

智能控制理论

(Intelligent Control Theories)

第4章 模糊控制

主讲教师：段朝霞（能电院自动化系）

办公室：勤学楼1212

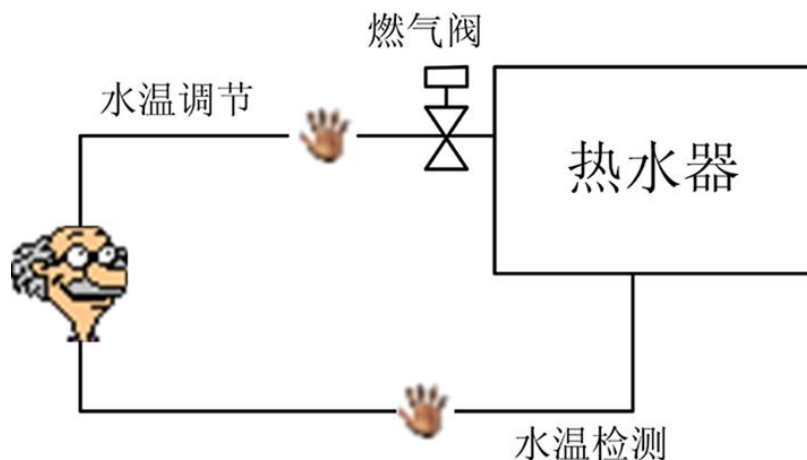
邮 箱：duanzx1989@163.com

4.1 模糊控制的工作原理

■ 模糊控制的基本思想

将人类专家对特定对象的控制经验，运用模糊集理论进行量化，转化为可数学实现的控制器，从而实现对被控对象的控制。

人类专家的控制经验是如何转化为数字控制器的？



控制思想：

如果水温偏高，就把燃气阀关小；
如果水温偏低，就把燃气阀开大。

图 4-1 人类对热水器水温的调节

4.1 模糊控制的工作原理

模仿人类的调节经验，可以构造一个模糊控制系统来实现对热水器的控制。

- 用一个温度传感器来替代左手进行对水温的测量，传感器的测量值经A/D变换后送往控制器。
- 电磁燃气阀代替右手和机械燃气阀作为执行机构，电磁燃气阀的开度由控制器的输出经D/A变换后控制。
- 构造控制器，使其能够模拟人类的操作经验。

人类的控制规则

如果水温比期望值高，就把燃气阀关小；
如果水温比期望值低，就把燃气阀开大。

描述了输入（水温与期望值的偏差 e ）和输出（燃气阀开度的增量 u ）之间的模糊关系 R

4.1 模糊控制的工作原理

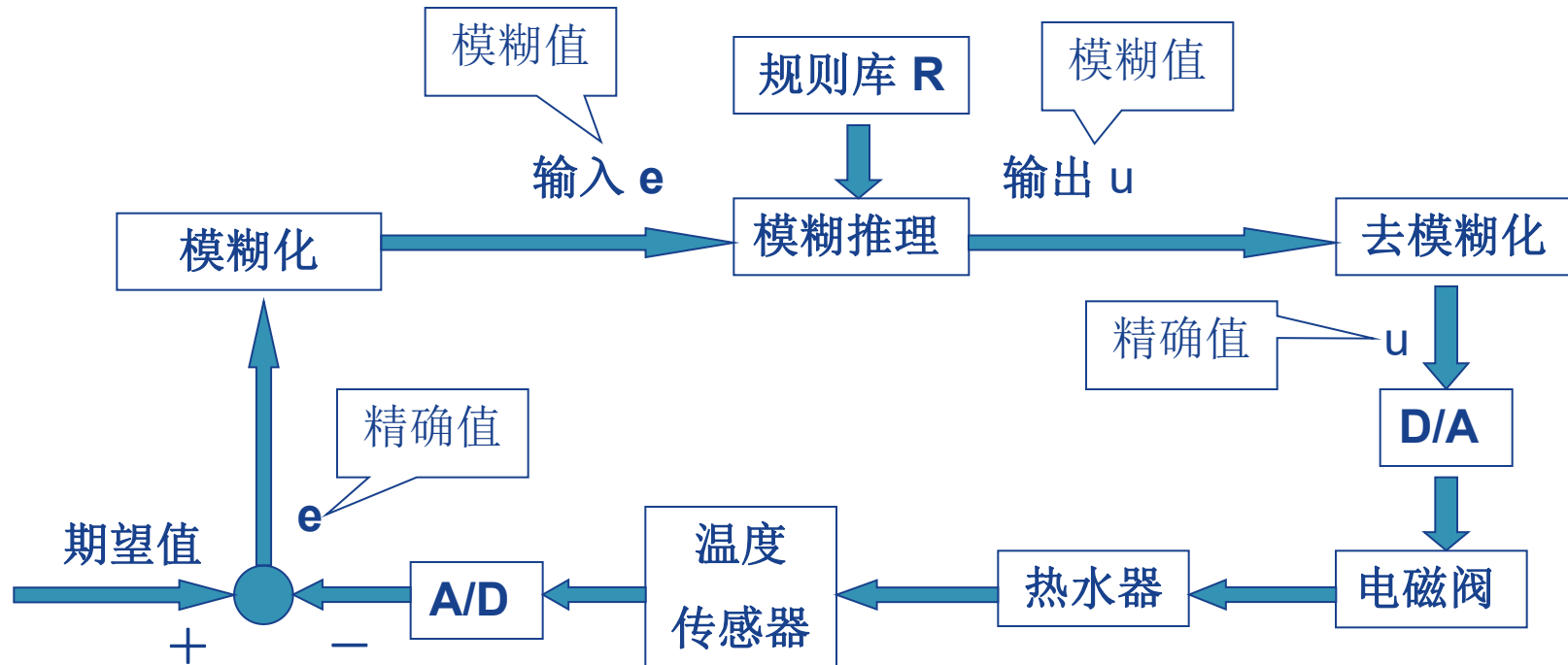


图 4-2 热水器水温模糊控制系统结构

4.1 模糊控制的工作原理

模糊控制器的基本工作原理

将测量得到的被控对象的状态经过模糊化接口转换为用人类自然语言描述的模糊量，而后根据人类的语言控制规则，经过模糊推理得到输出控制量的模糊取值，控制量的模糊取值再经过清晰化接口转换为执行机构能够接收的精确量。

4.1 模糊控制的工作原理

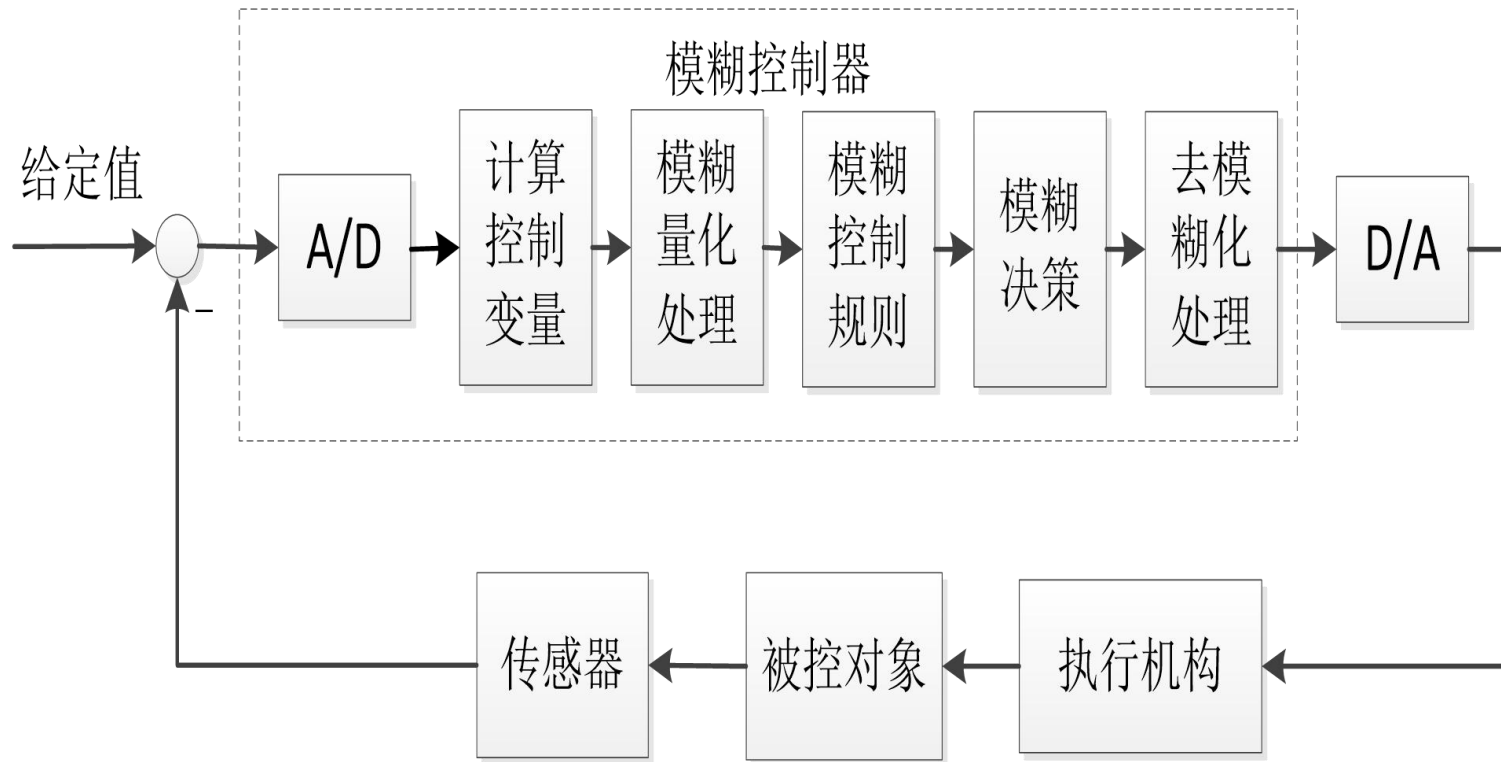


图4-3 模糊控制原理框图

4.2 模糊控制器的结构和设计

模糊控制器的基本结构通常由四个部分组成：

- 模糊化接口
- 知识库（数据库+规则库）
- 模糊推理
- 清晰化接口（解模糊接口）

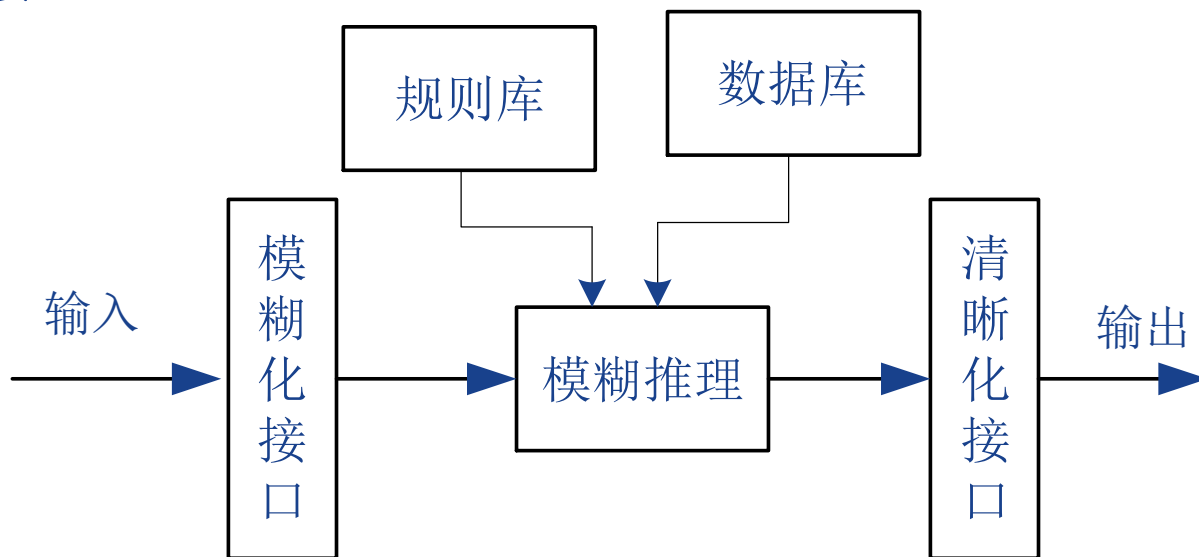


图4-3 模糊控制器的组成框图

4.2 模糊控制器的结构和设计

4.2.1 模糊化接口

模糊化就是通过在控制器的输入、输出论域上定义语言变量，来将精确的输入、输出值转换为模糊的语言值。

模糊化接口的设计步骤事实上就是定义语言变量的过程，可分为以下几步：

1) 语言变量的确定

针对模糊控制器每个输入、输出空间，各自定义一个语言变量。

通常取系统的误差值 e 和误差变化率 ec 为模糊控制器的两个输入，在 e 的论域上定义语言变量“误差 E ”，在 ec 的论域上定义语言变量“误差变化 EC ”；在控制量 u 的论域上定义语言变量“控制量 U ”。

4.2 模糊控制器的结构和设计

2) 语言变量论域的设计

对于实际的输入量，第一步首先需要进行尺度变换，将其变换到要求的论域范围。变换的方法可以是线性的，也可以是非线性的。例如，若实际的输入量为 x_0^* ，其变化范围为 $[x_{min}^*, x_{max}^*]$ ，若要求的论域为 $[x_{min}, x_{max}]$ ，若采用线性变换，则

$$x_0 = \frac{x_{min} + x_{max}}{2} + k(x_0^* - \frac{x_{max}^* + x_{min}^*}{2})$$
$$k = \frac{x_{max} - x_{min}}{x_{max}^* - x_{min}^*}$$

其中 k 称为比例因子。

量化等级	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
变化范围	≤ -5.5	$(-5.5$ $-4.5]$	$(-4.5$ $-3.5]$	$(-3.5$ $-2.5]$	$(-2.5$ $-1.5]$	$(-1.5$ $-0.5]$	$(-0.5$ $0.5]$	$(0.5$ $1.5]$	$(1.5$ $2.5]$	$(2.5$ $3.5]$	$(3.5$ $4.5]$	$(4.5$ $5.5]$	> 5.5

表4-1 均匀量化

量化等级	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
变化范围	≤ -3.2	$(-3.2$ $-1.6]$	$(-1.6$ $-0.8]$	$(-0.8$ $-0.4]$	$(-0.4$ $-0.2]$	$(-0.2$ $-0.1]$	$(-0.1$ $0.1]$	$(0.1$ $0.2]$	$(0.2$ $0.4]$	$(0.4$ $0.8]$	$(0.8$ $1.6]$	$(1.6$ $3.2]$	> 3.2

表4-2 非均匀量化

4.2 模糊控制器的结构和设计

在模糊控制器的设计中，通常就把语言变量的论域定义为有限整数的离散论域。

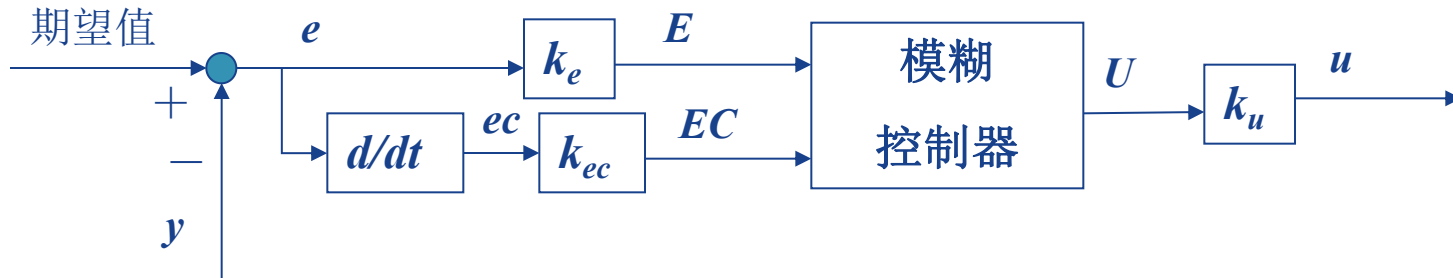
例如，可以将 E 的论域定义为 $\{-m, -m+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, m-1, m\}$ ；将 EC 的论域定义为 $\{-n, -n+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n-1, n\}$ ；将 U 的论域定义为 $\{-l, -l+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, l-1, l\}$ 。

?

