涉及量化等级的选择、量化方式、比例因子、模糊子集的隶属度函数。
- B. 规则库 存放全部模糊控制规则。

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 二、知识库

### 1、数据库

主要包括量化等级的选择、量化方式、比例因子和模糊子集的隶属度函数等

(1) 论域的离散化

(2) 输入输出空间的模糊划分

(3) 基本模糊子集的隶属度函数

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 二、知识库 1、数据库

### □ (1) 论域的离散化

要使计算机能够处理模糊信息，必须用模糊集合来表示。表示这种信息的模糊论域可以是连续的也可以是离散的。为了便于计算机处理，一般首先将连续的论域离散化形成离散论域。

论域的离散化实质上是一个量化过程，它通过给离散域中的特定术语赋予隶属度来定义模糊集。

量化：将一个论域离散成确定数目的几小段（量化级），每一段用某一个特定术语来描述，形成一个离散域。

例 测量误差 $e = 3.6$ ，误差的离散值3,4的隶属度值分别为 $\mu(3)$ ， $\mu(4)$ ，则当前测量误差的隶属度值可通过插值运算得到，即

$$\begin{aligned}\mu(3.6) &= \mu(3)w(3,3.6) + \mu(4)w(3.6,4) \\ &= \mu(3) \times 0.6 + \mu(4) \times 0.4\end{aligned}$$

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 二、知识库 1、数据库

### □ (2) 输入输出空间的模糊划分

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，模糊分割是要确定对于每个语言变量取值的模糊语言名称的个数，这些语言名称均具有一定的含义。如NB、NM、NS、ZE、PS、PM、PB等。

$\underline{e} = \{\text{负很大, 负大, 负中大, 负中, 负中小, 负小, 负很小, 零负, 零正, 正很小, 正小, 正中小, 正中, 正中大, 正大, 正很大}\}$   
 $= \{NVB, NB, NMB, NM, NMS, NS, NSS, NZ, PZ, PSS, PS, PMS, PM, PMB, PB, PVB\}$

模糊语言值一般以3~9个为宜

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 二、知识库 1、数据库

### □ (2) 输入输出空间的模糊划分

	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>NZ</i>	<i>PZ</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>NB</i>	<i>PB</i>		<i>PM</i>		<i>PS</i>		<i>PZ</i>	
<i>MM</i>								
<i>NS</i>								
<i>NZ</i>				<i>PZ</i>				
<i>PZ</i>					<i>NZ</i>			
<i>PS</i>	<i>NZ</i>		<i>NS</i>		<i>MM</i>		<i>NB</i>	
<i>PM</i>								
<i>PB</i>								

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 二、知识库 1、数据库

### □ (3) 基本模糊子集的隶属度函数

数字表示，适用于论域是离散的情况；  
函数表示，适用于论域是连续的情况。

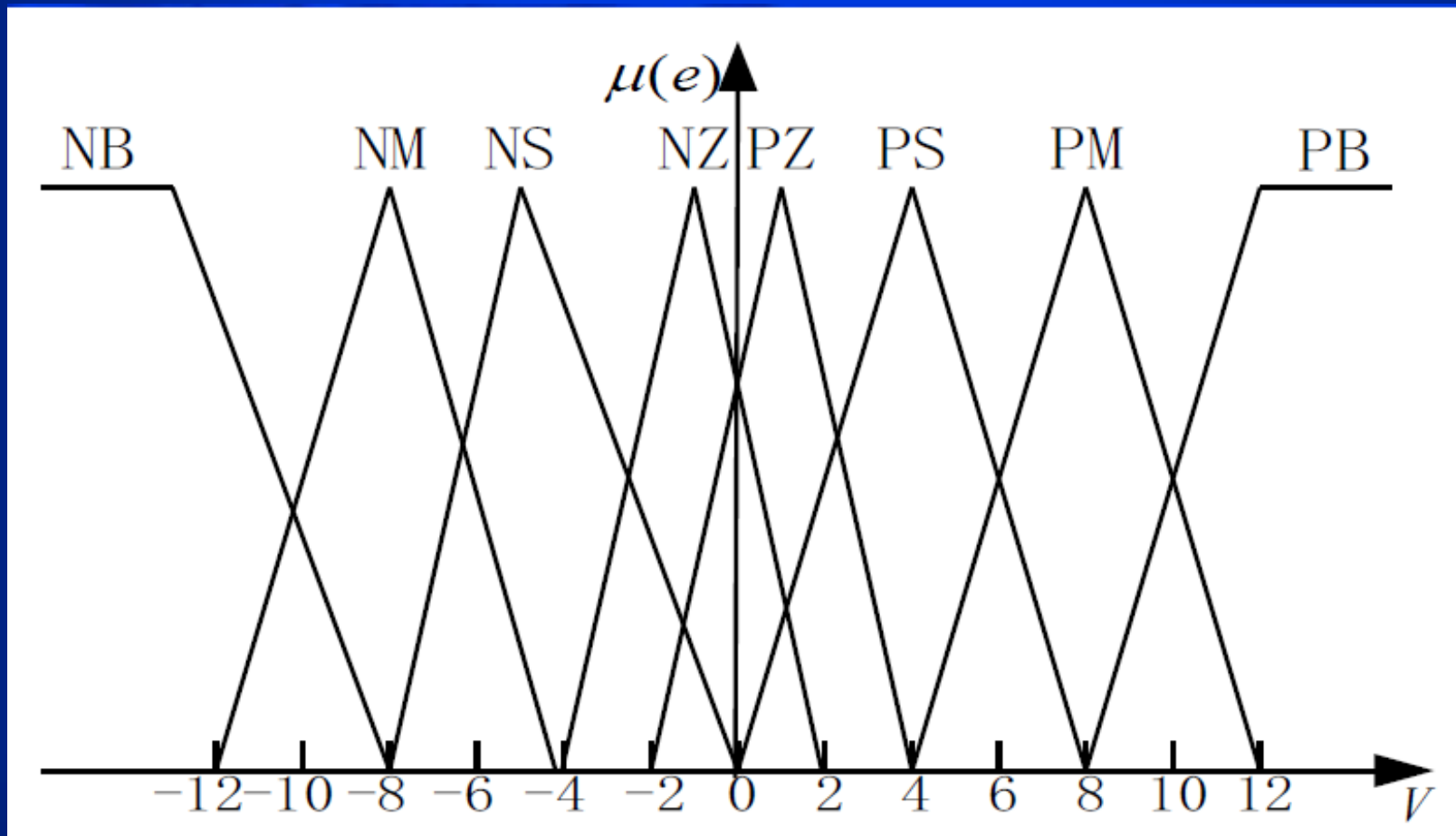
隶属度 等级 e子集	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NB	1	0.75	0.5	0.25	0	0																			
NM	0	0.25	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0.25	0	0															
NS					0	0.25	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0.25	0	0											
NZ									0	0.33	0.67	1	0.67	0.33	0	0									
PZ										0	0.33	0.67	1	0.67	0.33	0	0								
PS												0	0.25	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0.25	0	0				
PM															0	0.25	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0.25	0	0	
PB																			0	0.25	0.5	0.75	0	0	

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 二、知识库 1、数据库

### □ (3) 基本模糊子集的隶属度函数

隶属度函数的形状主要为三角形、梯形或高斯形。



# 第一节 模糊控制系统的组成

## 二、知识库

### 2、规则库

用一系列模糊条件描述的模糊控制规则就构成模糊控制规则库。

(1) 过程状态输入变量和输出变量的选择

(2) 模糊控制规则的建立

(3) 模糊控制规则的完整性，兼容性，干扰性

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 二、知识库

### 2、规则库

#### (2) 模糊控制规则的建立

- ① 专家经验法
- ② 基于模糊模型的控制
- ③ 自组织法

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 二、知识库

### 2、规则库 (2) 模糊控制规则的建立

#### ① 专家经验法

通过对专家控制经验的咨询形成控制规则库。

(1) 典型地，取系统的状态、系统的误差 $e$ 、误差变化 $c$ 等。

$R_1$  : If  $E$  is NB and  $EC$  is NB, then  $U$  is PB.

$R_2$  : If  $E$  is NB and  $EC$  is NM, then  $U$  is PB

$R_3$  : If  $E$  is NB and  $EC$  is NS, then  $U$  is PM

⋮

$R_n$  : If  $E$  is ... and  $EC$  is ..., then  $U$  is ...

常用关系词为if-then, also(或or), and, else, 等

if——部分——“**前提部**”  $E$ 为PZ、PS、PM、PB、NZ、NS、M、NB

then——部分——“**结论部**”  $EC$ 为PZ、PS、PM、PB、NZ、NS、M、NB

类似的规则有  $n^2 = 8^2 = 64$  条

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 二、知识库

### 2、规则库 (2) 模糊控制规则的建立

#### ② 基于模糊模型的控制

“IF-THEN”——即通过建立被控对象的模糊模型来实现

例：设被控对象用以下六个控制规律描述

规律1: 如果 $Y_n = PM$ 且 $U_n = PM$ 那么 $Y_{n+1} = PB$

规律2: 如果 $Y_n = PM$ 且 $U_n = NM$ 那么 $Y_{n+1} = PS$

规律3: 如果 $Y_n = PS$ 且 $U_n = NS$ 那么 $Y_{n+1} = ZE$

规律4: 如果 $Y_n = NS$ 且 $U_n = PS$ 那么 $Y_{n+1} = ZE$

规律5: 如果 $Y_n = NM$ 且 $U_n = PM$ 那么 $Y_{n+1} = NS$

规律6: 如果 $Y_n = NM$ 且 $U_n = NM$ 那么 $Y_{n+1} = NB$

$Y$ 是输出， $U$ 是控制， $n$ 是离散时间

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 二、知识库

### 2、规则库 (2) 模糊控制规则的建立

#### ② 基于模糊模型的控制

$Y$ 是输出， $U$ 是控制， $n$ 是离散时间

如果控制的目的是使输出 $Y$ 为零，

如果 $Y_{n-1} = ZE$  且  $Y_n = PS$ ，这时要求 $Y_{n+1} = ZE$ ，求 $U$ ？

**规律3：** 如果 $Y_n = PS$ 且 $U_n = NS$ 那么 $Y_{n+1} = ZE$

**规律4：** 如果 $Y_n = NS$ 且 $U_n = PS$ 那么 $Y_{n+1} = ZE$

找到规律3，如果 $Y_{n-1} = ZE$  且  $Y_n = PS$ ，由此可以导出控制规则 $U = NS$ 。

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 二、知识库

### 2、规则库 (2) 模糊控制规则的建立

#### ③ 自组织法

自组织模糊控制器能够在没有先验知识和很少有先验知识的情况下，通过对观察系统的输入输出关系建立控制规则库。

随着环境的变化或经验的丰富更新原有的控制规则以获得更佳的控制效果，有自学习和自适应的性能。

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 三、推理决策逻辑

推理决策逻辑是模糊控制的核心，它利用知识库的信息模拟人类的推理决策过程，给出适合的控制量。

**详见第2章，Zadeh、Mamdani推理**

## 四、精确化过程

- 1、最大隶属度函数法
- 2、重心法
- 3、加权平均法

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 四、精确化过程

### 1、最大隶属度函数法

取所有规则推理法结果的模糊集合中隶属度最大的那个元素作为输出值，即

$$v_0 = \max_{v \in V} \mu_v(v)$$

如果最大隶属度对应的输出值多于一个时，取其平均

$$v_0 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J v_j \quad v_j = \max_{v \in V} (\mu_v(v)) \quad J = |\{v\}|$$

$J$  为具有相同最大隶属度输出的总数。

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 四、精确化过程

### 2、重心法

取模糊隶属度函数曲线与横坐标围成面积的重心为最终输出值。

$$v_0 = \frac{\int_v v \mu_v(v) dv}{\int_v \mu_v(v) dv} \quad (\text{连续域}) ; \quad u_0 = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_v(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_v(v_k)} \quad (\text{离散域})$$

例：用重心法计算精确值 $z_1, z_2$

$$z_1 = \frac{0.1 \times 2 + 0.4 \times 3 + 0.7 \times 4 + 1 \times 5 + 0.7 \times 6 + 0.3 \times 7}{0.1 + 0.4 + 0.7 + 1 + 0.7 + 0.3} = 4.84$$

$$z_2 = \frac{0.3 \times (-4) + 0.8 \times (-3) + 1 \times (-2) + 1 \times (-1) + 0.8 \times 0 + 0.3 \times 1 + 0.1 \times 2}{0.3 + 0.8 + 1 + 1 + 0.8 + 0.3 + 0.1}$$

$$= -1.42$$

# 第一节 模糊控制系统的组成

## 四、精确化过程

### 3、加权平均法

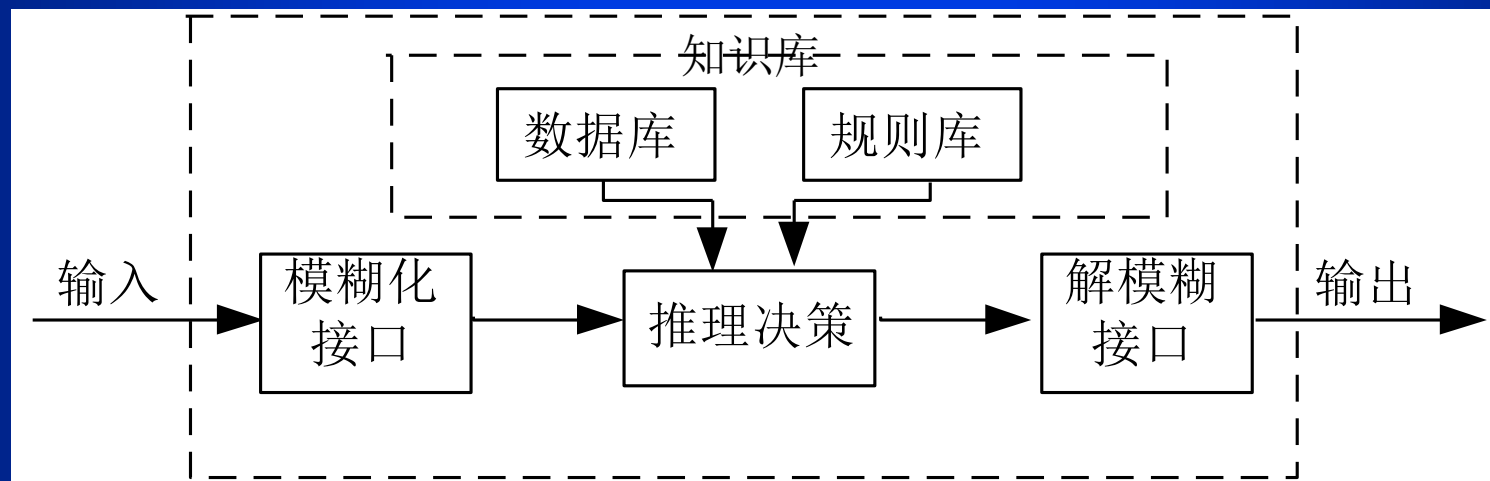
其输出值由下式决定：

$$v_0 = \frac{\sum_{i=1}^m v_i k_i}{\sum_{i=1}^m k_i}$$

系数 $k_i$ 的选择要根据实际情况决定，当系数取为 $\mu_v(v_i)$ 时，即取其隶属度函数值时，就转化为重心法了。

# 第一节 模糊控制系统的组成

综上，模糊逻辑控制主要有3个步骤：模糊化过程、模糊逻辑推理、精确化计算。



模糊控制器组成

## 第二节 模糊控制系统的设计

一、模糊控制器的结构设计

二、模糊控制器的设计原则

三、模糊控制器的常规设计方法

# 第二节 模糊控制系统的设计

## 一、模糊控制器的结构设计

所谓模糊控制器的结构是指输入输出变量、模糊化算法、模糊推理规则和精确化计算方法。

### 1、单输入-单输出模糊控制结构

- (1) 一维模糊控制器
- (2) 二维模糊控制器
- (3) 多维模糊控制器

### 2、多输入-多输出模糊控制结构

所谓单输入-单输出模糊控制结构指的是被控对象是单输入-单输出系统，而多维模糊控制器指的是模糊逻辑控制器条件部中语言变量的多少。

# 第二节 模糊控制系统的设计

## 一、模糊控制器的结构设计

### 1、单输入-单输出模糊控制结构

#### (1) 一维模糊控制器

输入输出语言变量只有一个，如输入变量为 $e$ 、输出变量为 $u$ 。模糊控制规则一般是：

$R_1$ : 如果 $e$ 是 $E_1$ ，则 $u$ 是 $U_1$

$R_2$ : 否则如果 $e$ 是 $E_2$ ，则 $u$ 是 $U_2$

$R_n$ : 否则如果 $e$ 是 $E_n$ ，则 $u$ 是 $U_n$

总的模糊蕴含关系

$$R(e, u) = \bigcup_{i=1}^n E_i \times U_i$$

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 一、模糊控制器的结构设计

#### 1、单输入-单输出模糊控制结构

##### (2) 二维模糊控制器

输入变量有两个, 输出变量仍然是一个, 模糊规则描述为:

$R_1$ : 如果 $e$ 是 $E_1$ 和 $de$ 是 $DE_1$ , 则 $u$ 是 $U_1$

$R_2$ : 否则如果 $e$ 是 $E_2$ 和 $de$ 是 $DE_2$ , 则 $u$ 是 $U_2$

⋮

$R_n$ : 否则如果 $e$ 是 $E_n$ 和 $de$ 是 $DE_n$ , 则 $u$ 是 $U_n$

总的模糊关系为:

$$R(e, de, u) = \bigcup_{i=1}^n (E_i \times DE_i) \times U_i$$

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 一、模糊控制器的结构设计

#### 1、单输入-单输出模糊控制结构

##### (3) 多维模糊控制器

由于输入维数的增加导致了控制规则的复杂化、控制算法的复杂化。

由于还没有解决多维模糊控制系统规则的冗余性、兼容性等的有效方法，因此，目前多维模糊控制器并不常见。

# 第二节 模糊控制系统的设计

## 一、模糊控制器的结构设计

### 2、多输入-多输出模糊控制结构

- 多输入-多输出模糊控制器有多个独立的输入变量和一个或多个输出变量。
- 如果每个输入变量又引出多维输入信息，那么模糊控制器的输入个数将会急剧增加，对应的模糊控制规则的推理语句维数随着输入变量的增加呈指数增加，直接建立这种系统的控制规则十分困难。
- 常见处理方法：已知样本数据  $(X_1, X_2, Y_1, Y_2, Y_3)$ ，则可将其变换为  $(X_1, X_2, Y_1)$ ,  $(X_1, X_2, Y_2)$ ,  $(X_1, X_2, Y_3)$ 。
- 把多输入-多输出模糊控制结构化为多输入-单输出模糊控制结构，然后可以用单输入-单输出模糊控制系统的设计方法进行，这就是多变量控制系统的模糊解耦问题。
- 目前还没有有一套比较完整的理论来指导系统的设计。