4.2 模糊控制器的结构和设计

如何实现实际的连续域到有限整数离散域的转变？

通过引入量化因子 k_e 、 k_{ec} 和比例因子 k_u 来实现



假设在实际中，误差的连续取值范围是 $e=[e_L, e_H]$ ， e_L 表示低限值， e_H 表示高限值。则：

$$k_e = \frac{2m}{e_H - e_L}$$

同理，假如误差变化率的连续取值范围是 $ec=[ec_L, ec_H]$ ，控制量的连续取值范围是 $u=[u_L, u_H]$ ，则量化因子 k_{ec} 和比例因子 k_u 可分别确定如下：

$$k_{ec} = \frac{2n}{ec_H - ec_L}$$

$$k_u = \frac{u_H - u_L}{2l}$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

在确定了量化因子和比例因子之后，误差 e 和误差变化率 ec 可通过下式转换为模糊控制器的输入 E 和 EC ：

$$E = \langle k_e \cdot (e - \frac{e_H + e_L}{2}) \rangle$$

$$EC = \langle k_{ec} \cdot (ec - \frac{ec_H + ec_L}{2}) \rangle$$

式中， $\langle \rangle$ 代表取整运算。

模糊控制器的输出 U 可以通过下式转换为实际的输出值 u ：

$$u = k_u \cdot U + \frac{u_H + u_L}{2}$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

3) 定义各语言变量的语言值

通常在语言变量的论域上，将其划分为有限的几档。

例如，可将 E 、 EC 和 U 的划分为

{“正大 (**PB**)”，“正中(**PM**)”，“正小 (**PS**)”，“零 (**ZO**)”，“负小 (**NS**)”，“负中 (**NM**)”，“负大 (**NB**)”}七档。

■ 档级多，规则制定灵活，规则细致，但规则多、复杂，编程序困难，占用的内存较多；

■ 档级少，规则少，规则实现方便，但过少的规则会使控制作用变粗而达不到预期的效果。

因此在选择模糊状态时要兼顾简单性和控制效果。

4.2 模糊控制器的结构和设计

4)定义各语言值的隶属函数

■ 隶属函数的类型

① 正态分布型（高斯基函数）

$$\mu_{\tilde{A}_i}(x) = e^{-\frac{(x-a_i)^2}{b_i^2}}$$

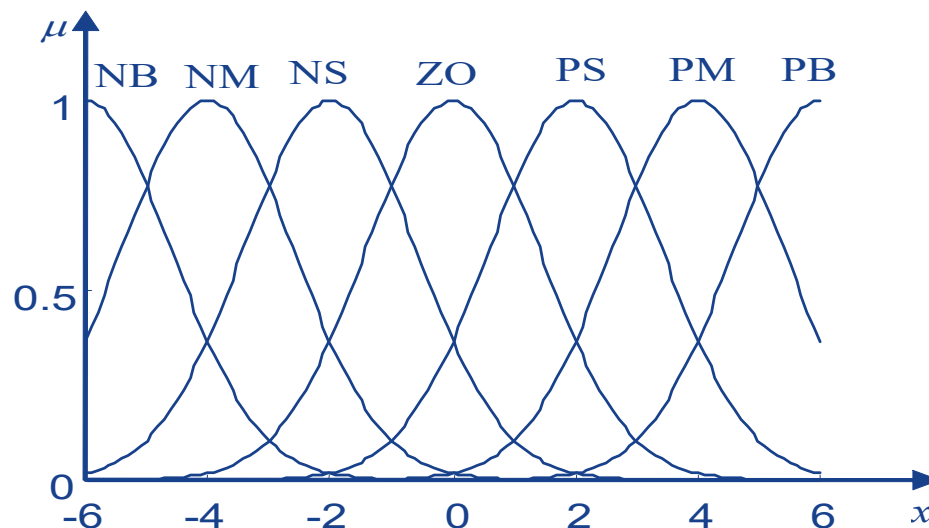


图4-4 高斯型隶属函数的形状和分布

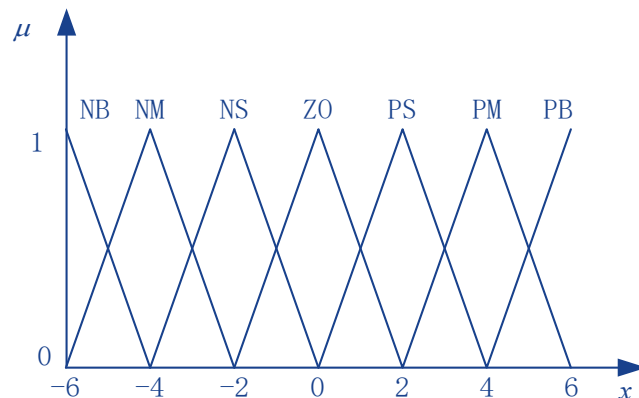
其中， a_i 为函数的中心值， b_i 为函数的宽度。

假设与 {PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB} 对应的高斯基函数的中心值分别为 {6, 4, 2, 0, -2, -4, -6}，宽度均为2。隶属函数的形状和分布如图所示。

4.2 模糊控制器的结构和设计

② 三角形

$$\mu_{\tilde{A}_i}(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}(x-a), & a \leq x < b \\ \frac{1}{b-c}(u-c), & b \leq x \leq c \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$



③ 梯形

$$\mu_{\tilde{A}_i}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

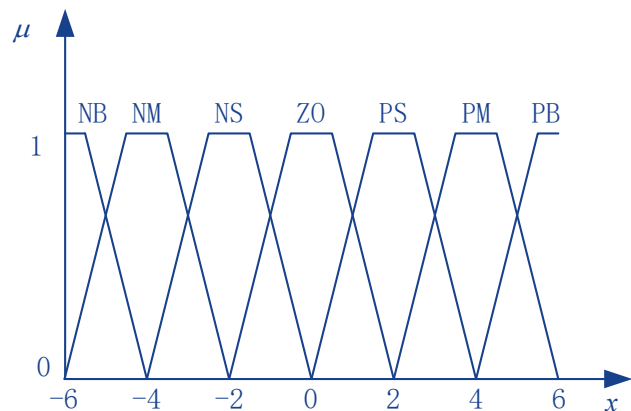


图4-5 三角形和梯形隶属函数的形状和分布

4.2 模糊控制器的结构和设计

■ 隶属函数确定时需要考虑的几个问题

① 隶属函数曲线形状对控制性能的影响。

- 隶属函数形状较尖时，分辨率较高，输入引起的输出变化比较剧烈，控制灵敏度较高；

- 曲线形状较缓时、分辨率较低，输入引起的输出变化不那么剧烈，控制特性也较平缓，具有较好的系统稳定性。

因而，通常在输入较大的区域内采用低分辨率曲线（形状较缓），在输入较小的区域内采用较高分辨率曲线（形状较尖），当输入接近零则选用高分辨率曲线（形状尖）。

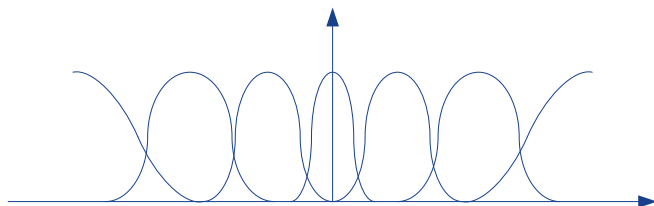


图4-6 隶属函数的形状和分布

4.2 模糊控制器的结构和设计

② 隶属函数曲线的分布对控制性能的影响

- 兼顾控制灵敏度和鲁棒性

相邻两曲线交点对应的隶属度值较小时，控制灵敏度较高，但鲁棒性不好；值较大时，控制系统的鲁棒性较好，但控制灵敏度将降低。

- 清晰性

相邻隶属函数之间的区别必须是明确的。

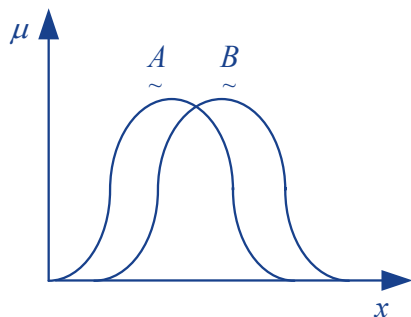


图 4-7 不清晰的隶属函数分布

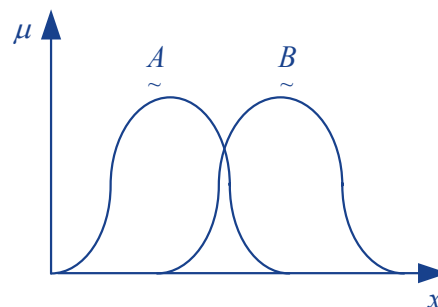


图 4-8 清晰的隶属函数分布

4.2 模糊控制器的结构和设计

- 完备性

隶属函数的分布必须覆盖语言变量的整个论域，否则，将会出现“空档”，从而导致失控。

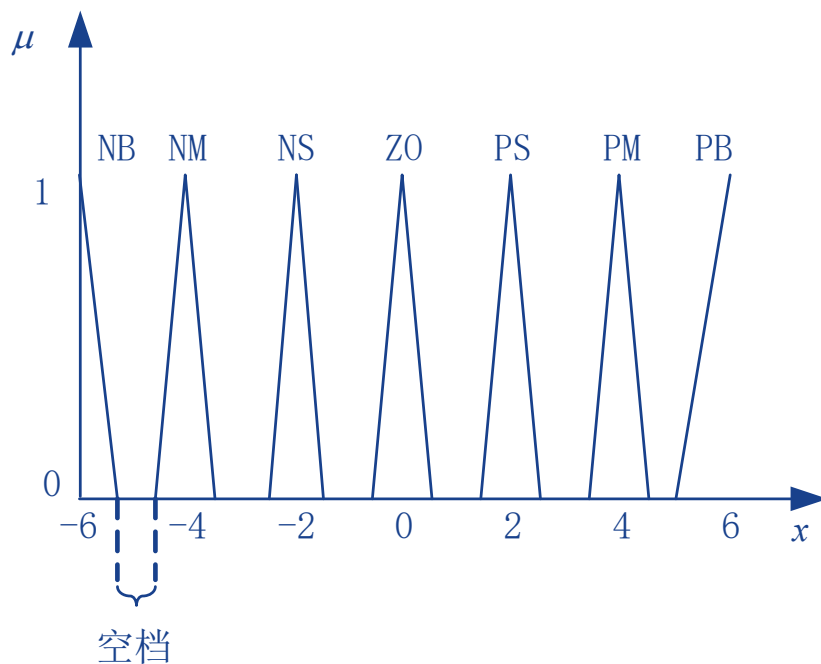


图 4-9 不完备的隶属函数分布

4.2 模糊控制器的结构和设计

ε 完备性

对于任意的输入，若能找到一个模糊集合，使该输入对于该模糊集合的隶属度函数不小于 ε ，则称该模糊控制器满足 ε 完备性。所示即为 $\varepsilon=0.5$ 的情况，它也是最常见的选择。

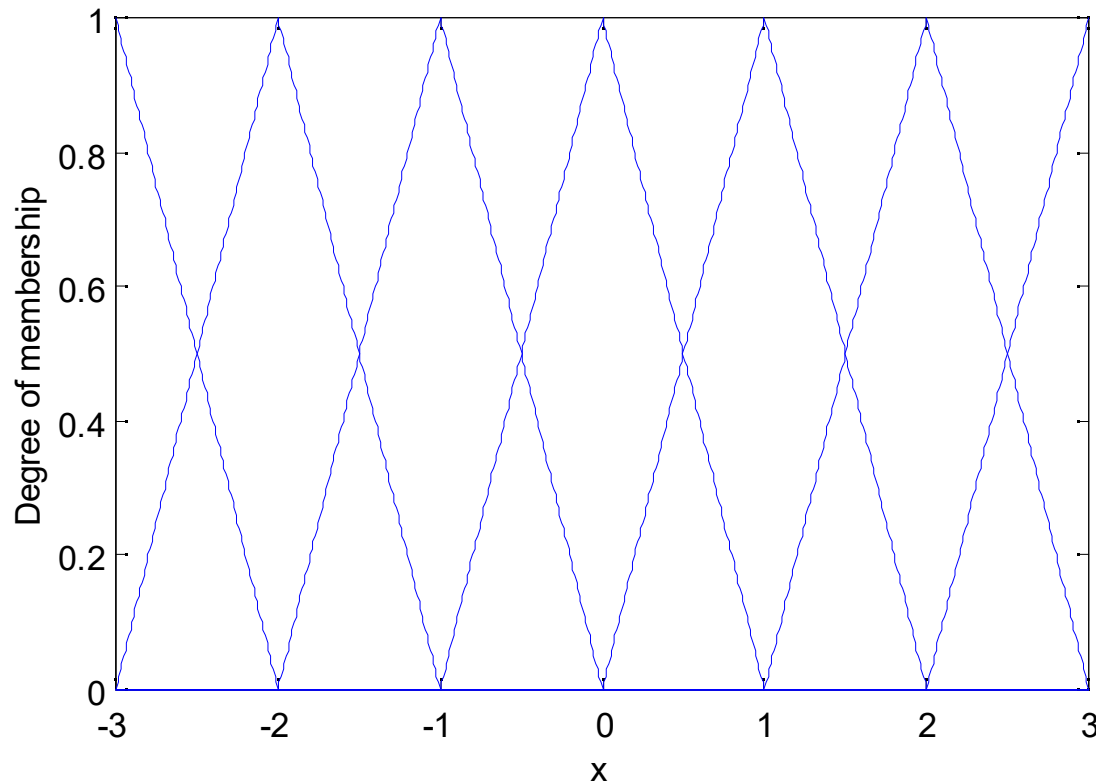


图 4-10 具有0.5完备性的隶属函数

4.2 模糊控制器的结构和设计

模糊化过程小结：

经过1) ~4) 步的定义可以在输入输出空间定义语言变量，从而将输入输出的精确值转换为相应的模糊值。具体的步骤如下：

第一步 将实际检测的系统误差和误差变化率量化为模糊控制器的输入。

假设实际检测的系统误差和误差变化率分别为 e^* 和 ec^* ，可以通过量化因子将其量化为模糊控制器的输入 E^* 和 EC^* 。

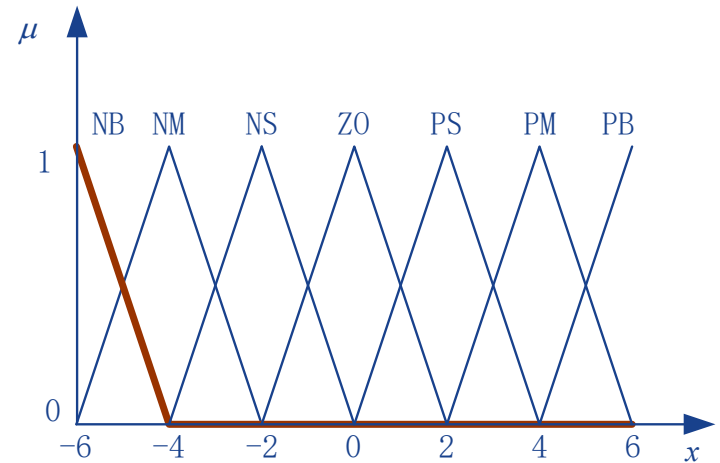
$$E^* = \left\langle k_e \cdot \left(e^* - \frac{e_H + e_L}{2} \right) \right\rangle$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

第二步 将模糊控制器的精确输入 E^* 和 EC^* 通过模糊化接口转化为模糊输入 A^* 和 B^* 。

将 E^* 和 EC^* 所对应的隶属度最大的模糊值当作当前模糊控制器的模糊输入量 A^* 和 B^* 。

假设 $E^* = -6$ ，系统误差采用三角形隶属函数来进行模糊化。 E^* 属于 **NB** 的隶属度最大（为1），则此时，相对应的模糊控制器的模糊输入量为：



$$\tilde{A^*} = NB$$

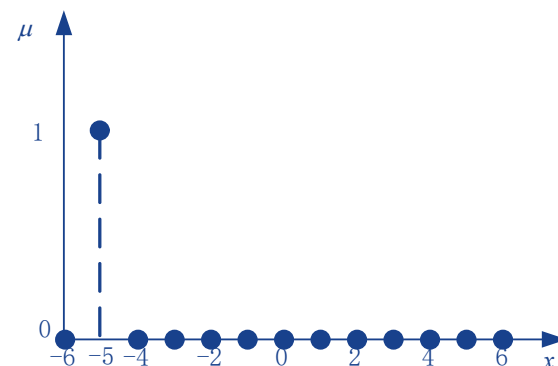
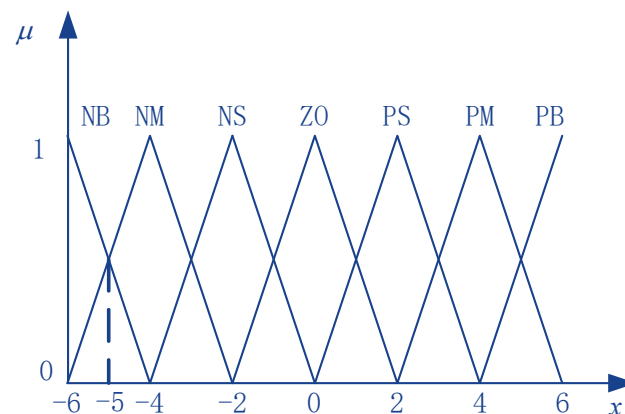
$$= \frac{1}{-6} + \frac{0.5}{-5} + \frac{0}{-4} + \frac{0}{-3} + \frac{0}{-2} + \frac{0}{-1} + \frac{0}{0} + \frac{0}{1} + \frac{0}{2} + \frac{0}{3} + \frac{0}{4} + \frac{0}{5} + \frac{0}{6}$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

对于某些输入精确量，有时无法判断其属于哪个模糊值的隶属度更大，例如当 $E^* = -5$ 时，其属于 NB 和 NM 的隶属度一样大。此时有两种方法进行处理：

1) 在隶属度最大的模糊值之间任取一个；例如当 $E^* = -5$ 时， $A^* = \text{NB}$ 或 NM 。

2) 重新定义一个模糊值，该模糊值对于当前输入精确量的隶属度为 1，对于其它精确量的隶属度为 0。



$$\tilde{A}^* = \frac{0}{-6} + \frac{1}{-5} + \frac{0}{-4} + \frac{0}{-3} + \frac{0}{-2} + \frac{0}{-1} + \frac{0}{0} + \frac{0}{1} + \frac{0}{2} + \frac{0}{3} + \frac{0}{4} + \frac{0}{5} + \frac{0}{6}$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

4.2.2 知识库——数据库

■ 数据库

数据库包含了与模糊控制规则及模糊处理有关的各种参数，尺度变换的参数（量化因子、比例因子）、模糊空间的分割（定义语言值和语言值的个数）和隶属函数的选择等。

4.2 模糊控制器的结构和设计

4.2.2 知识库——规则库

■ 规则库的描述

规则库由若干条控制规则组成，这些控制规则根据人类控制专家的经验总结得出，按照 **IF ...is ...AND ...is ...THEN ...is...** 的形式表达。

$R_1 : \text{IF } E \text{ is } A_1 \text{ AND } EC \text{ is } B_1 \text{ THEN } U \text{ is } C_1$

$R_2 : \text{IF } E \text{ is } A_2 \text{ AND } EC \text{ is } B_2 \text{ THEN } U \text{ is } C_2$

.....