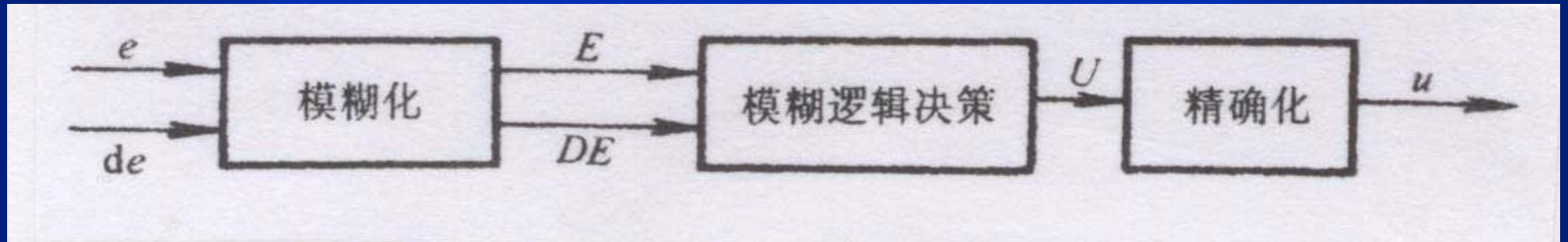
# 第二节 模糊控制系统的设计

## 二、模糊控制器的设计原则

- 1、定义输入输出变量
- 2、定义所有变量的模糊化条件
- 3、设计控制规则库
- 4、设计模糊推理结构
- 5、选择精确化策略的方法

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法



假定模糊控制器的输入量为系统的误差 $e$ 和误差变化 $de$ ，输出量为系统控制值 $u$ 。则模糊控制器的工作过程可以描述为：

1. 首先将模糊控制器的输入量转化为模糊量供模糊逻辑决策系统用；
2. 模糊逻辑决策器根据控制规则决定的模糊关系 $R$ ，应用模糊逻辑推理算法得出控制器的模糊输出控制量；
3. 最后经精确化计算得到精确的控制值去控制被控对象。

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法

对于 $n$ 条模糊控制规则可以得到 $n$ 个输入输出关系矩阵 $R_1, R_2, \dots, R_n$ ,由模糊规则的合成算法可得系统总的模糊关系矩阵为:

$$R = \bigcup_{i=1}^n R_i$$

则对于任意系统误差 $E_i$ 和系统误差变化 $DE_j$ , 其对应的模糊控制器输出 $C_{ij}$ 为:

$$C_{ij} = (E_i \times DE_j) \circ R$$

对 $C_{ij}$ 再进行精确化计算就可以去直接控制系统对象了。

## 第二节 模糊控制系统的设计

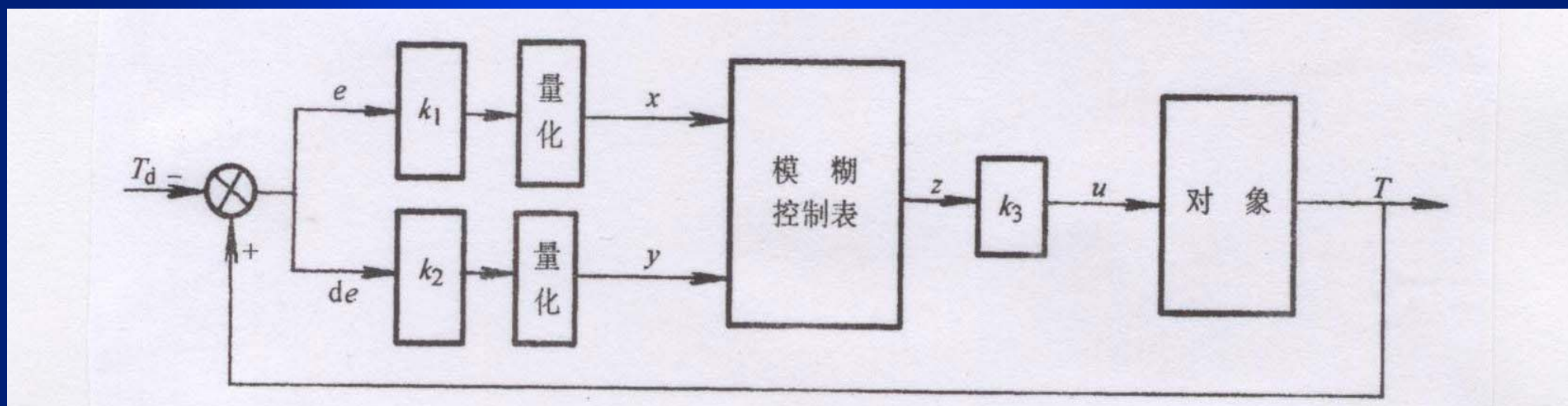
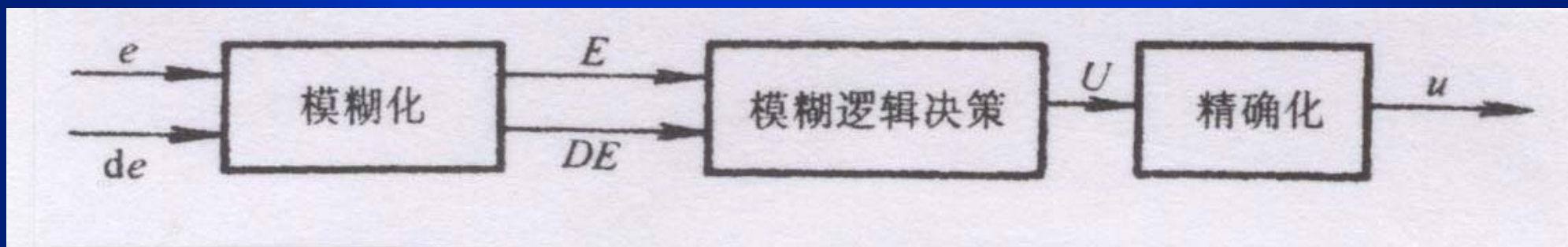
### 三、模糊控制器的常规设计方法

#### 查表法

查表法的基本思想是通过离线计算取得一个模糊控制表（如加热炉的温度控制系统）在模糊控制器进行工作时，计算机只需直接根据采样的误差和误差变化的量化值来找出当前时刻的控制输出量化值，再乘以比例因子得到最终的输出控制量。

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法



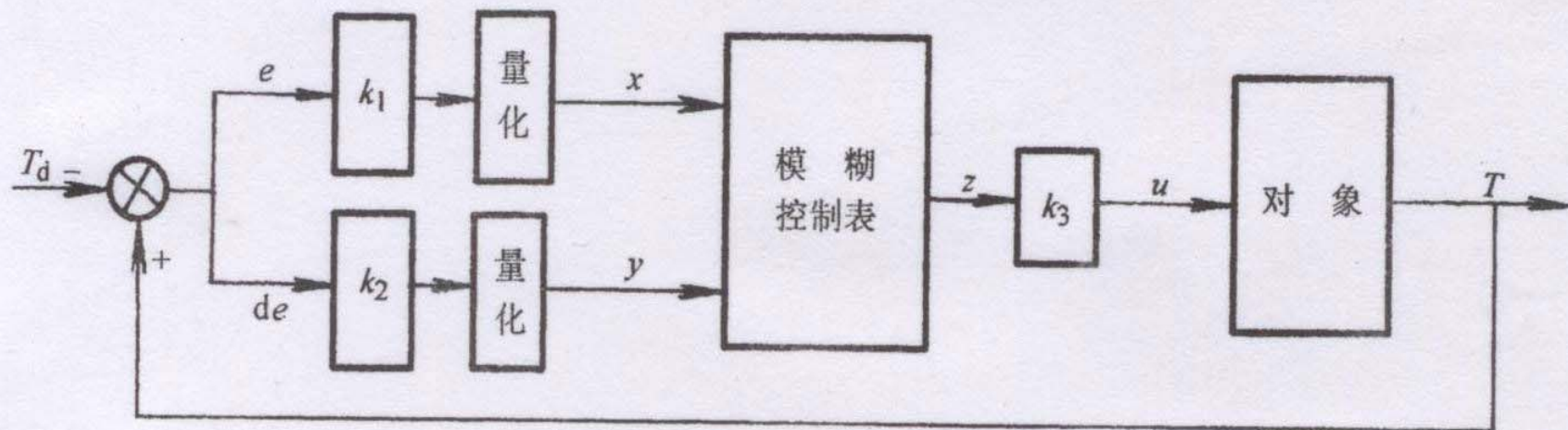
## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法

具体设计步骤：

#### 1、确定模糊控制器的输入输出变量

选用系统的实际温度 $T$ 与温度给定值 $T_d$ 的误差 $e=T-T_d$ ，及误差变化 $de$ 作为输入语言变量，把控制加热装置的供电电压 $u$ 选作输出语言变量，这样构成了一个二维模糊控制器。



## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法

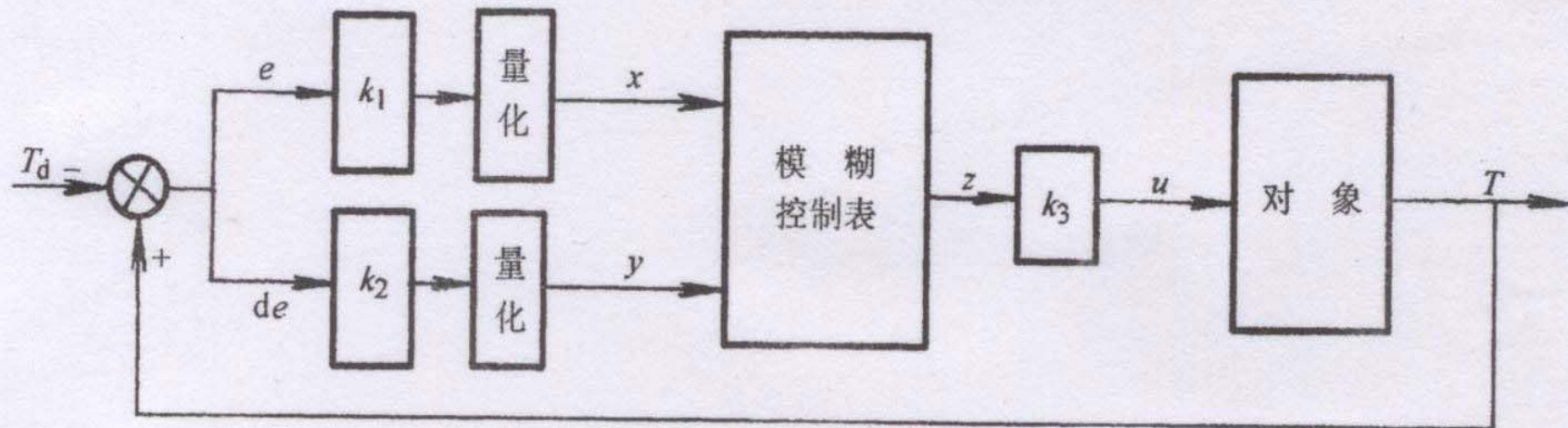
- 2、确定输入、输出变量的论域，量化等级和量化因子  $k_1, k_2, k_3$ ，三个语言变量量化等级都为9

$$x, y, z = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$$

由  $e$  的论域为  $[-50, 50]$ ;  $de$  为  $[-150, 150]$ ;  $u \in [-64, 64]$

则各比例因子为:

$$k_1 = 4/50 = 2/25, \quad k_2 = 4/150 = 2/75, \quad k_3 = 64/4 = 16$$



## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法

3、在各输入输出语言变量的量化域内定义模糊集。

首先确定各语言变量论域内都取5个模糊子集即：**PB**、**PS**、**ZE**、**NS**、**NB**，各语言变量模糊子集通过隶属度函数定义，量化方式采用了非线性量化以提高稳态点控制精度。