$R_n : \text{IF } E \text{ is } A_n \text{ AND } EC \text{ is } B_n \text{ THEN } U \text{ is } C_n$

其中， E 、 EC 是输入语言变量“误差”，“误差变化率”； U 是输出语言变量“控制量”。 A_i 、 B_i 、 C_i 是第 i 条规则中与 E 、 EC 、 U 对应的语言值。

4.2 模糊控制器的结构和设计

规则库也可以用矩阵表的形式进行描述。

例如在模糊控制直流电机调速系统中，模糊控制器的输入为 E （转速误差）、 EC （转速误差变化率），输出为 U （电机的力矩电流值）。

在 E 、 EC 、 U 的论域上各定义了7个语言子集：{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB}

对于 E 、 EC 可能的每种取值，进行专家分析和总结后，则总结出的控制规则为：

U		EC						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NB	NB	NM	Z	Z
	NM	NB	NB	NB	NB	NM	Z	Z
	NS	NM	NM	NM	NM	Z	PS	PS
	Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
	PS	NS	NS	Z	PM	PM	PM	PM
	PM	Z	Z	PM	PB	PB	PB	PB
	PB	Z	Z	PM	PB	PB	PB	PB

表 4-3 控制规则的矩阵表

4.2 模糊控制器的结构和设计

■ 规则库蕴涵的模糊关系

规则库中第 i 条控制规则:

R_i : IF E is A_i AND EC is B_i THEN U is C_i

蕴含的模糊关系为:

$$R_i = (A_i \times B_i) \times C_i$$

控制规则库中的 n 条规则之间可以看作是“或”，也就是“求并”的关系，则整个规则库蕴涵的模糊关系为:

$$R = \bigcup_i R_i$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

■ 规则库的产生

模糊控制规则的提取方法在模糊控制器的设计中起着举足轻重的作用，它的优劣直接关系到模糊控制器性能的好坏，是模糊控制器设计中最重要的一部分。

模糊控制规则的生成方法归纳起来主要有以下几种(4种):

(1) 基于专家的经验和控制工程知识

这种方法通过对控制专家的经验进行总结描述来生成特定领域的控制规则原型，经过反复的实验和修正形成最终的规则库。

4.2 模糊控制器的结构和设计

例如电加热炉系统在阶跃输入 $y_r(t)$ 作用下其输出 $y(t)$ 的过渡过程曲线，如下图所示。现借助专家对恒温控制的经验知识，则被调量 $y(t)$ 的调节过程大致如下。

当 $y(t)$ 远小于 $y_r(t)$ 时，则大大增加控制量 $u(t)$ ；

当 $y(t)$ 远大于 $y_r(t)$ 时，则大大减小控制量 $u(t)$ ；

当 $y(t)$ 和 $y_r(t)$ 正负偏差不太大时，则根据 $y(t)$ 的变化趋势来确定控制量的大小。

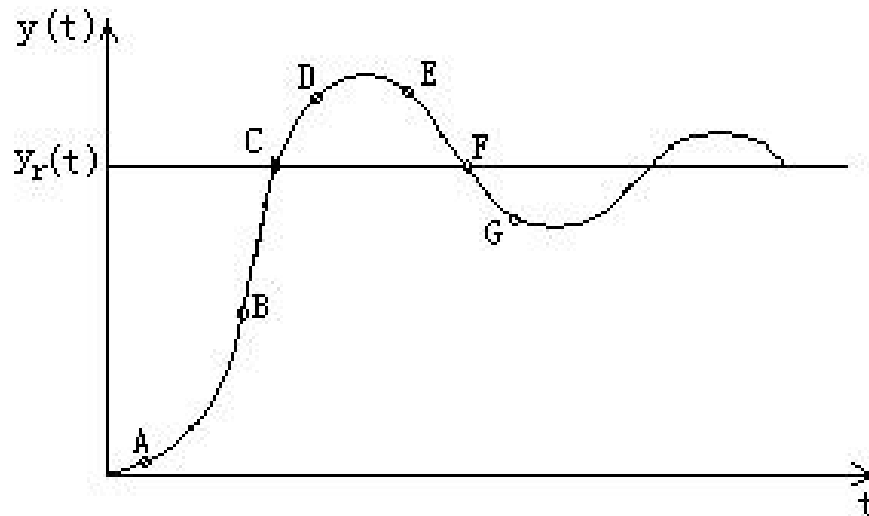


图4-11 电加热炉系统单位阶跃响应曲线

4.2 模糊控制器的结构和设计

(2) 基于操作人员的实际控制过程

在许多人工控制的工业系统中，很难建立控制对象的模型，因此用常规的控制方法来对其进行设计和仿真比较困难。而熟练的操作人员却能成功地控制这样的系统。

事实上，操作人员有意或无意地使用了一组 IF—THEN 模糊规则来进行控制。但是他们往往并不能用语言明确地将它们表达出来，因此可以通过记录操作人员实际控制过程时的输入输出数据，并从中总结出模糊控制规则。

4.2 模糊控制器的结构和设计

(3) 基于过程的模糊模型

这种方法通过用模糊语言描述被控过程的输入输出关系来得到过程的模糊模型，进而根据这种关系来得到控制器的控制规则。

(4) 基于学习算法

应用自适应学习算法（神经网络、遗传算法等）对控制过程的样本数据进行分析 and 聚类，生成和在线优化较完善的控制规则。（模糊自组织控制，Sugeno的模糊小车）

4.2 模糊控制器的结构和设计

模糊控制规则要注意以下几个问题：

- 规则数量合理

控制规则的增加可以增加控制的精度，但是会影响系统的实时性；控制规则数量的减少会提高系统的运行速度，但是控制的精度又会下降。所以，需要在控制精度和实时性之间进行权衡。

- 规则要具有一致性

控制规则的目标准则要相同。不同的规则之间不能出现相矛盾的控制结果。如果各规则的控制目标不同，会引起系统的混乱。

- 完备性要好

控制规则应能对系统可能出现的任何一种状态进行控制。否则，系统就会有失控的危险。

4.2 模糊控制器的结构和设计

4.2.3 模糊推理

根据模糊输入和规则库中蕴涵的输入输出关系，通过第三章描述的模糊推理方法得到模糊控制器的输出模糊值

$$C^* = (A^* \times B^*) \circ R$$

4.2.4 清晰化接口

由模糊推理得到的模糊输出值 C^* 是输出论域上的模糊子集，只有将其转化为精确控制量 u ，才能施加于对象。我们实行这种转化的方法叫做清晰化/解模糊/模糊决策。

4.2 模糊控制器的结构和设计

(1) 最大隶属度法

选取推理结果模糊集合中隶属度最大的元素作为输出值，即

$$v_0 = \max \mu_{c^*}(v), v \in V$$

把 C^* 中隶属度最大的元素 U^* 作为精确输出控制量

$$C_{\sim}^* = \frac{0}{-6} + \frac{0.5}{-5} + \frac{1}{-4} + \frac{0.5}{-3} + \frac{0}{-2} + \frac{0}{-1} + \frac{0}{0} + \frac{0}{1} + \frac{0}{2} + \frac{0}{3} + \frac{0}{4} + \frac{0}{5} + \frac{0}{6}$$

上式中，元素-4对应的隶属度最大，则根据最大隶属度法得到的精确输出控制量为-4。

4.2 模糊控制器的结构和设计

如果在输出论域 V 中，其最大隶属度对应的输出值多于一个，则取所有具有最大隶属度输出的平均值，即：

$$v_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i, \quad v_i = \max \mu_{c^*}(v), v \in V$$

N 为具有相同最大隶属度输出的总数。

4.2 模糊控制器的结构和设计

$$C_{\sim}^* = \frac{0}{-6} + \frac{0.5}{-5} + \frac{1}{-4} + \frac{1}{-3} + \frac{1}{-2} + \frac{0.5}{-1} + \frac{0}{0} + \frac{0}{1} + \frac{0}{2} + \frac{0}{3} + \frac{0}{4} + \frac{0}{5} + \frac{0}{6}$$

模糊输出量的元素隶属度有几个相同的最大值，取相应诸元素的平均值，并进行四舍五入取整，作为控制量。
上式中，元素**-4**、**-3**、**-2**对应的隶属度均为**1**，则精确输出控制量为

$$U^* = \frac{(-4) + (-3) + (-2)}{3} = -3$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

最大隶属度法不考虑输出隶属度函数的形状，只考虑最大隶属度处的输出值。因此，难免会丢失许多信息。它的突出优点是计算简单。在一些控制要求不高的场合，可采用最大隶属度法。

(2) 重心法

为了获得准确的控制量，就要求模糊方法能够很好的表达输出隶属度函数的计算结果。重心法是取隶属度函数曲线与横坐标围成面积的重心为模糊推理的最终输出值，即

4.2 模糊控制器的结构和设计

$$v_0 = \frac{\int v \mu_{C^*}(v) dv}{\int \mu_{C^*}(v) dv}$$

对于具有 m 个输出量化级数的离散域情况

$$v_0 = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_{C^*}(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_{C^*}(v_k)}$$

与最大隶属度法相比较，重心法具有更平滑的输出推理控制。即使对应于输入信号的微小变化，输出也会发生变化。

4.2 模糊控制器的结构和设计

$$C^* = \frac{0}{-6} + \frac{0.5}{-5} + \frac{1}{-4} + \frac{1}{-3} + \frac{1}{-2} + \frac{0.5}{-1} +$$
$$\frac{0}{0} + \frac{0}{1} + \frac{0}{2} + \frac{0}{3} + \frac{0}{4} + \frac{0}{5} + \frac{0}{6}$$



$$U^* = \left\langle \frac{0.5 \times (-5) + 1 \times (-4) + 1 \times (-3) + 1 \times (-2) + 0.5 \times (-1)}{0.5 + 1 + 1 + 1 + 0.5} \right\rangle = -3$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

(3) 加权平均法

工业控制中广泛使用的反模糊方法为加权平均法，输出值由下式决定

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

其中系数 k_i 的选择根据实际情况而定。不同的系数决定系统具有不同的响应特性。当系数取隶属度时，就转化为重心法。

$$k_i = \mu_{C^*}(v)$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

反模糊化方法的选择与隶属度函数形状的选择、推理方法的选择相关

Matlab提供五种解模糊化方法：（1）**centroid**：面积重心法；（2）**bisector**：面积等分法；（3）**mom**：最大隶属度平均法；（4）**som** 最大隶属度取小法；（5）**lom**：大隶属度取大法；

在 **Matlab** 中，可通过 **setfis()** 设置解模糊化方法，通过 **defuzz()** 执行反模糊化运算。

4.2 模糊控制器的结构和设计

例如，重心法通过下例程序来实现：

```
x=-10:1:10;  
mf=trapmf(x,[-10,-8,-4,7]);  
xx=defuzz(x,mf,'centroid');
```

在模糊控制中，重心法可通过下例语句来设定：

```
a1=setfis(a,'DefuzzMethod','centroid')
```

其中a为模糊规则库。

4.2 模糊控制器的结构和设计

清晰化处理后得到的模糊控制器的精确输出量 U^* ，经过比例因子可以转化为实际作用于控制对象的控制量

$$u^* = k_u \cdot U^* + \frac{u_H + u_L}{2}$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

4.2.5 模糊查询表

模糊控制器的工作过程:

- ① 模糊控制器实时检测系统的误差和误差变化率 e^* 和 ec^* ;
- ② 通过量化因子 k_e 和 k_{ec} 将 e^* 和 ec^* 量化为控制器的精确输入 E^* 和 EC^* ;
- ③ E^* 和 EC^* 通过模糊化接口转化为模糊输入 A^* 和 B^* ;
- ④ 将 A^* 和 B^* 根据规则库蕴涵的模糊关系进行模糊推理, 得到模糊控制输出量 C^* ;
- ⑤ 对 C^* 进行清晰化处理, 得到控制器的精确输出量 U^* ;
- ⑥ 通过比例因子 k_u 将 U^* 转化为实际作用于控制对象的控制量 u^* 。

将 (3) ~ (5) 步离线进行运算, 对于每一种可能出现的 E 和 EC 取值, 计算出相应的输出量 U , 并以表格的形式储存在计算机内存中, 这样的表格我们称之为模糊查询表。

4.2 模糊控制器的结构和设计

如果 E 、 EC 和 U 的论域均为 $\{-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6\}$ ，则生成的模糊查询表具有如下形式

U		EC												
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
E	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-5	-4	-3	-2	0	0	0
	-5	-6	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-4	-3	-2	0	0	0
	-4	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-5	-3	-3	-2	0	0	0
	-3	-5	-5	-5	-5	-4	-4	-4	-3	-2	-1	1	1	1
	-2	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-2	-1	0	2	2	2
	-1	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-1	2	2	3	3	3
	0	-4	-4	-4	-3	-3	-1	0	1	3	3	4	4	4
	1	-3	-3	-3	-2	-2	1	3	3	3	3	4	4	4
	2	-2	-2	0	0	1	2	4	4	4	4	4	4	4
	3	-1	-1	0	1	2	3	4	4	4	5	5	5	5
	4	0	0	1	2	3	4	5	5	5	5	6	6	6
	5	0	0	1	2	3	4	5	5	5	6	6	6	6
	6	0	0	1	2	3	4	5	5	6	6	6	6	6

表 4-4 模糊查询表

4.2 模糊控制器的结构和设计

4.2.6 模糊控制器的设计内容

- (1) 确定模糊控制器的输入变量和输出变量；
- (2) 确定输入，输出的论域和 K_e 、 K_{ec} 、 K_u 的值；
- (3) 确定各变量的语言取值及其隶属函数；
- (4) 总结专家控制规则及其蕴涵的模糊关系；
- (5) 选择推理算法；
- (6) 确定清晰化的方法；
- (7) 总结模糊查询表。

4.2 模糊控制器的结构和设计

4.2.7 水箱液位控制（例子）

以水位的模糊控制为例，设有一个水箱，通过调节阀可向内注水和向外抽水。设计一个模糊控制器，通过调节阀门将水位稳定在固定水位附近。按照日常的操作经验，可以得到基本的控制规则：

“若水位高于 h_0 点，则向外排水，差值越大，排水越快”；

“若水位低于 h_0 点，则向内注水，差值越大，注水越快”。

根据上述经验，设计模糊控制器。

4.2 模糊控制器的结构和设计

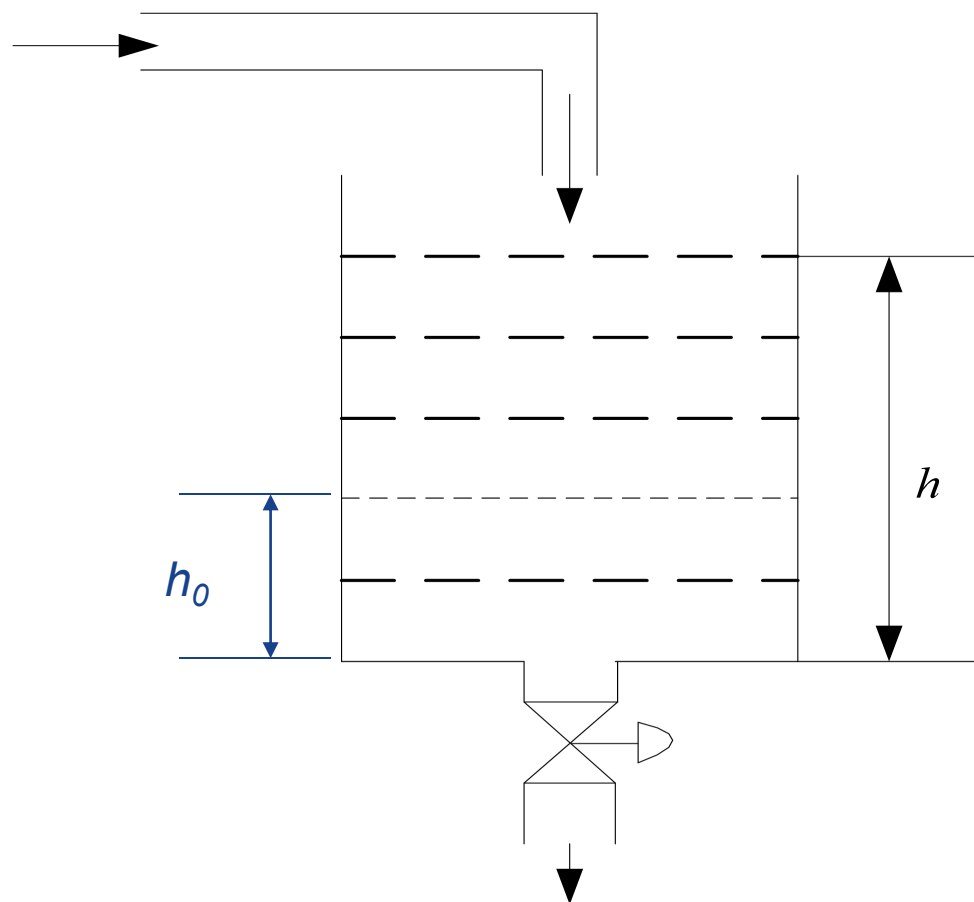


图 4-12 水箱液位控制

4.2 模糊控制器的结构和设计

1. 确定观测量和控制量

定义理想液位点的水位为 h_0 ，实际测得的水位高度为 h ，选择液位差

$$e = \Delta h = h_0 - h$$

将当前水位对于 h_0 点的偏差 e 作为观测量。

2. 输入量和输出量的模糊化

- 根据偏差 e 的变化范围分为七个等级（论域）： $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ 。
- 将偏差 e 分为五级（语言值）：负大（NB），负小（NS），零（0），正小（PS），正大（PB）。
- 得到水位变化模糊表4-5（隶属函数）。

4.2 模糊控制器的结构和设计

隶 属 度		变 化 等 级						
		-3	-2	-1	0	1	2	3
模 糊 集	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

表4-5 水位变化划分表

4.2 模糊控制器的结构和设计

- 控制量 u 为调节阀门开度的变化，并根据 u 的变化范围分为九个等级（论域）：-4，-3，-2，-1，0，+1，+2，+3，+4
- 将 u 分为五级（语言值）：负大（NB），负小（NS），零（0），正小（PS），正大（PB）。
得到控制量模糊划分表4-6（隶属函数）。

4.2 模糊控制器的结构和设计

隶属度		变化等级								
		-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
模糊集	PB	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1
	PS	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0
	O	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0
	NS	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
	NB	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0

表4-6 控制量变化划分表(隶属度)

4.2 模糊控制器的结构和设计

3 模糊规则的描述

根据日常的经验，设计以下模糊规则：

- (1) “若 e 负大(NB)，则 u 负大(NB)”
- (2) “若 e 负小(NS)，则 u 负小(NS)”
- (3) “若 e 为零(Z)，则 u 为零(Z)”
- (4) “若 e 正小(PS)，则 u 正小(PS)”
- (5) “若 e 正大(PB)，则 u 正大(PB)”

4.2 模糊控制器的结构和设计

上述规则采用“IF A THEN B”形式来描述：

(1) if $e = NB$ then $u = NB$

(2) if $e = NS$ then $u = NS$

(3) if $e = ZO$ then $u = ZO$

(4) if $e = PS$ then $u = PS$

(5) if $e = PB$ then $u = PB$

根据上述经验规则，可得模糊控制表。

若 (IF)	NBe	Nse	ZOe	PSe	PBe
则 (THEN)	NBu	Nsu	ZOu	PSu	PBu

表4-7 模糊控制规则表

4.2 模糊控制器的结构和设计

4 求模糊关系

模糊控制规则是一个多条语句，它可以表示为 $U \times V$ 上的模糊子集，即模糊关系 R ：

$$R = (NB_e \times NB_u^*) \cup (NS_e \times NS_u^*) \cup (ZO_e \times ZO_u^*) \cup (PS_e \times PS_u^*) \cup (PB_e \times PB_u^*)$$

其中，规则内的模糊集运算取交集，规则间的模糊集运算取并集。

4.2 模糊控制器的结构和设计

$$\text{NB } e \times \text{NB } u = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times [1 \quad 0.5 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{NS } e \times \text{NS } u = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times [0 \quad 0.5 \quad 1 \quad 0.5 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

$$Oe \times Ou = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.5 \\ 1.0 \\ 0.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$PSe \times PSu = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1.0 \\ 0.5 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

$$PB_e \times PB_u = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.5 \\ 1.0 \end{bmatrix} \times [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.5 \quad 1.0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1.0 \end{bmatrix}$$

由以上五个模糊矩阵求并集（即隶属函数最大值），得：

$$R = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1.0 \end{bmatrix}$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

5 模糊决策

模糊控制器的输出为误差向量和模糊关系的合成：

$$u = e \circ R$$

当误差 e 为NB时，

$$e^* = NB = \frac{1}{-3} + \frac{0.5}{-2} + \frac{0}{-1} + \frac{0}{0} + \frac{0}{1} + \frac{0}{2} + \frac{0}{3}$$

$$\mu_{NB}(e^*) = [1 \ 0.5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

控制器输出为：

4.2 模糊控制器的结构和设计

$$\begin{aligned}
 u = e \circ R &= \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 1.0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1.0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

4.2 模糊控制器的结构和设计

6 控制量的反模糊化

由模糊决策可知，当误差为负大时，实际液位远高于理想液位， $e=NB$ ，控制器的输出为一模糊向量，可表示为：

$$u = \frac{1}{-4} + \frac{0.5}{-3} + \frac{0.5}{-2} + \frac{0.5}{-1} + \frac{0}{0} + \frac{0}{+1} + \frac{0}{+2} + \frac{0}{+3} + \frac{0}{+4}$$

如果按照“隶属度最大原则”进行反模糊化，则选择控制量为 $u = -4$ ，即阀门的开度应开大一些，增加排水量，降低水位。

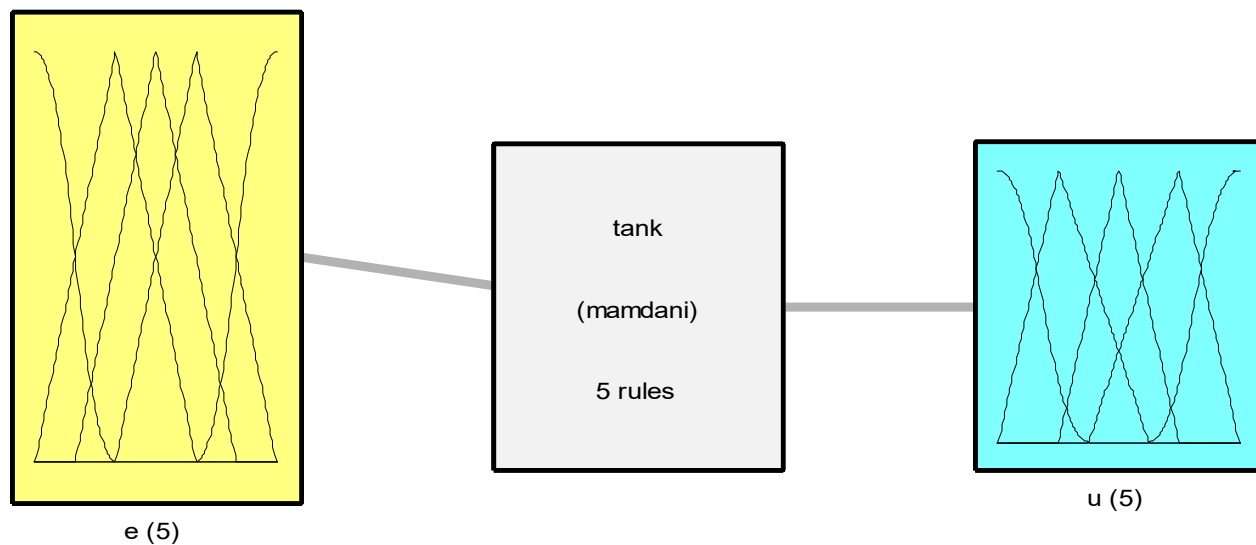
4.2 模糊控制器的结构和设计

仿真：按上述步骤，设计水箱模糊控制的**Matlab**仿真程序。
通过该程序，可实现模糊控制的动态仿真。

e	-3	-2	-1	0	1	2	3
u	-4	-2	-2	0	2	2	4

表4-8 模糊控制响应表

4.2 模糊控制器的结构和设计



System tank: 1 inputs, 1 outputs, 5 rules

图 4-13 水箱液位模糊控制系统

4.2 模糊控制器的结构和设计

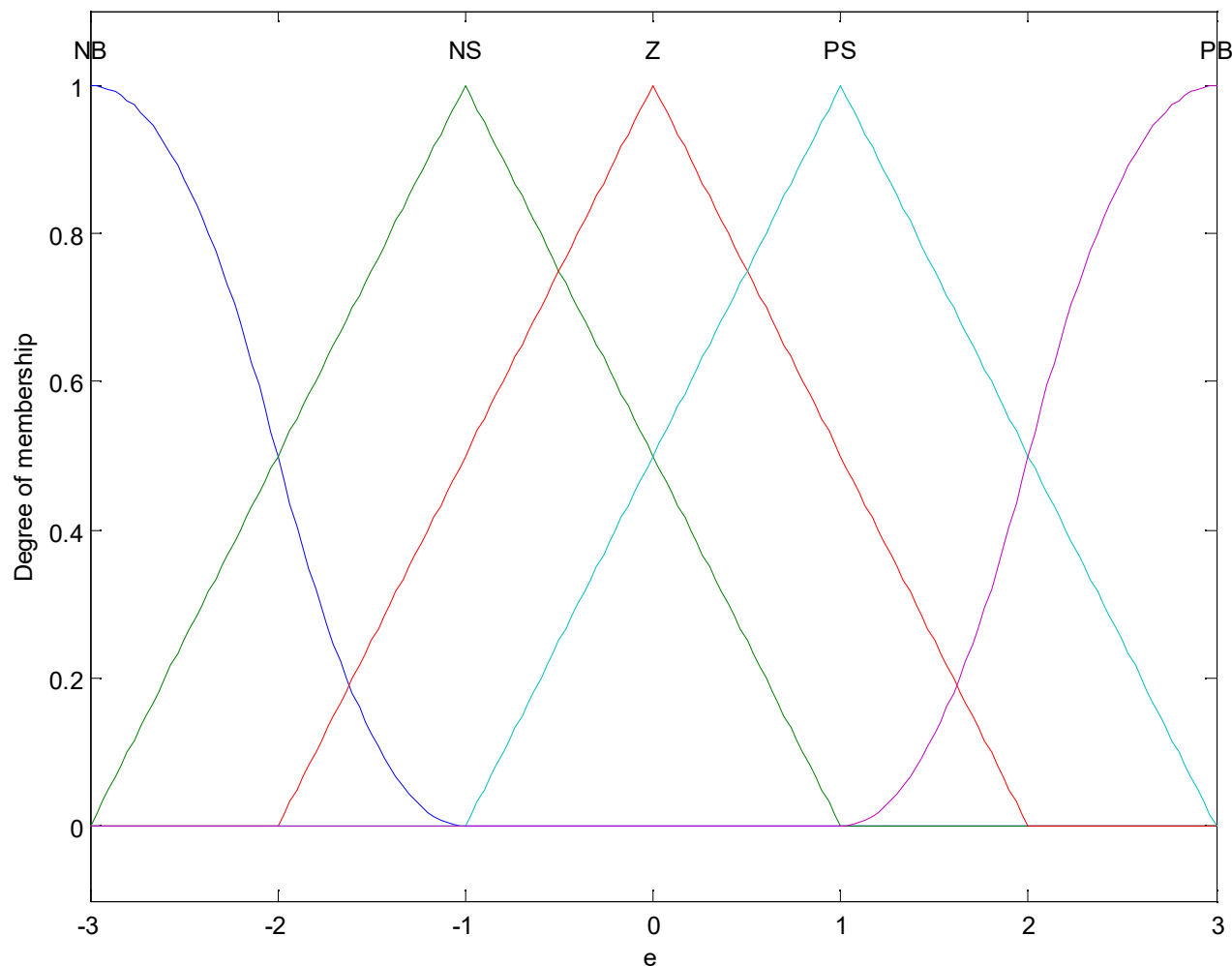


图 4-14 偏差隶属度函数

4.2 模糊控制器的结构和设计

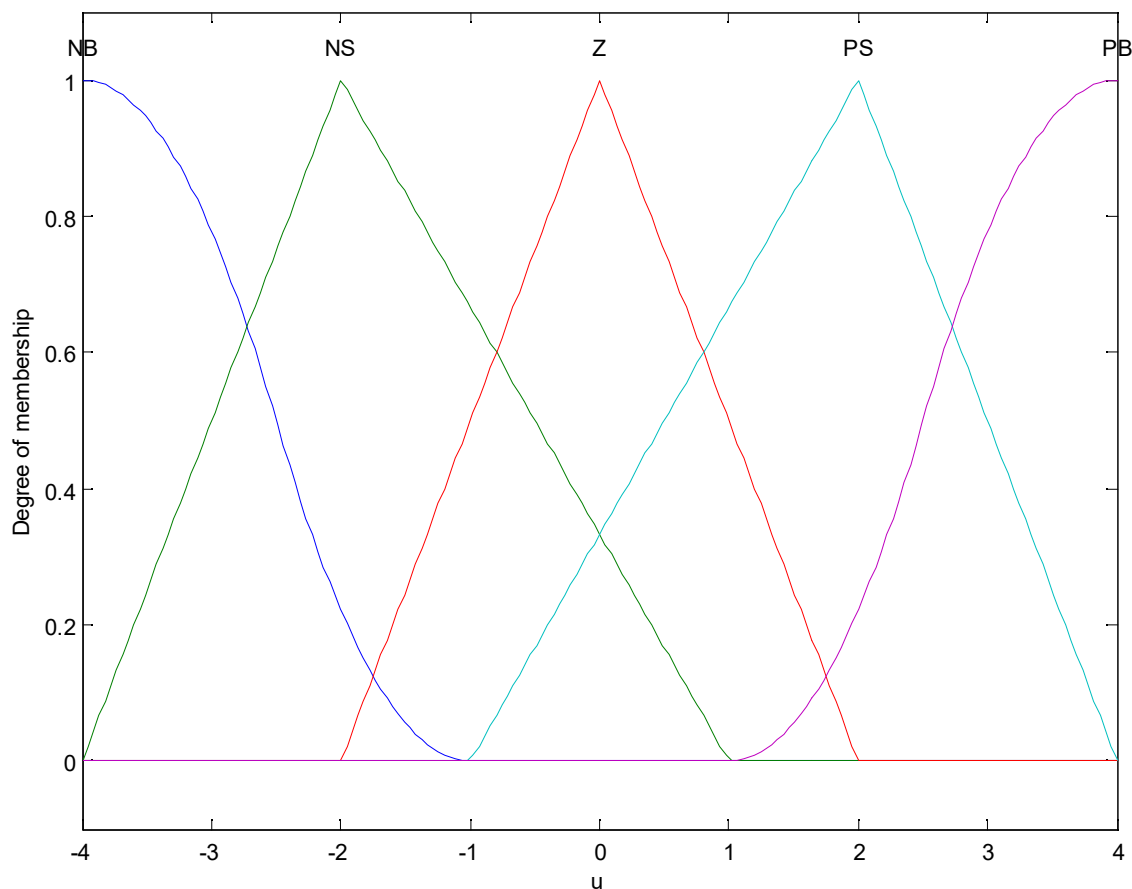


图 4-15 控制器输出隶属度函数

4.2 模糊控制器的结构和设计

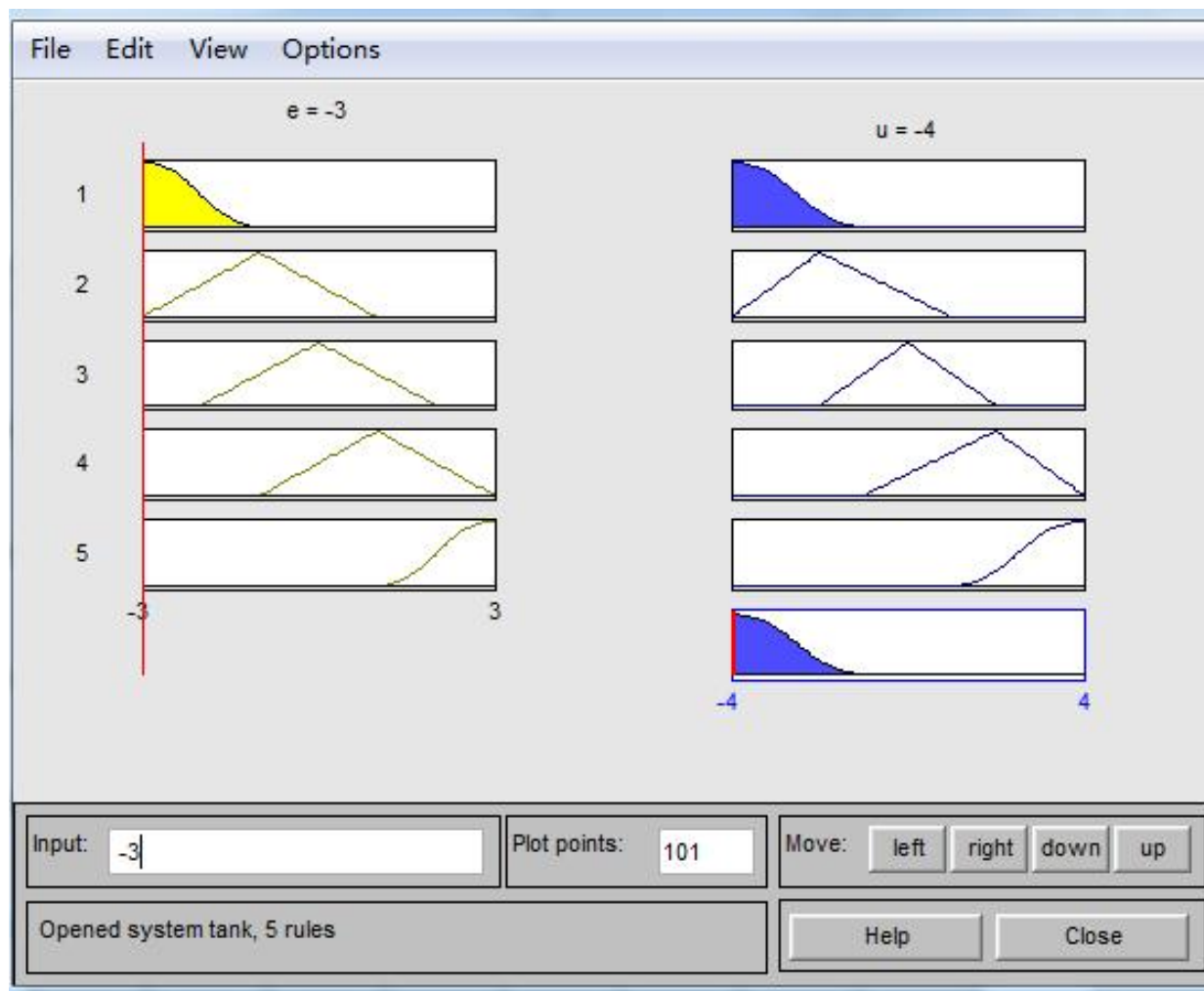


图 4-16 动态仿真模糊系统

4.2 模糊控制器的结构和设计

```
ans =  
  
1. If (e is NB) then (u is NB) (1)  
2. If (e is NS) then (u is NS) (1)  
3. If (e is Z) then (u is Z) (1)  
4. If (e is PS) then (u is PS) (1)  
5. If (e is PB) then (u is PB) (1)  
|  
-----  
fuzzy controller table:e=[-3,+3],u=[-4,+4]  
-----  
  
Ulist =  
  
-4    -2    -2    0    2    2    4
```

e	-3	-2	-1	0	1	2	3
u	-4	-2	-2	0	2	2	4

图 4-17 仿真运行结果(输出模糊控制响应表)