误差 $e$	-50	-30	-15	-5	0	5	15	30	50
误差率 $de$	-150	-90	-30	-10	0	10	30	90	150
控制 $v$	-64	-16	-4	-2	0	2	4	16	64
量化等级	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
状态变量	相关隶属度函数								
$PB$	0	0	0	0	0	0	0	0.35	1
$PS$	0	0	0	0	0	0.4	1	0.4	0
$ZE$	0	0	0	0.2	1	0.2	0	0	0
$NS$	0	0.4	1	0.4	0	0	0	0	0
$NB$	1	0.35	0	0	0	0	0	0	0

模糊集的隶属度函数

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法

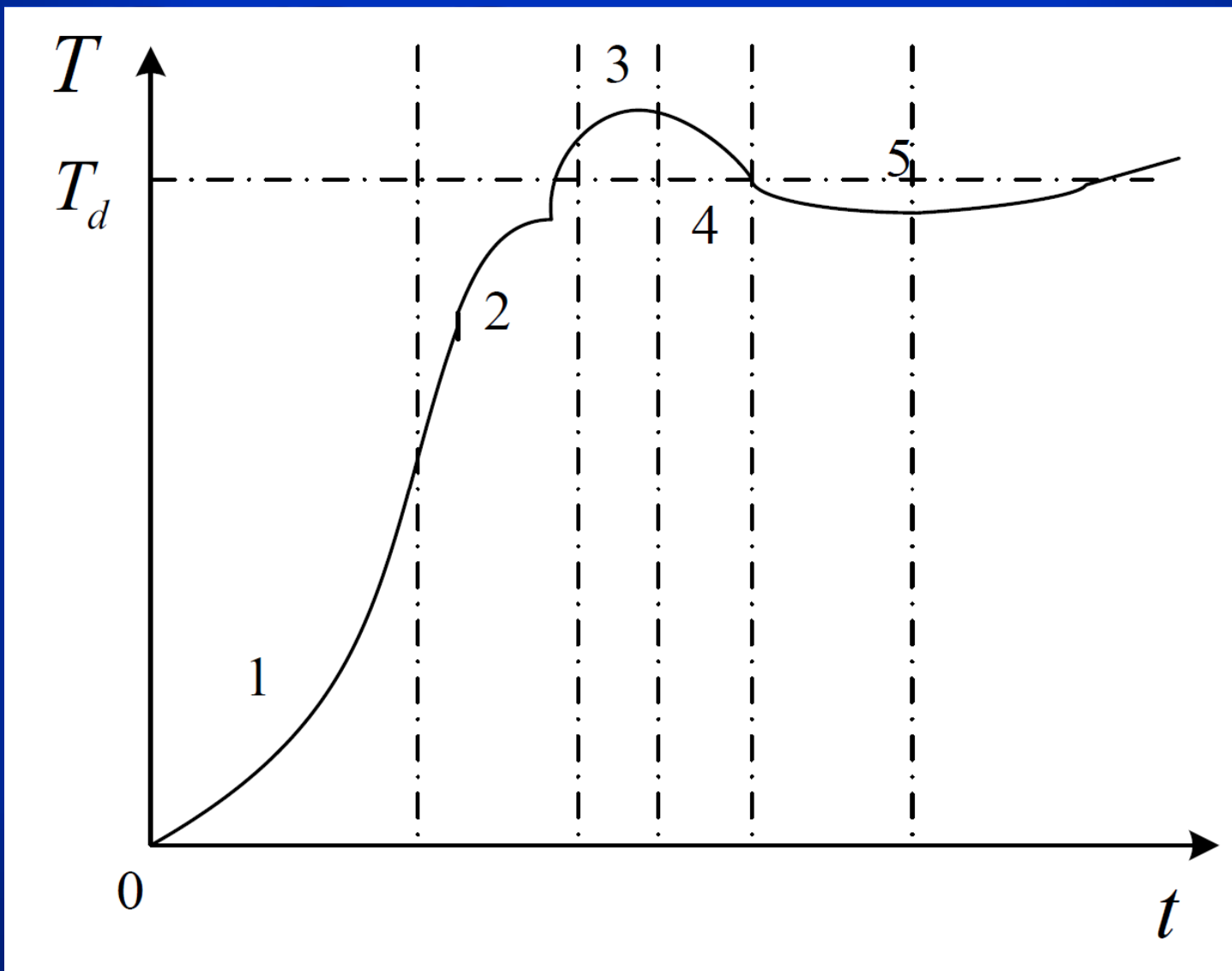
#### 4、模糊控制规则的确定

模糊控制规则实质上是将操作员的控制经验加以总结，而得出一条条模糊条件语句的集合。确定模糊控制规则的原则是必须保证控制器的输出能够使系统输出响应的动静态特性达到最佳。设控制系统的响应曲线如图3-6所示。

## 第二节 模糊控制系统的设计

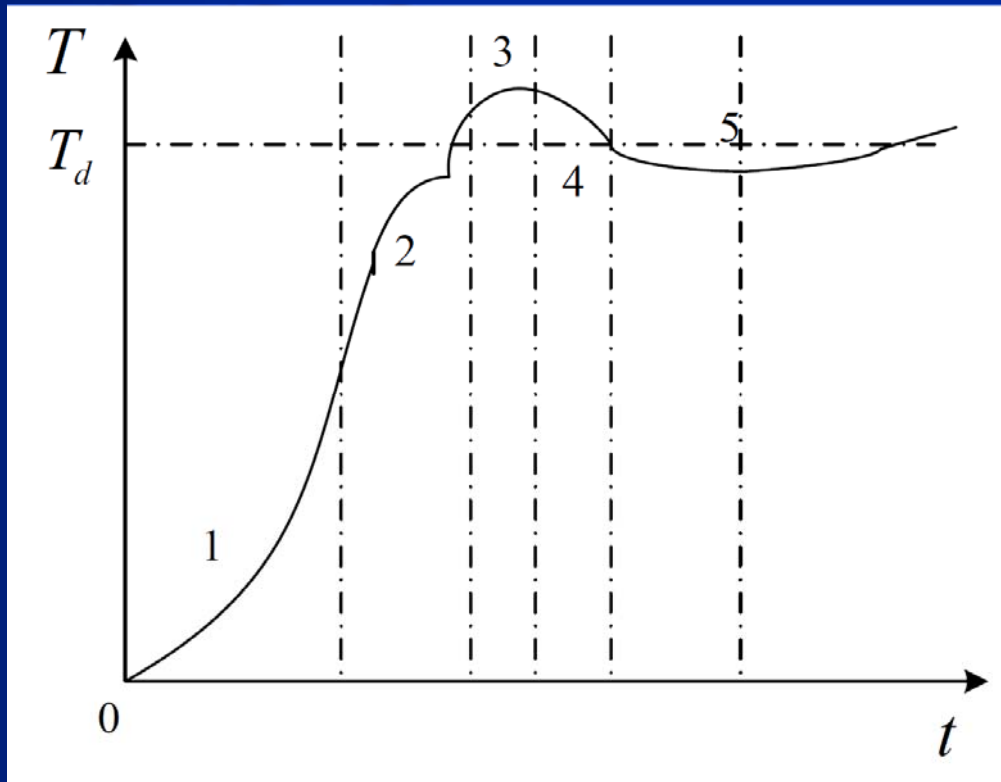
### 三、模糊控制器的常规设计方法

图3-6



## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法



#### 曲线第1段:

考虑误差  $e = T - T_d$  为负的情况  
当  $e$  为负大 (NB) 时, 此时无论  $de$  的值如何, 为了消除偏差应使控制量加大。所以控制量  $u$  应取正大 (PB)。

规则1: 如果误差  $e$  是 NB、且误差变化  $de$  是 PB, 则控制  $U$  为 PB;

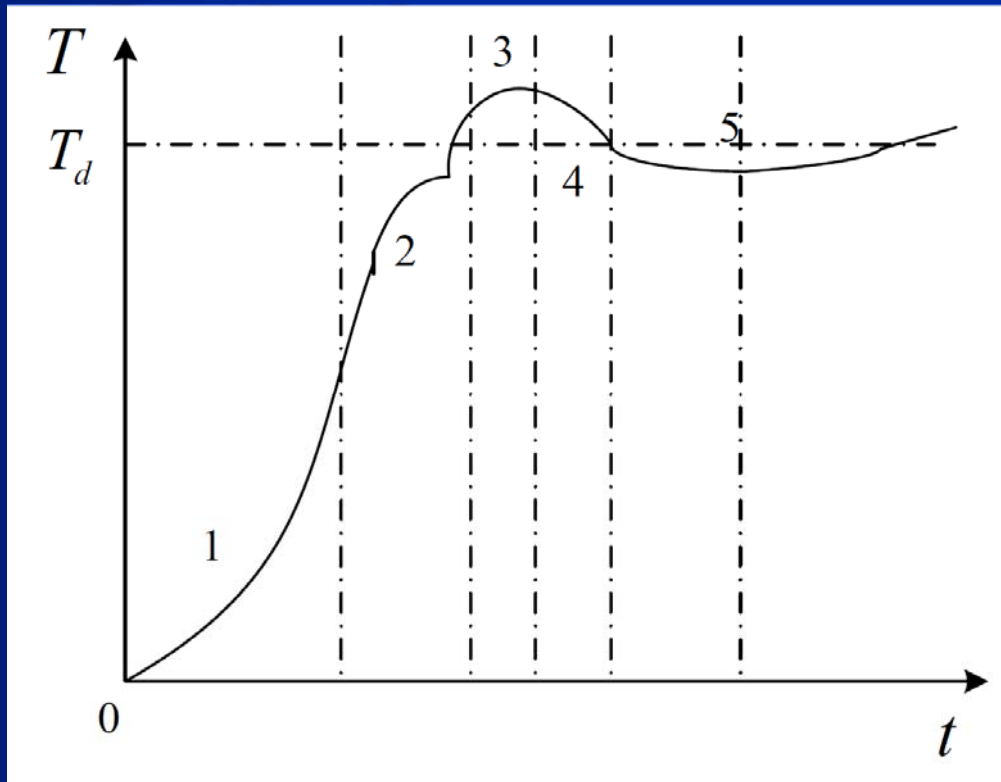
规则2: 如果误差  $e$  是 NB、且误差变化  $de$  是 PS, 则控制  $U$  为 PB;