4.2 模糊控制器的结构和设计

4.2.8 模糊控制器的分类

在确定性控制系统中，根据控制器输出的个数，可分为单变量控制系统和多变量控制系统。在模糊控制系统中也可类似地划分为单变量模糊控制和多变量模糊控制。

1 单变量模糊控制器

在单变量模糊控制器（Single Variable Fuzzy Controller — SVFC）中，将其输入变量的个数定义为模糊控制的维数。

4.2 模糊控制器的结构和设计

(1) **一维模糊控制器** 一维模糊控制器的输入变量往往选择为受控量和输入给定的偏差量 e 。由于仅仅采用偏差值，很难反映过程的动态特性品质，因此，所能获得的系统动态性能是不能令人满意的。这种一维模糊控制器往往被用于一阶被控对象。

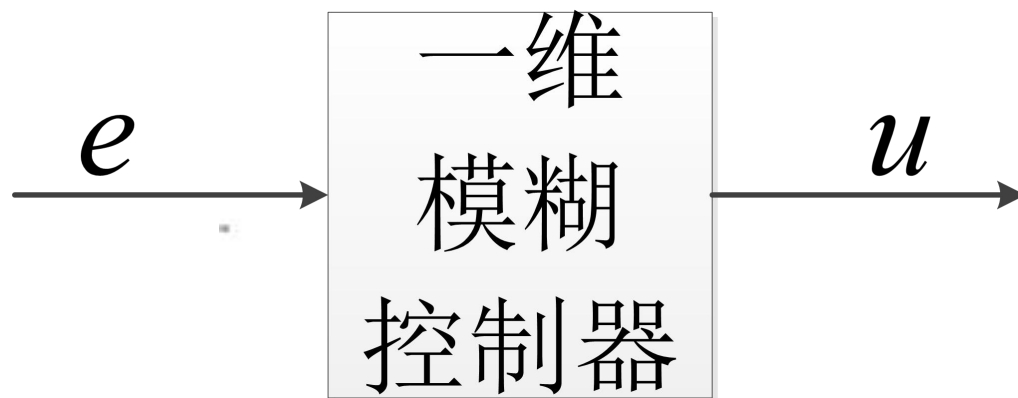


图4-18(a) 一维模糊控制器

4.2 模糊控制器的结构和设计

(2) 二维模糊控制器 二维模糊控制器的两个输入变量基本上都选用受控变量值和输入给定的偏差 e 和偏差变化 ec ，由于它们能够较严格地反映受控过程中输出变量的动态特性，因此，在控制效果上要比一维控制器好得多，也是目前采用较广泛的一类模糊控制器。

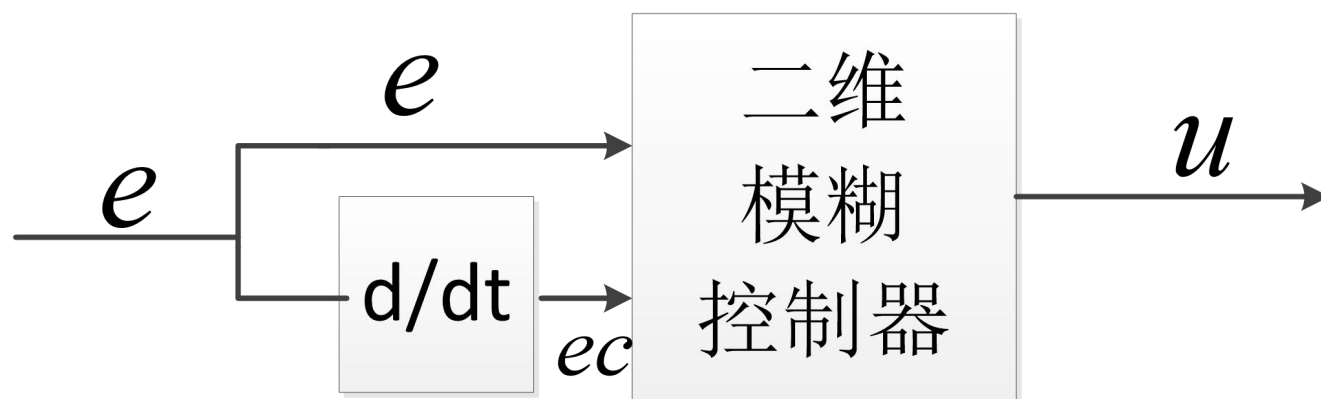


图4-18(b) 二维模糊控制器

4.2 模糊控制器的结构和设计

(3) **三维模糊控制器** 三维模糊控制器的三个输入变量分别为系统偏差量 e 、偏差变化量 ec 和偏差变化的变化率 ecc 。由于这些模糊控制器结构较复杂，推理运算时间长，因此除非对动态特性的要求特别高的场合，一般较少选用三维模糊控制器。

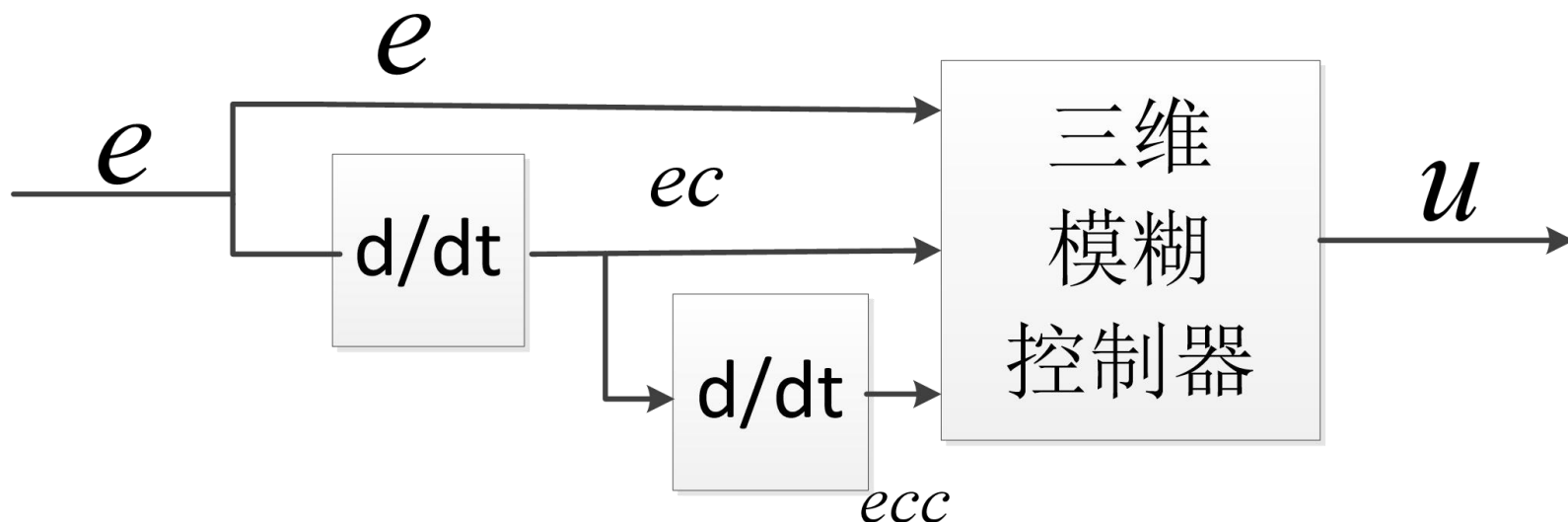


图4-18(c) 三维模糊控制器

4.2 模糊控制器的结构和设计

2. 多变量模糊控制器 (Multiple Variable Fuzzy Controller, MVFC)

模糊控制器具有多个的输出变量，具有多变量结构，称之为多变量模糊控制器。

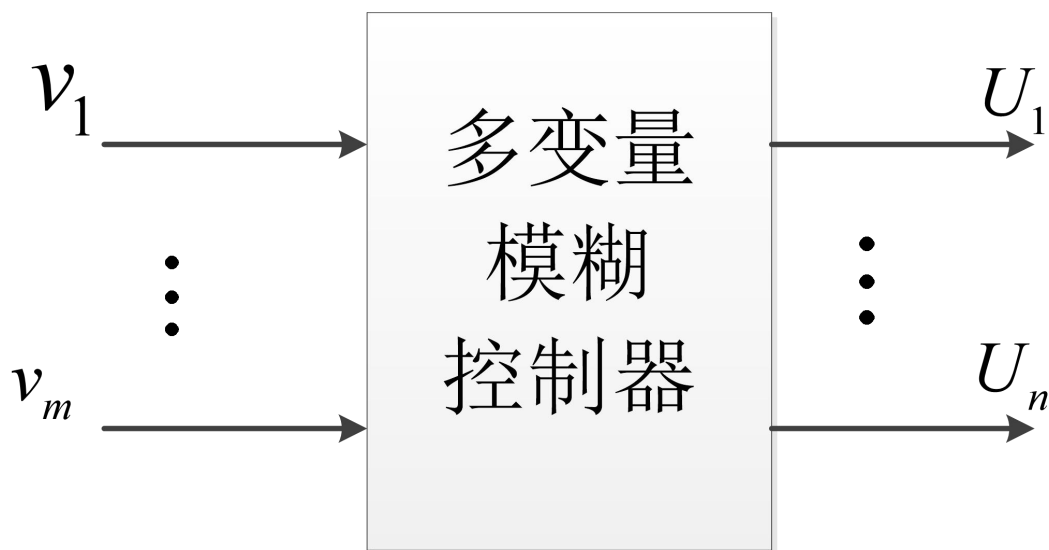


图4-19 多变量模糊控制器

4.2 模糊控制器的结构和设计

要直接设计一个多变量模糊控制器是相当困难的，可利用模糊控制器本身的解耦特点，通过模糊关系方程求解，在控制器结构上实现解耦，即将一个多输入-多输出（MIMO）的模糊控制器，分解成若干个多输入-单输出（MISO）的模糊控制器，这样可采用单变量模糊控制器方法设计。

4.3 模糊控制系统的分类

1 按信号的时变特性分类

(1) 恒值模糊控制系统

系统的指令信号为恒定值，通过模糊控制器消除外界对系统的扰动作用，使系统的输出跟踪输入的恒定值。也称为“自镇定模糊控制系统”，如温度模糊控制系统。

(2) 随动模糊控制系统

系统的指令信号为时间函数，要求系统的输出高精度、快速地跟踪系统输入。也称为“模糊控制跟踪系统”或“模糊控制伺服系统”。

4.3 模糊控制系统的分类

2 按模糊控制的线性特性分类

对开环模糊控制系统 S ，设输入变量为 u ，输出变量为 v 。对任意输入偏差 Δu 和输出偏差 Δv ，满足

$$\frac{\Delta v}{\Delta u} = k, u \in U, v \in V$$

定义线性度 δ ，用于衡量模糊控制系统的线性化程度：

$$\delta = \frac{\Delta v_{\max}}{2\xi\Delta u_{\max}m},$$

其中 $\Delta v_{\max} = v_{\max} - v_{\min}$, $\Delta u_{\max} = u_{\max} - u_{\min}$, ξ 为线性化因子, m 为模糊子集 V 的个数。

4.3 模糊控制系统的分类

设 k_0 为一经验值，则定义模糊系统的线性特性为：

- (1) 当 $|k - k_0| \leq \delta$ 时，S为线性模糊系统；
- (2) 当 $|k - k_0| > \delta$ 时，S为非线性模糊系统。

3 按静态误差是否存在分类

(1) 有差模糊控制系统

将偏差的大小及其偏差变化率作为系统的输入为有差模糊控制系统。

(2) 无差模糊控制系统

引入积分作用，使系统的静差降至最小。

4.3 模糊控制系统的分类

4 按系统控制输入变量的多少分类

控制输入个数为1的系统为单变量模糊控制系统，控制输入个数 >1 的系统为多变量模糊控制系统。

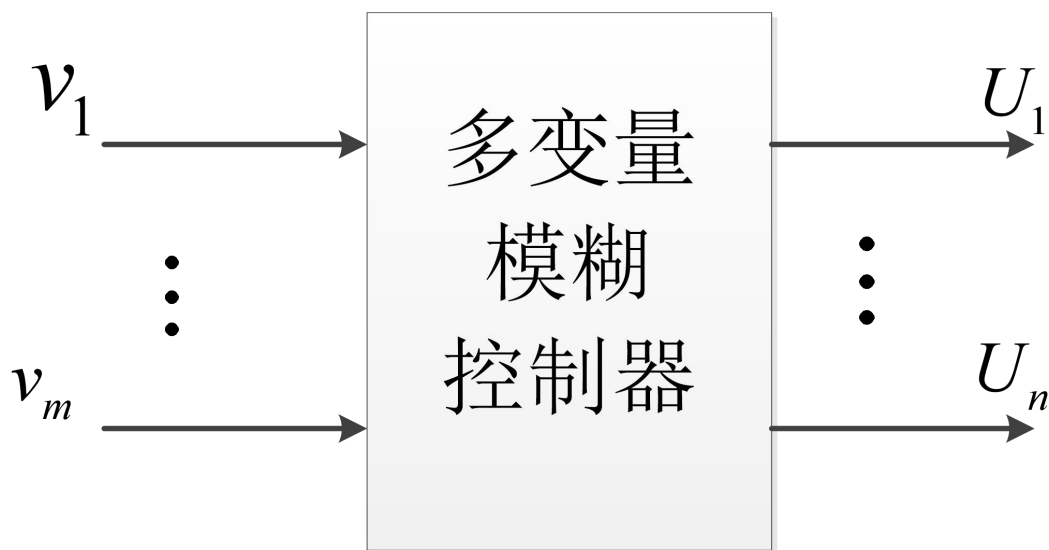


图4-19 多变量模糊控制器

4.4 模糊控制器的Matlab仿真

例4-1： 建立二输入、单输出模糊控制系统，该系统包括两个部分，即模糊控制器的设计和位置跟踪。

1. 模糊控制器的设计（chap4_2.m）

模糊规则表如表4-9所示，控制规则为49条。误差、误差变化率为 $[-3, 3]$ ，控制输入的范围均为 $[-4.5, 4.5]$ 。

通过运行 `showrule(a)`，可得到用于描述模糊系统的49条模糊规则。

4.4 模糊控制器的Matlab仿真

u		e						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ec	NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
	NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
	PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
	PM	NS	Z	PS	PS	PM	PM	PB
	PB	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PB

表4-9 模糊规则表

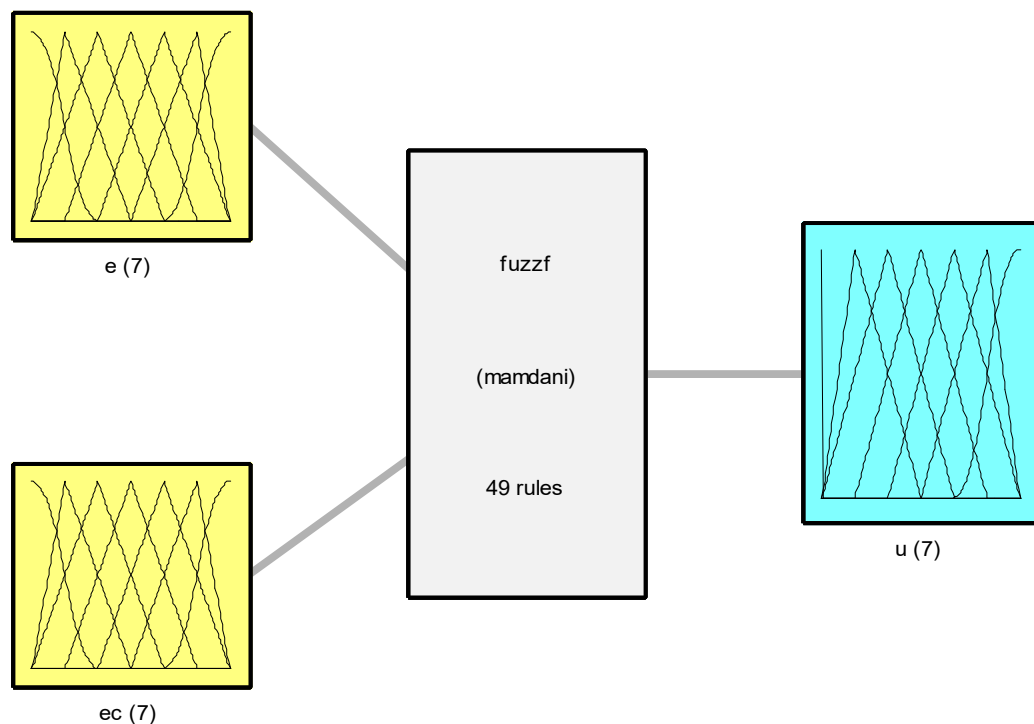
4.4 模糊控制器的 Matlab 仿真

ec e	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-4	-2	-2	-1	-1	0	1
-2	-4	-2	-2	-1	0	1	1
-1	-2	-2	-1	0	1	1	2
-1	-1	-1	0	1	1	2	2
-1	-1	0	1	1	2	3	3
2	0	1	1	2	3	3	3
3	1	1	2	2	3	3	4

表4-10 模糊控制器的响应表

4.4 模糊控制器的 Matlab 仿真

模糊控制器的设计仿真程序见chap4_2.m。在仿真时，模糊推理系统可由命令 `plotfis(a2)` 得到，如图 4-20。



System fuzzf: 2 inputs, 1 outputs, 49 rules

图4-20 模糊推理系统

4.4 模糊控制器的 Matlab 仿真

系统的输入输出隶属度函数如图4-21至4-23所示。

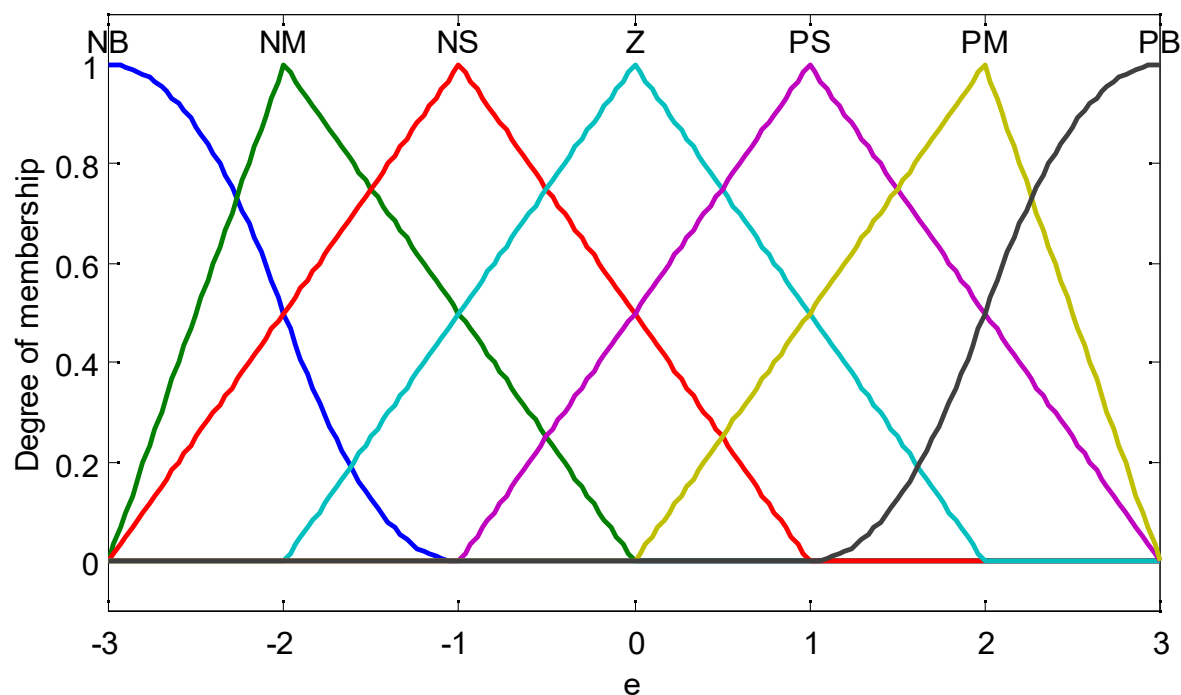


图4-21 偏差隶属度函数

4.4 模糊控制器的 Matlab 仿真

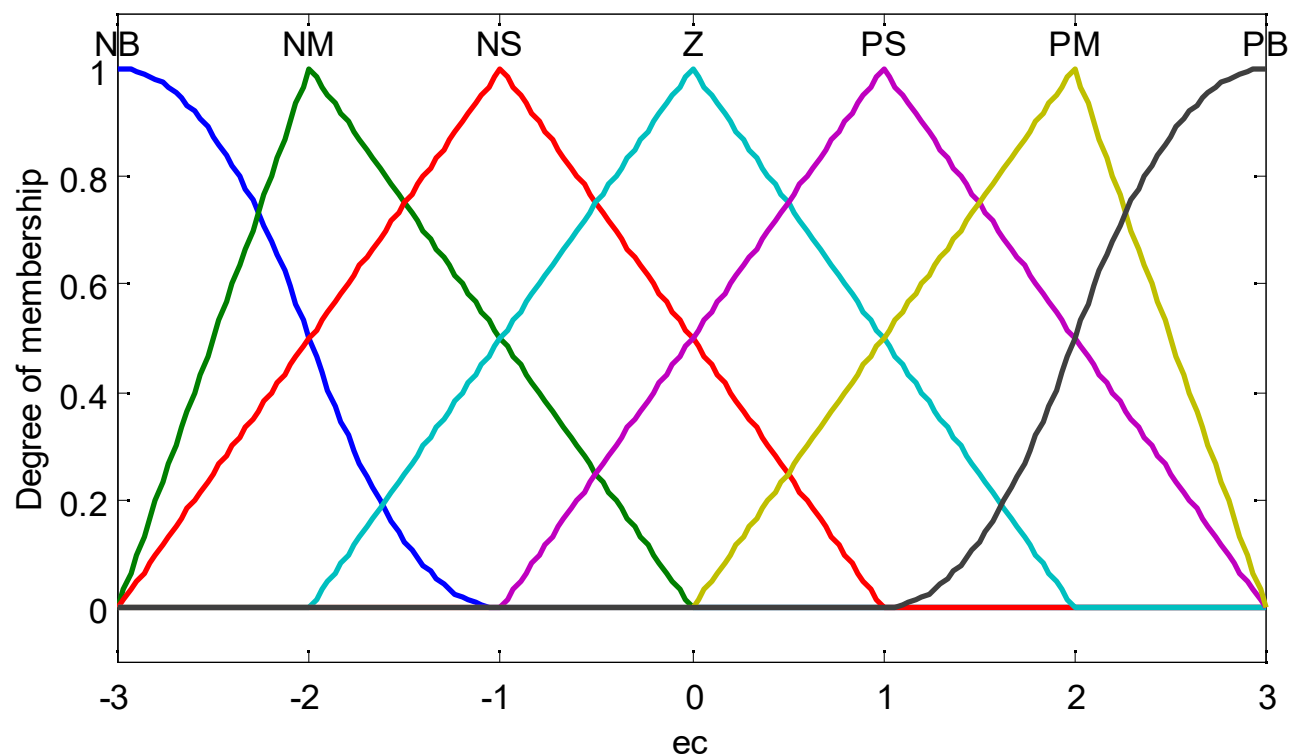


图4-22 偏差变化率隶属度函数

4.4 模糊控制器的 Matlab 仿真

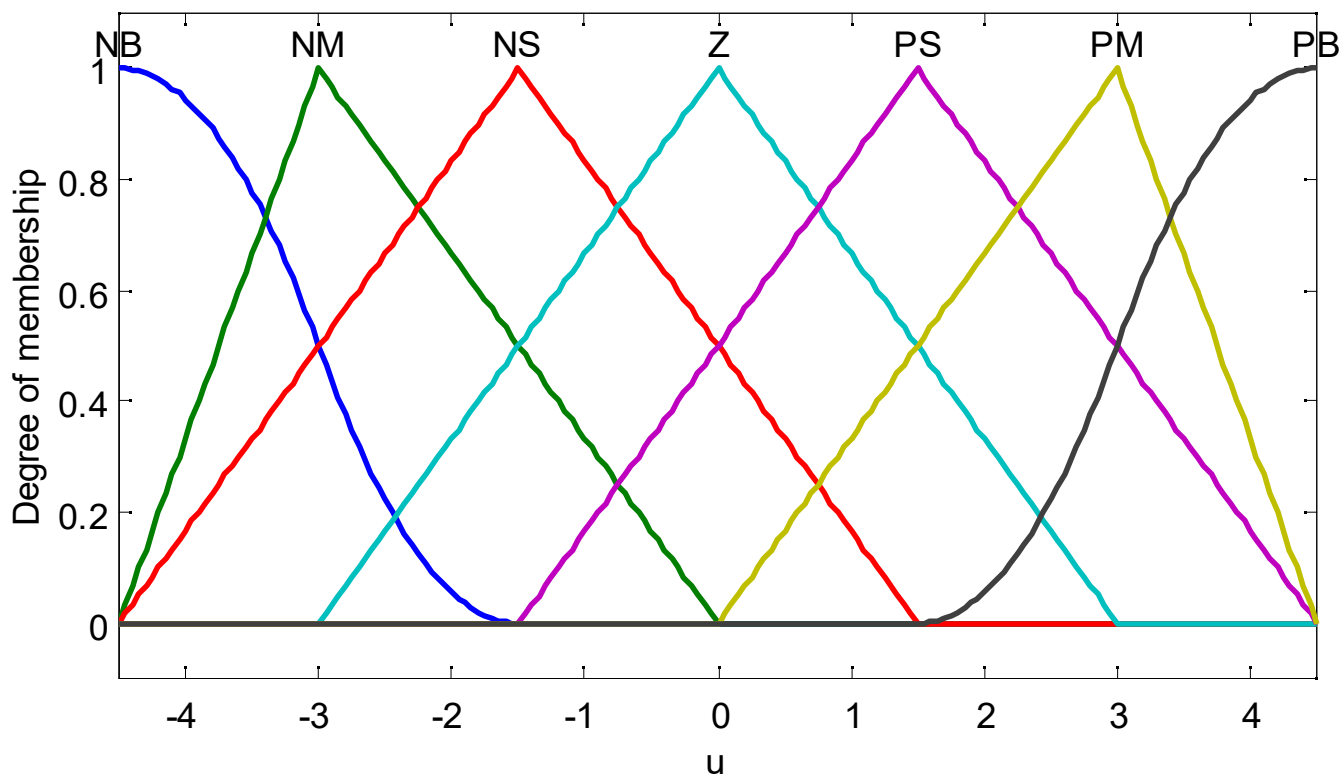


图4-23 控制器输出隶属度函数

4.4 模糊控制器的Matlab仿真

2. 模糊控制位置跟踪

被控对象为

$$G(s) = \frac{400}{s^2 + 500s}$$

首先运行模糊控制器程序chap4_2.m，并将模糊控制系统保存在a2之中。然后运行模糊控制的Simulink仿真程序，位置指令取正弦信号 $0.5\sin(10t)$ ，仿真结果如图4-24所示。