规则3: 如果误差  $e$  是 NB、且误差变化  $de$  是 ZE, 则控制  $U$  为 PB;

规则4: 如果误差  $e$  是 NB、且误差变化  $de$  是 NS, 则控制  $U$  为 PB;

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法



#### 曲线的第2-4段:

当误差为负小或零时，主要矛盾转化为系统的稳定性问题。为了防止超调过大并使系统尽快稳定，就要根据误差的变化来确定控制量的变化。若为正，表明误差有减小的趋势，所以可取较小的控制量。

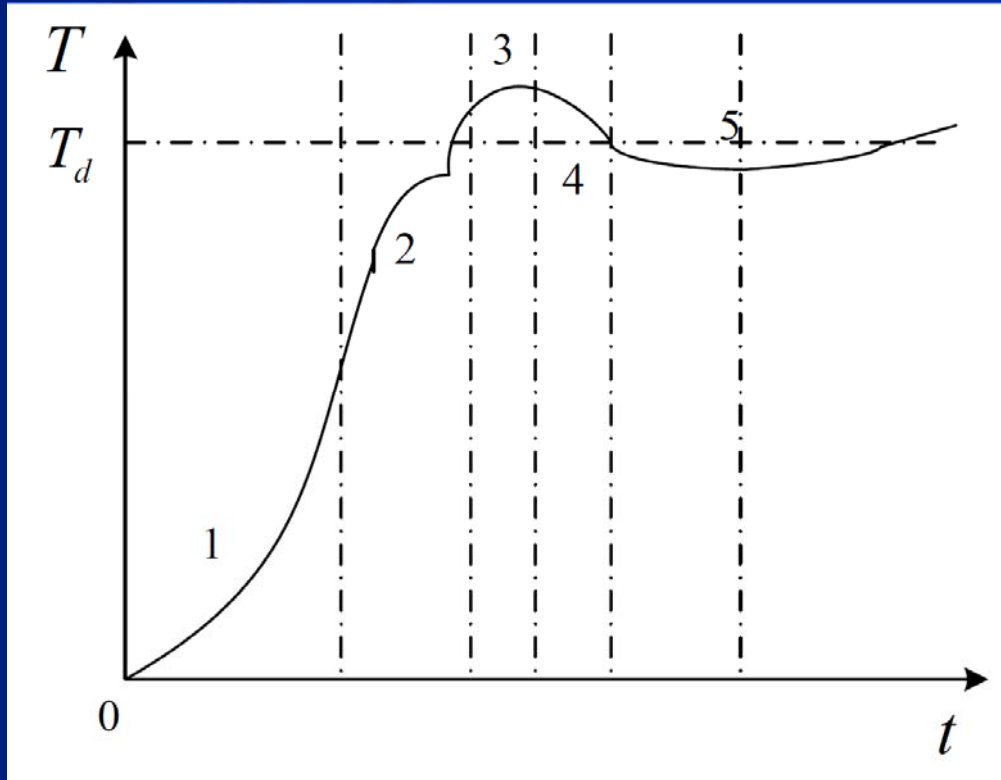
规则5: 如果误差 $e$ 是NS、且误差变化 $de$ 是ZE, 则控制 $U$ 为PS;

规则6: 如果误差 $e$ 是NS、且误差变化 $de$ 是PS, 则控制 $U$ 为ZE;

规则7: 如果误差 $e$ 是NS、且误差变化 $de$ 是PB, 则控制 $U$ 为NS;

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法



#### 曲线的第2-4段:

当误差为负小或零时，主要矛盾转化为系统的稳定性问题。为了防止超调过大并使系统尽快稳定，就要根据误差的变化来确定控制量的变化。若为正，表明误差有减小的趋势，所以可取较小的控制量。

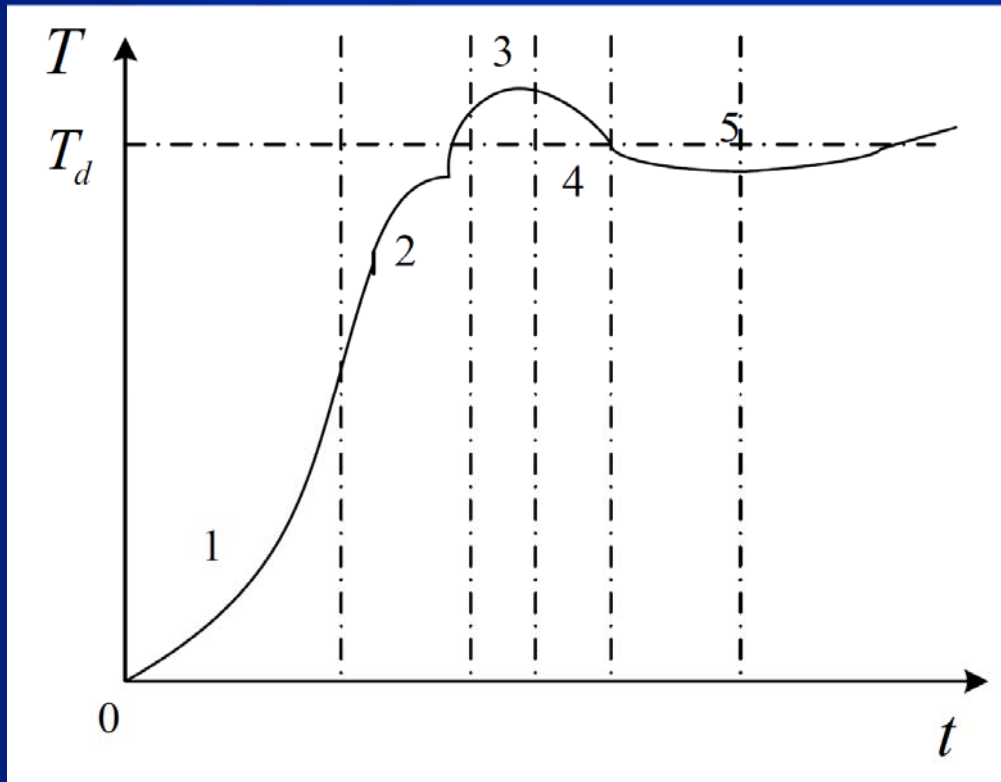
规则8：如果误差 $e$ 是ZE、且误差变化 $de$ 是ZE，则控制 $U$ 为ZE；

规则9：如果误差 $e$ 是ZE、且误差变化 $de$ 是PS，则控制 $U$ 为NS；

规则10：如果误差 $e$ 是ZE、且误差变化 $de$ 是PB，则控制 $U$ 为NB；

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法



#### 曲线第5段:

当误差变化为负时，偏差有增大的趋势，这时应使控制量增加，防止偏差进一步增加。

规则11: 如果误差 $e$ 是NS、且误差变化 $de$ 是NS，则控制 $U$ 为PS；

规则12: 如果误差 $e$ 是NS、且误差变化 $de$ 是NB，则控制 $U$ 为PB；

规则13: 如果误差 $e$ 是ZE、且误差变化 $de$ 是NS，则控制 $U$ 为PS；

规则14: 如果误差 $e$ 是ZE、且误差变化 $de$ 是NB，则控制 $U$ 为PB。

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法

根据系统工作的特点，当误差 $e$ 和误差变化 $de$ 同时变号时，控制量的变化也应变号，这样就可以得出剩余的9条规则了。所有的控制规则库如下表所示。

		$U$				
$DE \backslash E$	$E$	$NB$	$NS$	$ZE$	$PS$	$PB$
$NB$		$PB$	$PB$	$PB$	$PS$	$NB$
$NS$		$PB$	$PS$	$PS$	$ZE$	$NB$
$ZE$		$PB$	$PS$	$ZE$	$NS$	$NB$
$PS$		$PB$	$ZE$	$NS$	$NS$	$NB$
$PB$		$PB$	$NS$	$NB$	$NB$	$NB$

模糊控制规则库

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法

#### 5、求模糊控制表

模糊控制规则表必须对所有输入语言变量（如误差、误差变化）量化后的各种组合通过模糊逻辑推理的一套方法离线计算出每一个状态的模糊控制器输出，最终生成一张模糊控制表。

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法

设系统误差 $e$ 的量化值为1，误差变化 $de$ 的量化值为-2

对于误差 $e$ :  $\mu_{ZE}(1) = 0.2$ ,  $\mu_{PS}(1) = 0.4$

误差变化 $de$ :  $\mu_{NS}(-2) = 1$

误差 $e$	-50	-30	-15	-5	0	5	15	30	50
误差率 $de$	-150	-90	-30	-10	0	10	30	90	150
控制 $v$	-64	-16	-4	-2	0	2	4	16	64
量化等级	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
状态变量	相关隶属度函数								
$PB$	0	0	0	0	0	0	0	0.35	1
$PS$	0	0	0	0	0	0.4	1	0.4	0
$ZE$	0	0	0	0.2	1	0.2	0	0	0
$NS$	0	0.4	1	0.4	0	0	0	0	0
$NB$	1	0.35	0	0	0	0	0	0	0