模糊控制位置跟踪的Simulink仿真程序见chap4_3.mdl。

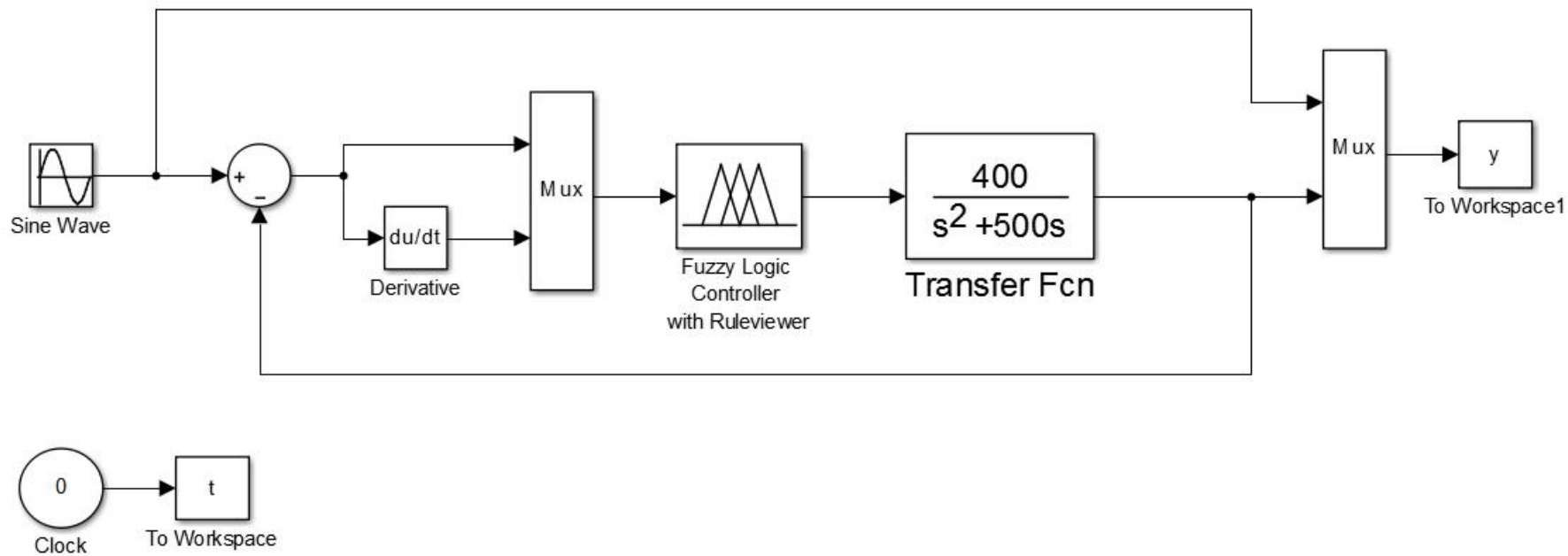


图 Simulink 程序

4.4 模糊控制器的Matlab仿真

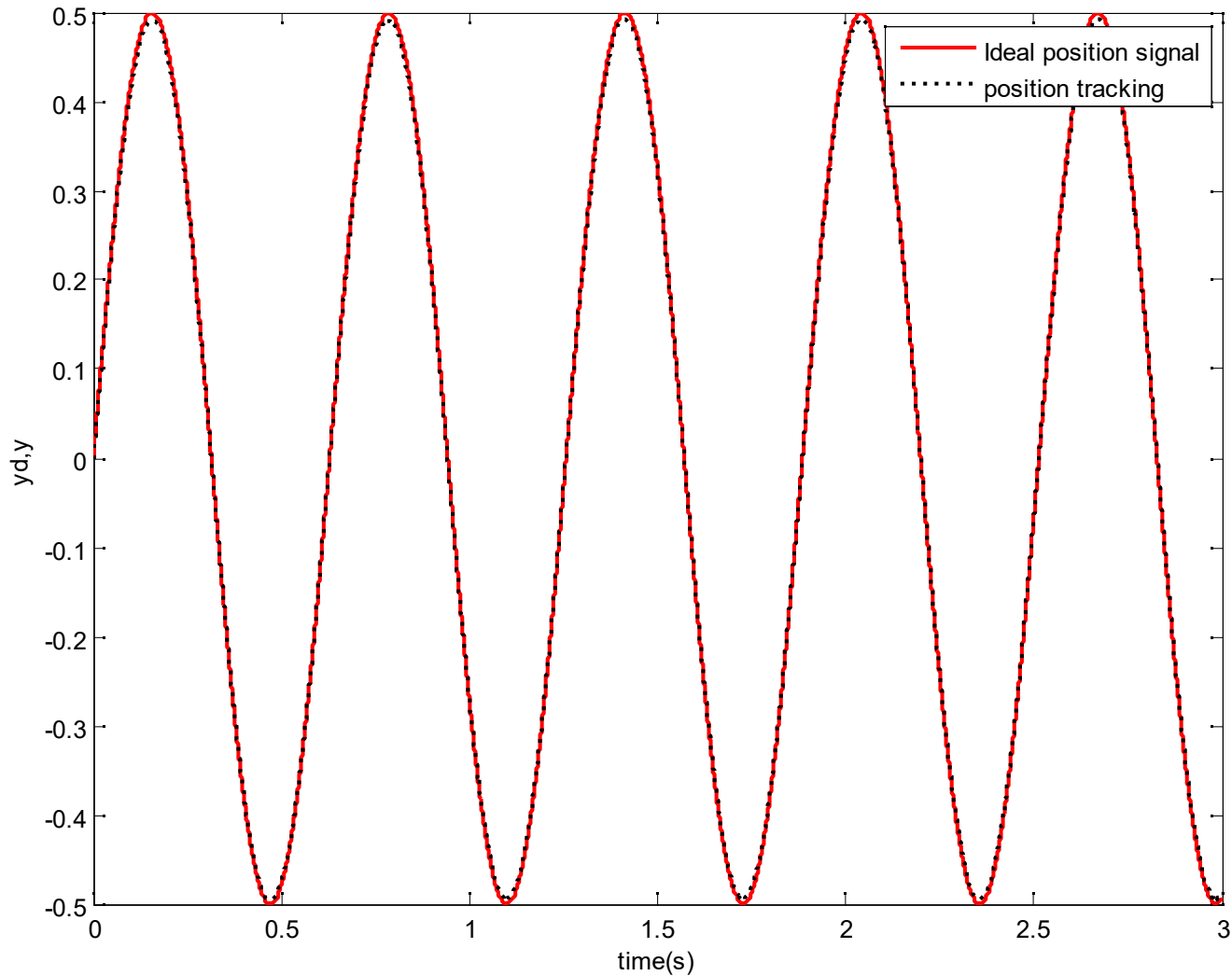


图4-24 正弦位置跟踪

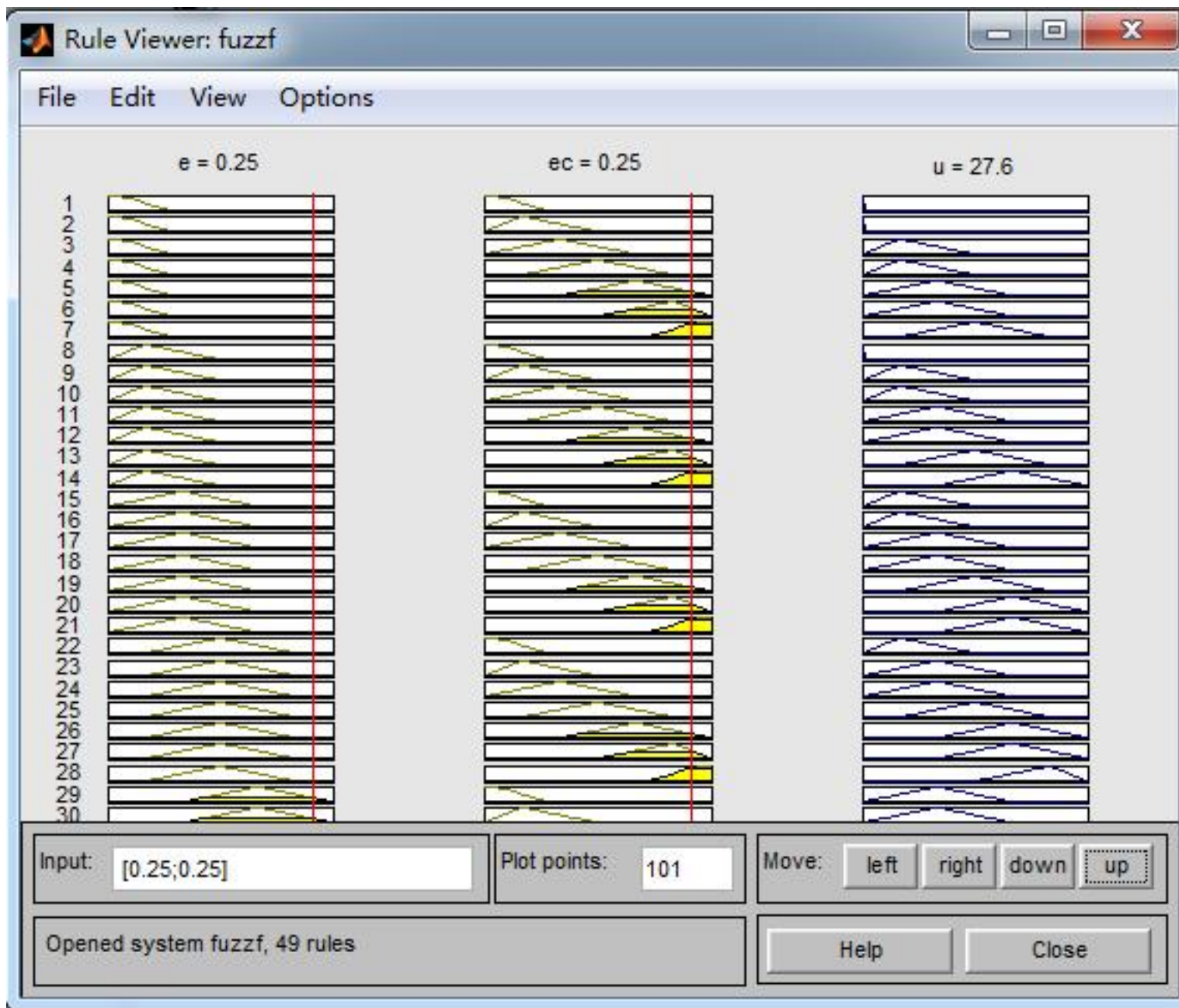


图 4-25 动态仿真模糊系统（rule view）

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

以模糊洗衣机的设计为例，其控制是一个开环的决策过程，模糊控制按以下步骤进行。

1. 确定模糊控制器的结构

选用单变量二维模糊控制器。控制器的输入为衣物的污泥和油脂，输出为洗涤时间。

2. 定义输入输出模糊集

将污泥分为三个模糊集：SD（污泥少），MD（污泥中），LD（污泥多），取值范围为 $[0, 100]$ 。

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

3. 定义隶属函数

选用如下隶属函数：

$$\mu_{\text{污泥}} = \begin{cases} \mu_{SD}(x) = (50 - x) / 50 & 0 \leq x \leq 50 \\ \mu_{MD}(x) = \begin{cases} x / 50 & 0 \leq x \leq 50 \\ (100 - x) / 50 & 50 < x \leq 100 \end{cases} \\ \mu_{LD}(x) = (x - 50) / 50 & 50 < x \leq 100 \end{cases}$$

采用 Matlab 仿真，可实现污泥隶属函数的设计，仿真程序为chap4_4.m，如图4-26所示。

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

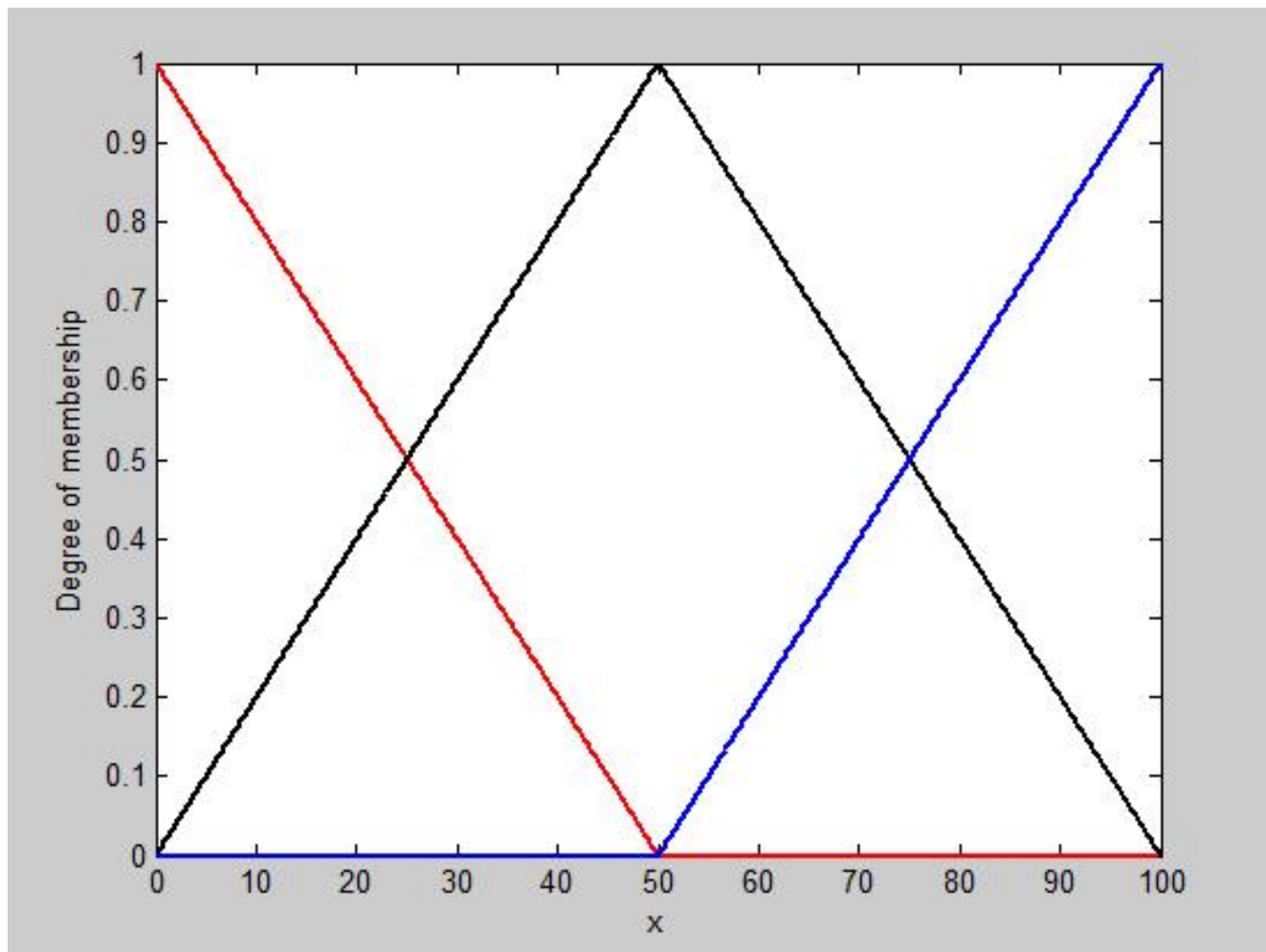


图4-26 污泥隶属函数(SD, MD, LD)

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

将油脂分为三个模糊集：**NG**（无油脂），**MG**（油脂中），**LG**（油脂多），取值范围为[0, 100]。选用如下隶属函数：

$$\mu_{\text{油脂}} = \begin{cases} \mu_{NG}(y) = (50 - y) / 50 & 0 \leq y \leq 50 \\ \mu_{MG}(y) = \begin{cases} y / 50 & 0 \leq y \leq 50 \\ (100 - y) / 50 & 50 < y \leq 100 \end{cases} \\ \mu_{LG}(y) = (y - 50) / 50 & 50 \leq y \leq 100 \end{cases}$$

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

仿真程序同**chap4_4.m**，如下图**4-27** 所示。

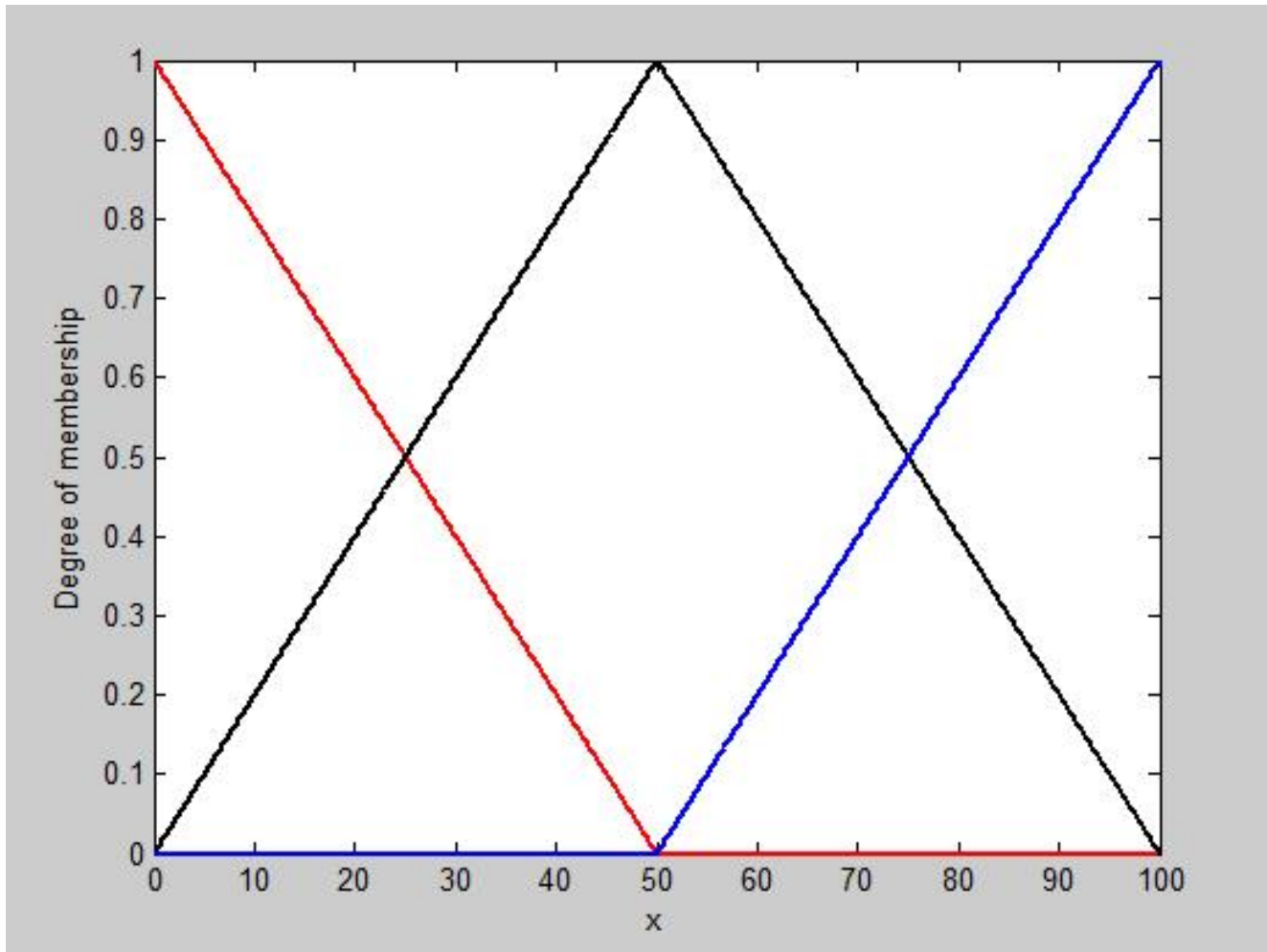


图4-27 油脂隶属函数 (NG, MG, LG)

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

将洗涤时间分为五个模糊集：**VS**（很短），**S**（短），**M**（中等），**L**（长），**VL**（很长），取值范围为[0，60]。选用如下隶属函数：

$$\mu_{\text{洗涤时间}} = \begin{cases} \mu_{VS}(z) = (10 - z) / 10 & 0 \leq z \leq 10 \\ \mu_S(z) = \begin{cases} z / 10 & 0 \leq z \leq 10 \\ (25 - z) / 15 & 10 < z \leq 25 \end{cases} \\ \mu_M(z) = \begin{cases} (z - 10) / 15 & 10 \leq z \leq 25 \\ (40 - z) / 15 & 25 < z \leq 40 \end{cases} \\ \mu_L(z) = \begin{cases} (z - 25) / 15 & 25 \leq z \leq 40 \\ (60 - z) / 20 & 40 < z \leq 60 \end{cases} \\ \mu_{VL}(z) = (z - 40) / 20 & 40 \leq z \leq 60 \end{cases}$$

仿真程序见**chap4_5.m**，结果如图**4-28**所示。

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

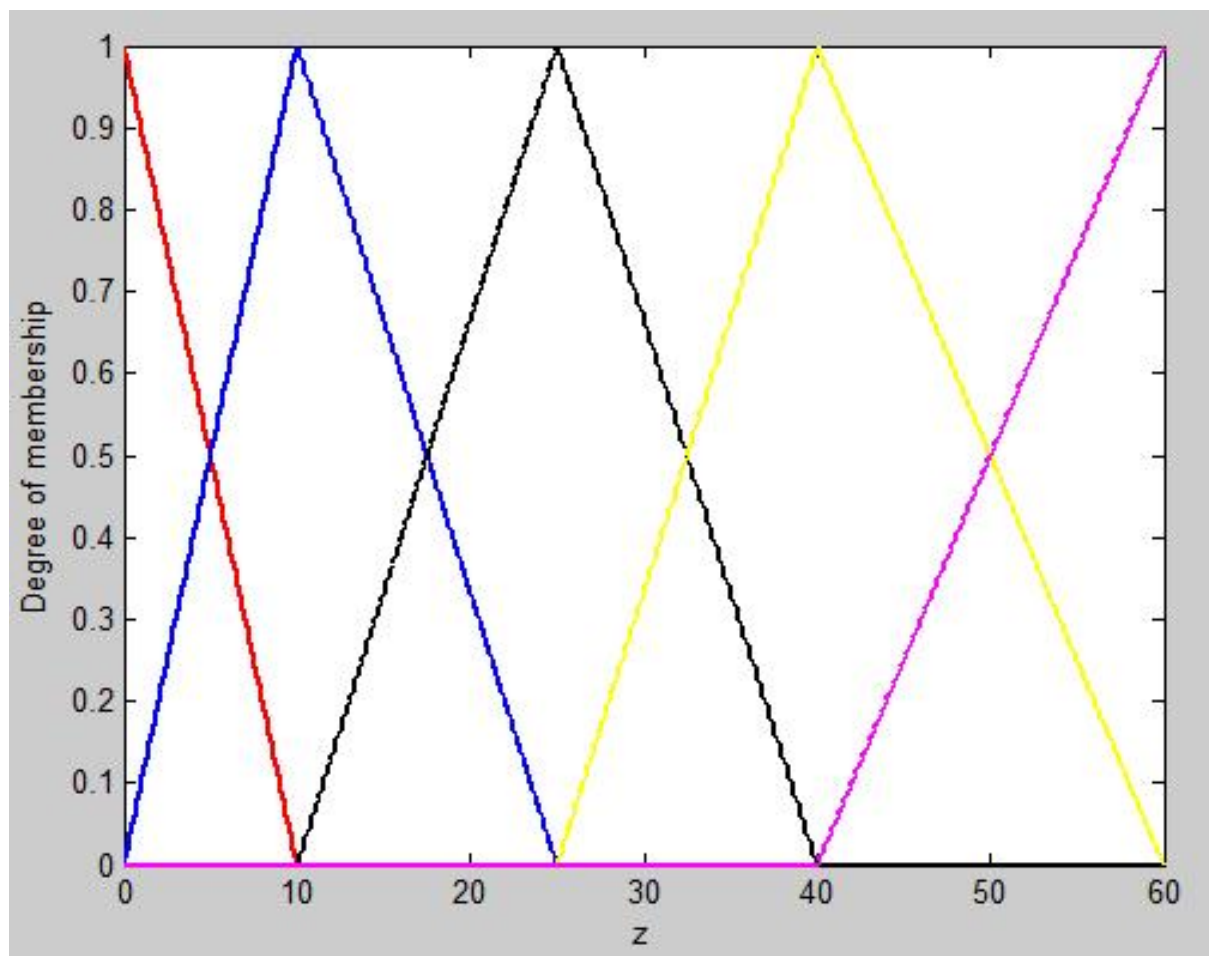


图4-26 洗涤时间隶属函数

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

4. 建立模糊控制规则

根据人的操作经验设计模糊规则，模糊规则设计的标准为：“污泥越多，油脂越多，洗涤时间越长”；“污泥适中，油脂适中，洗涤时间适中”；“污泥越少，油脂越少，洗涤时间越短”。