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法

设系统误差 $e$ 的量化值为1，误差变化 $de$ 的量化值为-2

对于误差 $e$ :  $\mu_{ZE}(1) = 0.2$ ,  $\mu_{PS}(1) = 0.4$

误差变化 $de$ :  $\mu_{NS}(-2) = 1$

		$U$				
$DE \backslash E$	$NB$	$NS$	$ZE$	$PS$	$PB$	
$NB$	$PB$	$PB$	$PB$	$PS$	$NB$	
$NS$	$PB$	$PS$	$PS$	$ZE$	$NB$	
$ZE$	$PB$	$PS$	$ZE$	$NS$	$NB$	
$PS$	$PB$	$ZE$	$NS$	$NS$	$NB$	
$PB$	$PB$	$NS$	$NB$	$NB$	$NB$	

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法

设系统误差 $e$ 的量化值为1，误差变化 $de$ 的量化值为-2

对于误差 $e$ :  $\mu_{ZE}(1) = 0.2$ ,  $\mu_{PS}(1) = 0.4$

误差变化 $de$ :  $\mu_{NS}(-2) = 1$

此时，有以下两条规则有效：

R1: 如果误差 $e$ 是ZE，且误差变化 $de$ 是NS，则控制 $U$ 为PS；

R2: 如果误差 $e$ 是PS，且误差变化 $de$ 是NS，则控制 $U$ 为ZE；

由极大极小推理法可得控制量的输出模糊集为

$$\mu_{PS}(1, -2) = \min(0.2, 1) = 0.2$$

$$\mu_{ZE}(1, -2) = \min(0.4, 1) = 0.4$$

## 第二节 模糊控制系统的设计

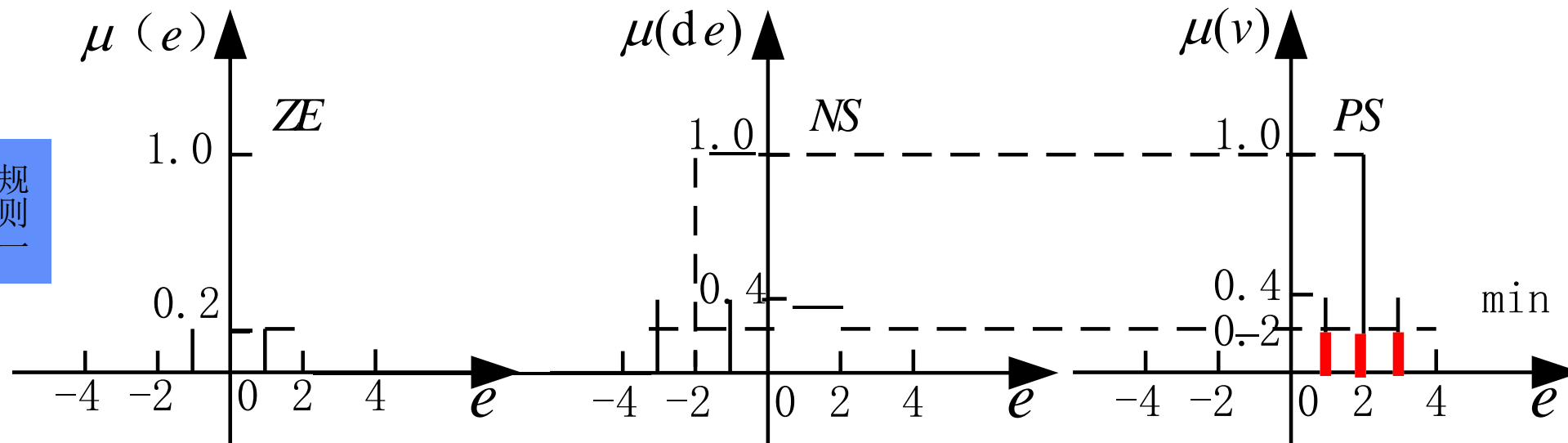
### 三、模糊控制器的常规设计方法

误差 $e$	-50	-30	-15	-5	0	5	15	30	50
误差率 $de$	-150	-90	-30	-10	0	10	30	90	150
控制 $v$	-64	-16	-4	-2	0	2	4	16	64
量化等级	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
状态变量	相关隶属度函数								
$PB$	0	0	0	0	0	0	0	0.35	1
$PS$	0	0	0	0	0	0.4	1	0.4	0
$ZE$	0	0	0	0.2	1	0.2	0	0	0
$NS$	0	0.4	1	0.4	0	0	0	0	0
$NB$	1	0.35	0	0	0	0	0	0	0

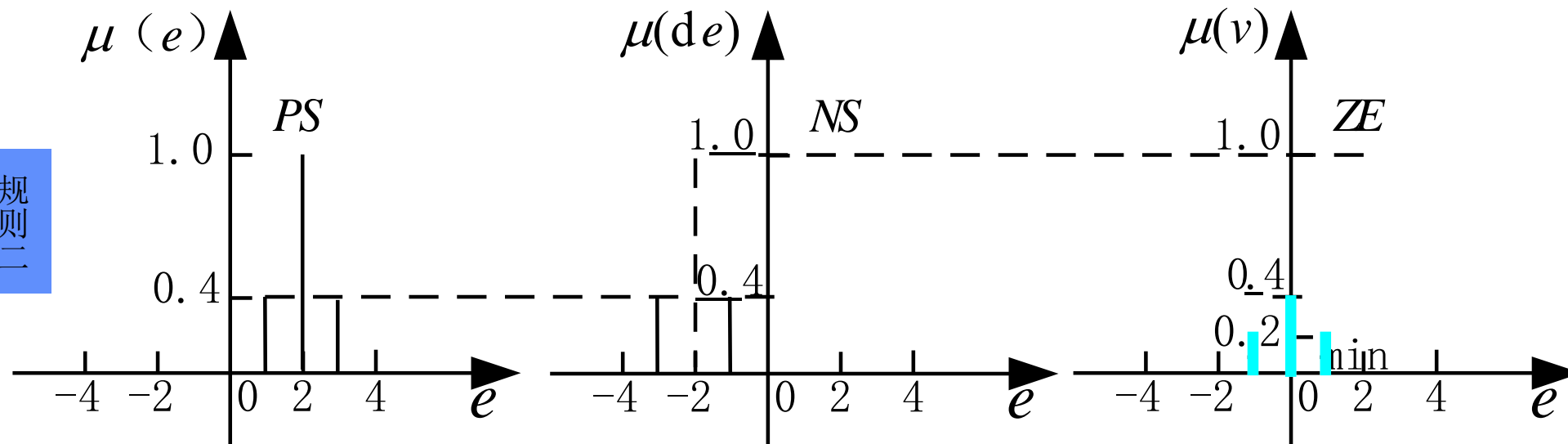
# 第二节 模糊控制系统的设计

## 三、模糊控制器的常规设计方法

规则一

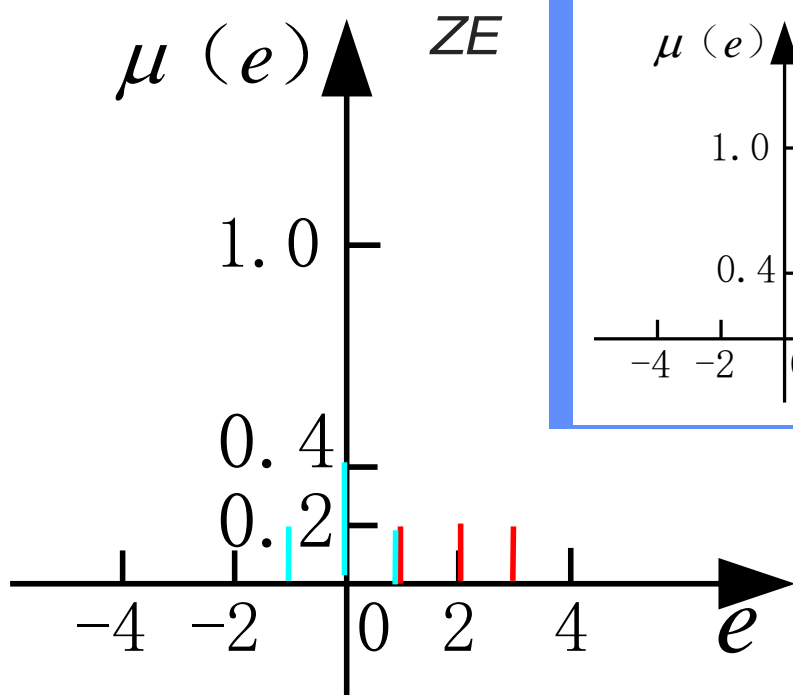
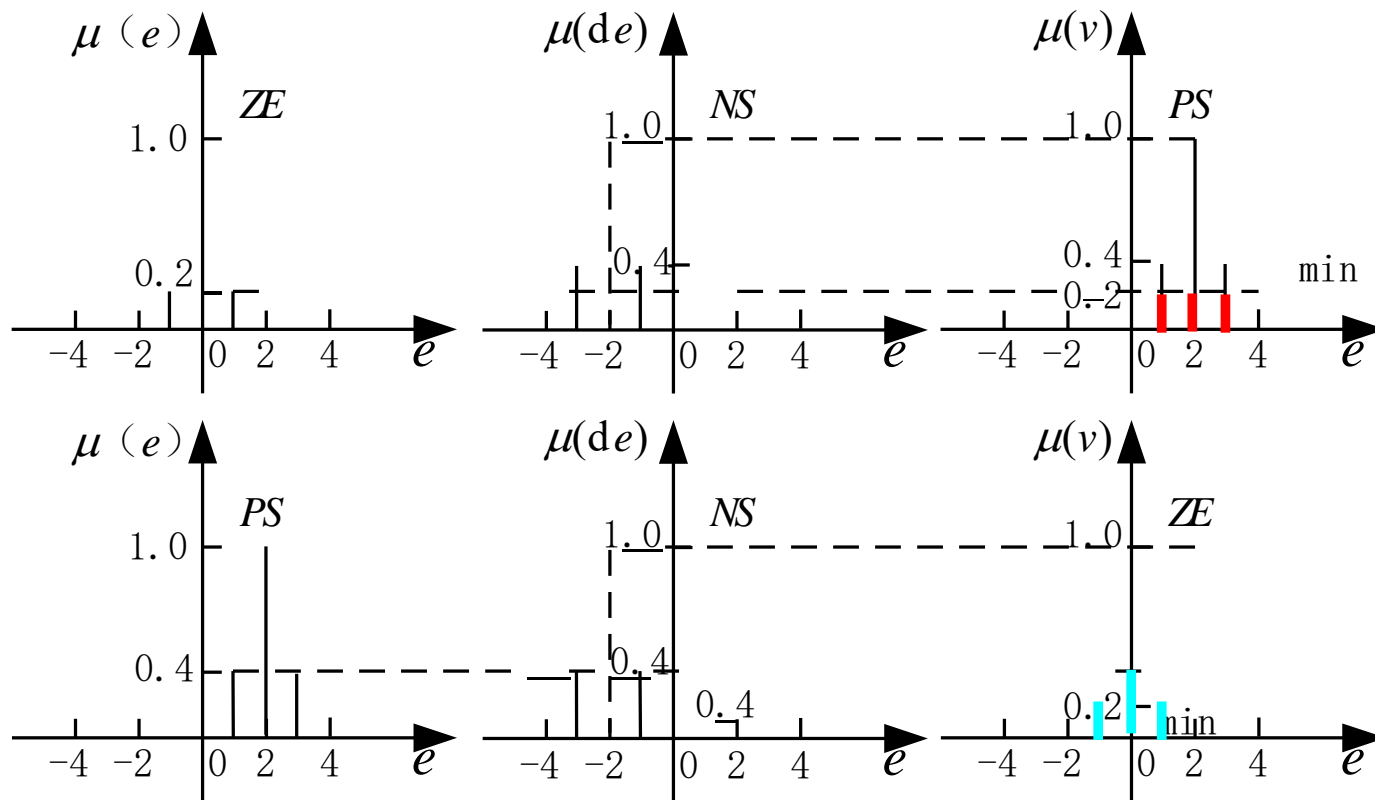


规则二



# 第二节 模糊控制系统的设计

## 三、模糊控制器的常规设计方法



## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法

最后将每一条推理规则得到的模糊控制子集进行“并”运算，再由重心法计算出模糊控制输出的精确量

$$u_0 = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_v(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_v(v_k)} \quad (\text{离散域})$$

$$u = \frac{-1 \times 0.2 + 0 \times 0.4 + 1 \times 0.2 + 2 \times 0.2 + 3 \times 0.2}{0.2 + 0.4 + 0.2 + 0.2 + 0.2} \approx 1$$

## 第二节 模糊控制系统的设计

### 三、模糊控制器的常规设计方法

按照上述方法，可以得到如下控制表

$c_{ij}$ $e_i$	$de_j$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-4		4	3	3	2	2	3	0	0	0
-3		3	3	3	2	2	2	0	0	0
-2		3	3	2	2	1	1	0	-1	-2
-1		3	2	2	1	1	0	-1	-1	-2
0		2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2
1		2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3
2		1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3
3		0	0	0	-2	-2	-2	-3	-3	-3
4		0	0	0	-3	-2	-2	-3	-3	-4

模糊控制表

注：

- ① 求出来的“1”已经经过重心法解模糊，是精确量；
- ② 如果要作用于被控对象，还要将“1”成比例因子得到最终的控制量。

# 第三节 模糊控制器的设计举例

## ■ 流量控制的模糊控制器设计

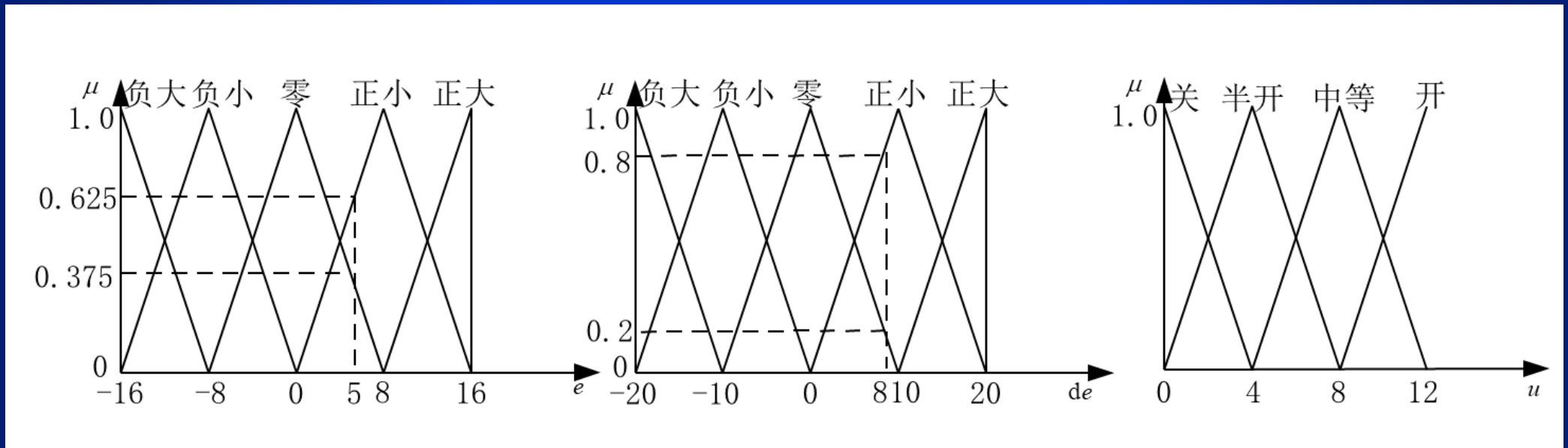
### 1、模糊化过程

以流量控制为例，选择输入量为误差(以 $e$ 表示)和误差变化(以 $de$ 表示)，控制器的输出为阀门流量的校正量(以 $u$ 表示)

- 把误差划分成“负大”，“负小”，“零”，“正小”，“正大”五个等级。---语言变量的语言值。
- 输出量即阀门的开关的状态划分为“关”、“半开”、“中等”、“开”这四个等级
- 选择模糊隶属函数如图

# 第三节 模糊控制器的设计举例

## ■ 流量控制的模糊控制器设计



误差与误差变化、阀门流量的隶属度函数图

# 第三节 模糊控制器的设计举例

## ■ 流量控制的模糊控制器设计

### 2、模糊控制规则的建立

根据专家经验建立模糊控制规则, 这里有 $5*5=25$ 条规则

规则1: 如果 (IF) 误差为零, **或者** (OR) 误差变化为正小, 则  
(THEN) 阀门半开

规则2: 如果 (IF) 误差为正小, **和** (AND) 误差变化为正小, 则  
(THEN) 阀门中等

# 第三节 模糊控制器的设计举例

## ■ 流量控制的模糊控制器设计

### 3、精确化计算

方法一：重心法

方法二：最大隶属度函数方法

# 第三节 模糊控制器的设计举例

## ■ 流量控制的模糊控制器设计

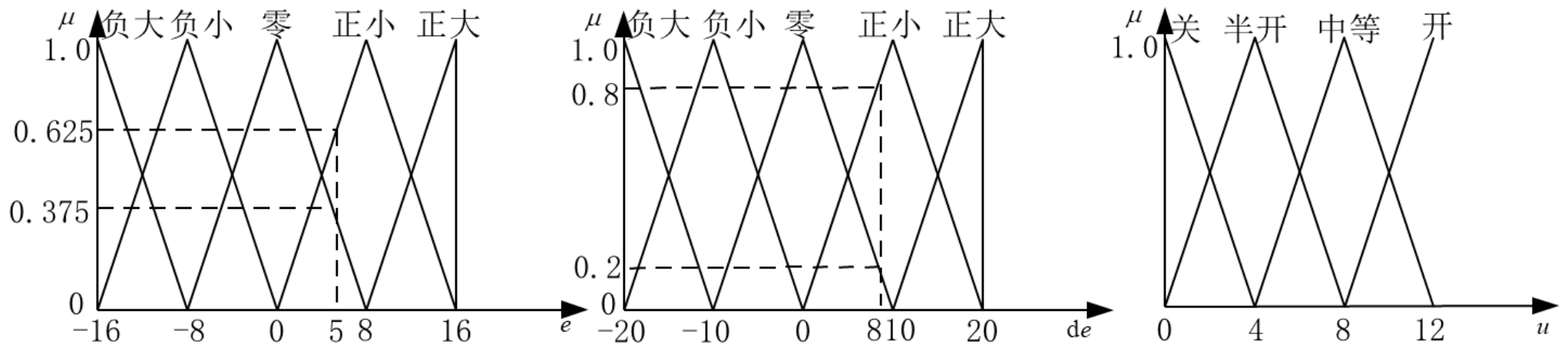
举个例子：假定输入误差为5，误差变化为8，求输出阀门的开度？

第一步：模糊化

由隶属度函数图可以得到：

误差属于“零”的程度即隶属度为0.375，属于“正小”的程度为0.625

误差变化属于“零”的程度即隶属度为0.2，属于“正小”的程度为0.8



## 第三节 模糊控制器的设计举例

### ■ 流量控制的模糊控制器设计

第二步:模糊逻辑推理

应用规则库中的两条规则:

规则1:如果(IF)误差为零,或者(OR)误差变化为正小,则(THEN)阀门半开

规则2:如果(IF)误差为正小,和(AND)误差变化为正小,则(THEN)阀门中等

1. 误差属于”零”的程度即隶属度为0.375,误差变化属于”正小”的程度为0.8,由推理规则 $\text{MAX}(0.375,0.8)=0.8$ ,所以阀门半开的隶属度为0.8

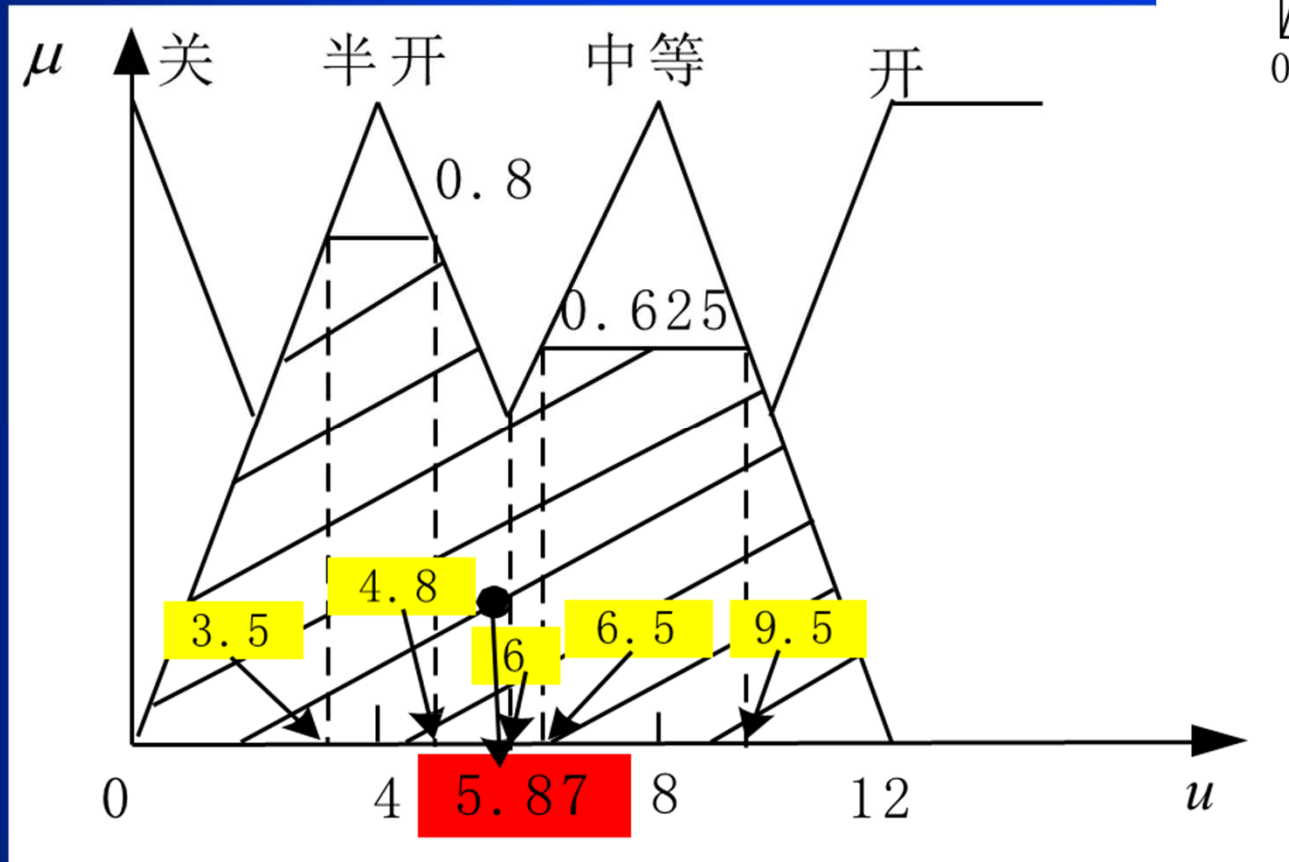
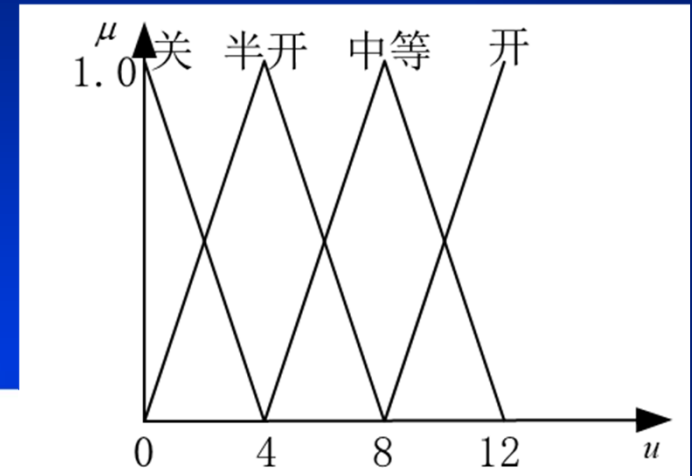
2. 误差属于”正小”的程度即隶属度为0.625,误差变化属于”正小”的程度为0.8,由推理规则 $\text{MIN}(0.625,0.8)=0.625$ ,所以阀门中等的隶属度为0.625

# 第三节 模糊控制器的设计举例

## ■ 流量控制的模糊控制器设计

第三步：精确化计算

1) 重心法（削顶推理法）



阀门流量的隶属度函数图

# 第三节 模糊控制器的设计举例

## ■ 流量控制的模糊控制器设计

第三步：精确化计算

### 1) 重心法（削顶推理法）

选择重心法计算,首先得到图中的各拐点的坐标(0,0), (3.5,0.8), (4.8,0.8), (6,0.5), (6.5,0.625), (9.5,0.625), (12,0).

套用精确化过程重心计算法积分公式,得到:

$$\frac{\int_0^{3.5} \frac{1}{4} u^2 du + \int_{3.5}^{4.8} 0.8 u du + \int_{4.8}^6 (2 - \frac{1}{4} u) u du + \int_6^{6.5} (\frac{1}{4} u - 1) u du + \int_{6.5}^{9.5} 0.625 u du + \int_{9.5}^{12} (3 - \frac{1}{4} u) u du}{\int_0^{3.5} \frac{1}{4} u du + \int_{3.5}^{4.8} 0.8 du + \int_{4.8}^6 (2 - \frac{1}{4} u) du + \int_6^{6.5} (\frac{1}{4} u - 1) du + \int_{6.5}^{9.5} 0.625 du + \int_{9.5}^{12} (3 - \frac{1}{4} u) du}$$

$$u = \frac{\int \mu_U(u) u du}{\int \mu_U(u) du} = \frac{36.8823}{6.288} = 5.87$$

从而阀门确切开度为5.87

# 第三节 模糊控制器的设计举例

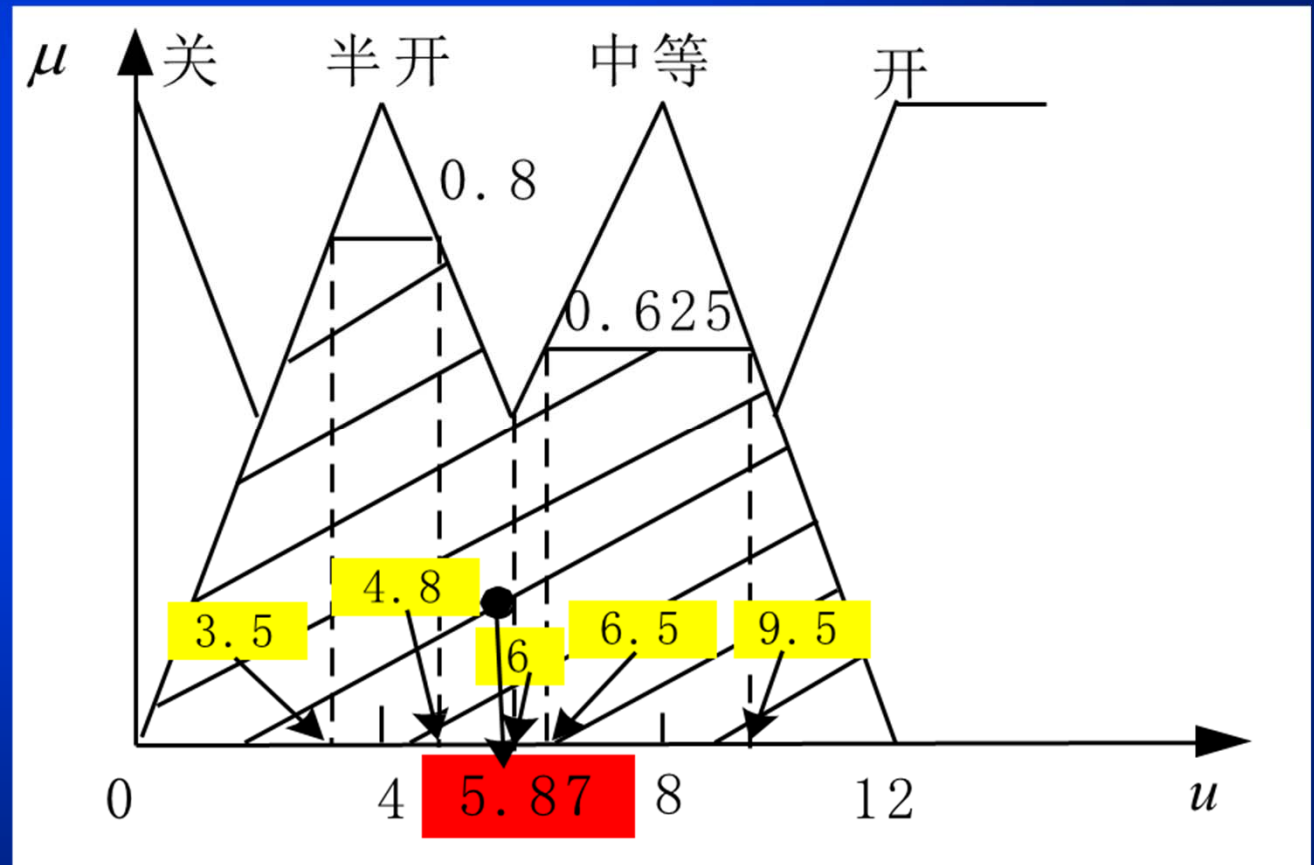
## ■ 流量控制的模糊控制器设计

第三步：精确化计算

2) 最大隶属度法

阀门开度为：

$$(3.5 + 4.8) / 2 = 4.15$$



阀门流量的隶属度函数图

作业：

2025.4.10 作业：

P74，习题3-4

在微助教里提交