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

5. 建立模糊控制表

根据模糊规则的设计标准，建立模糊规则表。

洗 涤 时 间 z		污 泥 x		
		SD	MD	LD
油 脂 y	NG	VS [*]	M	L
	MG	S	M	L
	LG	M	L	VL

表4-11 模糊洗衣机的洗涤规则

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

6. 模糊推理

分以下几步进行：

① 规则匹配。假定当前传感器测得的信息为：

$$y_0(\text{油脂}) = 70 \quad x_0(\text{污泥}) = 60$$

分别带入所属的隶属函数中求隶属度：

$$\mu_{SD}(60) = 0 \quad \mu_{MD}(60) = \frac{4}{5} \quad \mu_{LD}(60) = \frac{1}{5}$$

$$\mu_{NG}(70) = 0 \quad \mu_{MG}(70) = \frac{3}{5} \quad \mu_{LG}(70) = \frac{2}{5}$$

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

通过上述四种隶属度，可得到四条相匹配的模糊规则，如下表所示：

洗 涤 时 间 z		污 泥 x		
		SD	MD (4/5)	LD (1/5)
油 脂 y	NG	0	0	0
	MG (3/5)	0	$\mu_M(z)$	$\mu_L(z)$
	LG(2/5)	0	$\mu_L(z)$	$\mu_{VL}(z)$

表4-12 模糊推理结果

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

② 规则触发。由上表可知，被触发的规则有4条：

Rule 1: IF x is MD and y is MG THEN z is M

Rule 2: IF x is MD and y is LG THEN z is L

Rule 3: IF x is LD and y is MG THEN z is L

Rule 4: IF x is LD and y is LG THEN z is VL

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

③ 规则前提推理。在同一条规则内，前提之间通过“与”的关系得到规则结论，前提之间通过取小运算，得到每一条规则总前提的可信度

规则1前提的可信度为： $\min(4/5, 3/5) = 3/5$

规则2前提的可信度为： $\min(4/5, 2/5) = 2/5$

规则3前提的可信度为： $\min(1/5, 3/5) = 1/5$

规则4前提的可信度为： $\min(1/5, 2/5) = 1/5$

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

由此得到洗衣机规则前提可信度表，即规则强度表4-13。

规则前提		污 泥 x		
		SD	MD (4/5)	LD (1/5)
油 脂 y	NG	0	0	0
	MG (3/5)	0	3/5	1/5
	LG(2/5)	0	2/5	1/5

表4-13 规则前提可信度

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

④ 将上述两个表进行“与”运算，得到每条规则总的输出，如表 4-14 所示。

规则前提		污 泥 x		
		SD	MD (4/5)	LD (1/5)
油 脂 y	NG	0	0	0
	MG (3/5)	0	$\min(\frac{3}{5}, \mu_M(z))$	$\min(\frac{1}{5}, \mu_L(z))$
	LG(2/5)	0	$\min(\frac{2}{5}, \mu_L(z))$	$\min(\frac{1}{5}, \mu_{VL}(z))$

表4-14 规则总的可信度

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

⑤ 模糊系统总的输出

模糊系统总的输出为各条规则推理结果的并，即

$$\begin{aligned}\mu_{agg}(z) &= \max \left\{ \min\left(\frac{3}{5}, \mu_M(z)\right), \min\left(\frac{2}{5}, \mu_L(z)\right), \min\left(\frac{1}{5}, \mu_L(z)\right), \min\left(\frac{1}{5}, \mu_{VL}(z)\right) \right\} \\ &= \max \left\{ \min\left(\frac{3}{5}, \mu_M(z)\right), \min\left(\frac{2}{5}, \mu_L(z)\right), \min\left(\frac{1}{5}, \mu_{VL}(z)\right) \right\}\end{aligned}$$

⑥ 反模糊化

模糊系统总的输出实际上是三个规则推理结果的并集，需要进行反模糊化，才能得到精确的推理结果。下面以最大平均法为例，进行反模糊化。

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

将 $\mu = \frac{3}{5}$ 带入洗涤时间隶属函数中的 $\mu_M(z)$, 得到规则前提隶属度 $\mu = \frac{3}{5}$ 与规则结论隶属度 $\mu_M(z)$ 的交点:

$$\mu_M(z) = \frac{z-10}{15} = \frac{3}{5} \quad \mu_M(z) = \frac{40-z}{15} = \frac{3}{5}$$

得: 采用最大平均法, 可得精确输出

$$z_1 = 19 \quad z_2 = 31$$

$$z^* = \frac{z_1 + z_2}{2} = \frac{19 + 31}{2} = 25$$

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

⑦仿真实例：采用**MATLAB**中模糊控制工具箱中的模糊命令设计洗衣机模糊控制系统，采用本节的隶属函数，按上述步骤设计模糊系统。取 $x=60$ ， $y=70$ ，反模糊化采用重心法，模糊推理结果为 **33.7**。利用命令 **showrule** 可观察规则库，利用命令 **ruleview** 可实现模糊控制的动态仿真。动态仿真模糊系统如图 4-27 所示。

仿真程序：**chap4_6.m**

4.5 模糊控制器设计实例-洗衣机模糊控制

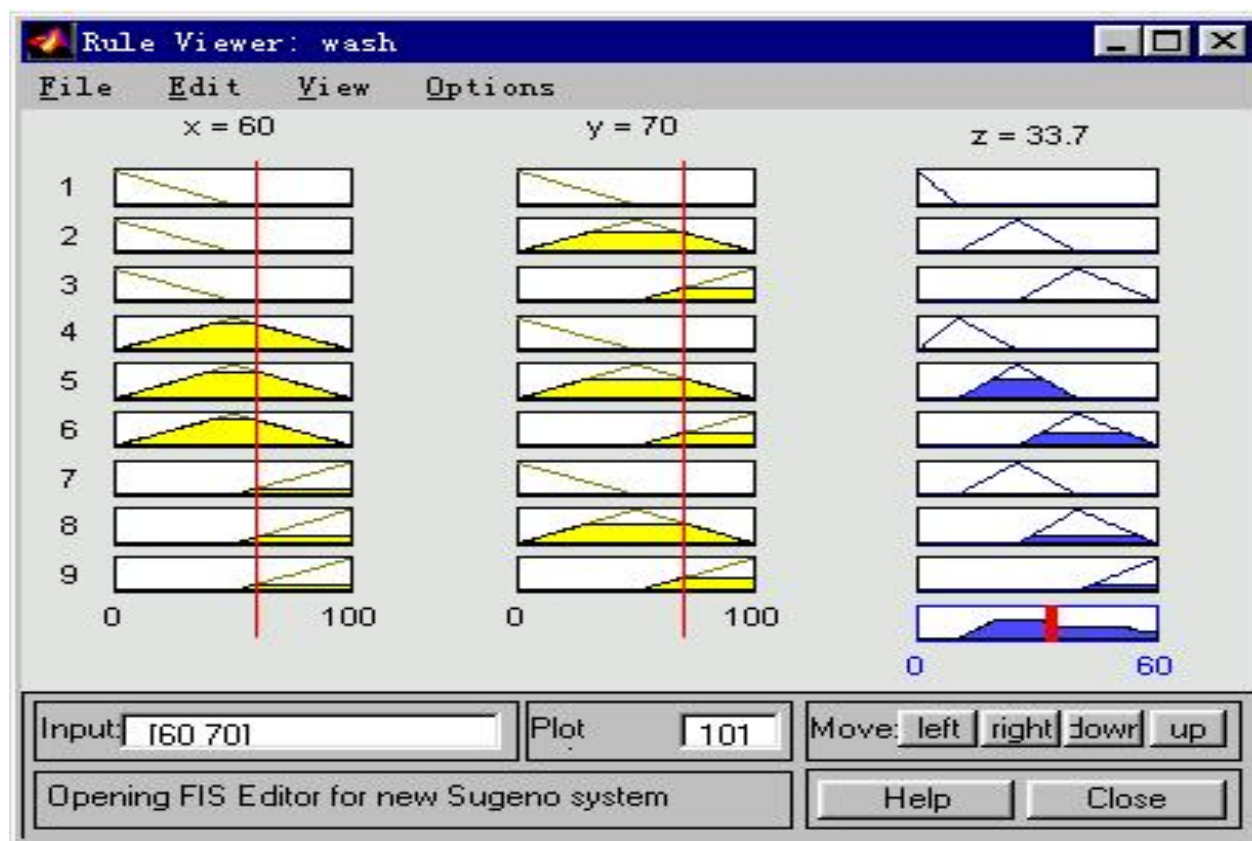


图 4-27 动态仿真模糊系统

4.6 模糊自适应整定PID控制

4.6.1 模糊自适应整定PID控制原理

在常规模糊控制器中， k_p ， k_i ， k_d 固定，会给系统的控制性能带来一些不利的影响：

- 在大误差范围时，不能快速地消除误差，动态响应速度受到限制；
- 在小偏差范围时存在一个调节死区，此时的控制输出为0，但 e 的实际值可能并非为0，导致系统轨迹在0区附近的振荡；
- 当被控对象参数发生变化，或受到随机干扰影响时，控制器不能很好地适应，会影响模糊控制的效果。

为使系统性能不断改善，并适应不断变化的情况，保证控制达到预期要求，需要对 k_p ， k_i ， k_d 进行在线实时修改。

4.6 模糊自适应整定**PID**控制

专家**PID**控制

把经典的**PID**控制与先进的专家系统相结合，将操作人员（专家）长期实践积累的经验知识用控制规则模型化，然后运用推理便可对**PID**参数实现最佳调整。

4.6 模糊自适应整定PID控制

自适应模糊PID控制器

把规则的条件、操作用模糊集表示，并把这些模糊控制规则以及有关信息(如评价指标、初始PID参数等)作为知识存入计算机知识库中，然后计算机根据控制系统的实际响应情况（即专家系统的输入条件），运用模糊推理，即可自动实现对PID参数的最佳调整。

4.6 模糊自适应整定PID控制

离散PID控制算法为

$$u(k) = k_p e(k) + k_i T \sum_{j=0}^k e(j) + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T}$$

式中， k 为采样序号， T 为采样时间。

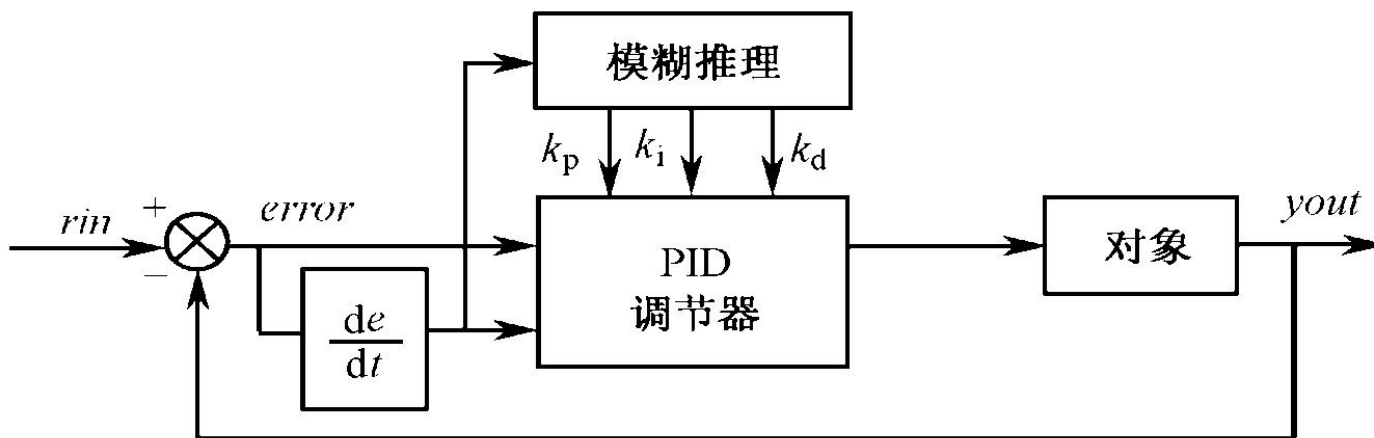


图4-28 自适应模糊PID控制器结构

4.6 模糊自适应整定PID控制

PID参数模糊自整定是找出PID三个参数 k_p , k_i , k_d 与 e 和 ec 之间的模糊关系，在运行中通过不断检测 e 和 ec ，根据模糊控制原理来对3个参数进行在线修改，以满足不同 e 和 ec 时对控制参数的不同要求，而使被控对象有良好的动、静态性能。

4.6 模糊自适应整定PID控制

- (1) k_p : 加快系统的响应速度, 提高系统的调节精度。 k_p 越大, 响应速度越快, 调节精度越高, 但易产生超调, 甚至会导致系统不稳定。 k_p 取值过小, 会降低调节精度, 使响应速度缓慢, 从而延长调节时间, 使系统静态、动态特性变坏。
- (2) k_i : 消除系统的稳态误差。 k_i 越大, 系统的静态误差消除越快, 但 k_i 过大, 在响应过程的初期会产生积分饱和现象, 从而引起响应过程的较大超调。若 k_i 过小, 将使系统静态误差难以消除, 影响系统的调节精度。
- (3) k_d : 在响应过程中抑制偏差向任何方向的变化, 对偏差变化进行提前预报。但 k_d 过大, 会使响应过程提前制动, 从而延长调节时间, 而且会降低系统的抗干扰性能。

4.6 模糊自适应整定PID控制

以**PI**参数整定为例，必须考虑到在不同时刻两个参数的作用以及相互之间的互联关系。

模糊自整定**PI**是在**PI**算法的基础上，通过计算当前系统误差 e 和误差变化率 ec ，利用模糊规则进行模糊推理，查询模糊矩阵表进行参数调整。

4.6 模糊自适应整定PID控制

模糊控制设计的核心是总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验，建立合适的模糊规则表，得到针对 k_p
 k_i 两个参数分别整定的模糊控制表。

(1) k_p 的模糊整定规则表

Δk_p \ ec		N	Z	P
e				
N		N	N	N
Z		N	P	P
P		P	P	P

表4-15 k_p 的模糊规则表

4.6 模糊自适应整定PID控制

(2) k_i 的模糊整定规则表

Δk_i \ ec		N	Z	P
e				
N		Z	Z	Z
Z		P	P	P
P		Z	Z	Z

表4-16 k_i 的模糊规则表

4.6 模糊自适应整定PID控制

(3) 自适应校正方法

将系统误差 e 和误差变化率 ec 变化范围定义为模糊集上的论域。

$$e, ec = \{-1, 0, 1\}$$

其模糊子集为 $e, ec = \{N, O, P\}$, 子集中元素分别代表负, 零, 正。设 e 、 ec 和两个系数 k_p 、 k_i 均服从正态分布, 因此可得出各模糊子集的隶属度。根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制模型, 应用模糊合成推理设计**PI**参数的模糊矩阵表, 查出修正参数代入下式计算。

$$k_p = k_{p0} + \Delta k_p$$

$$k_i = k_{i0} + \Delta k_i$$

4.6 模糊自适应整定PID控制

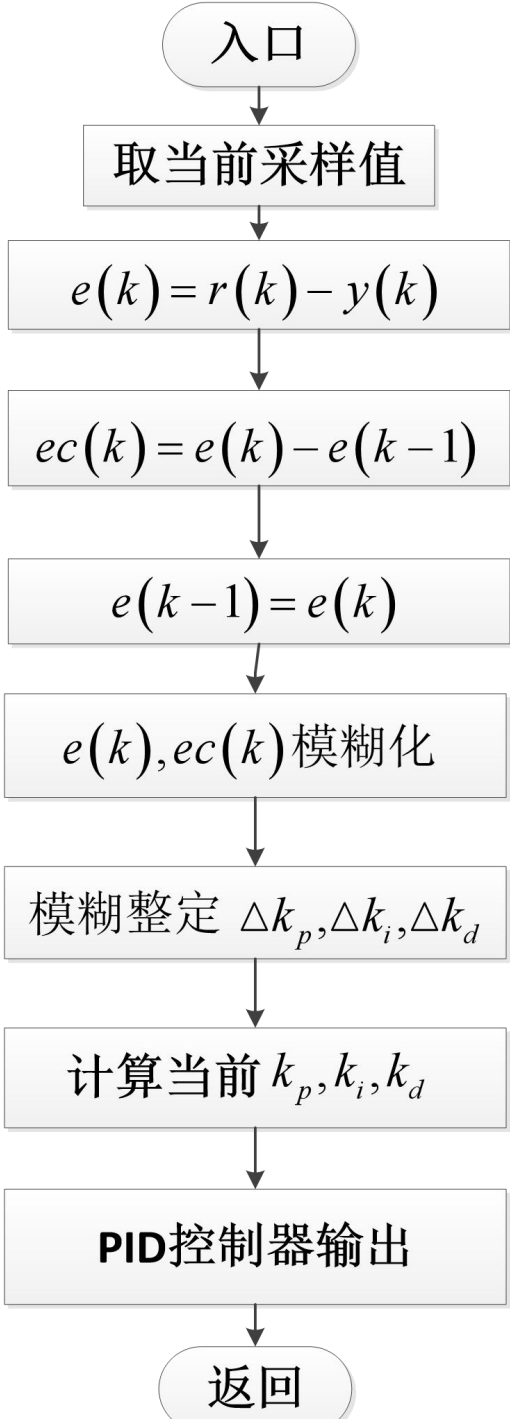


图4-29 工作流程图

4.6 模糊自适应整定PID控制

4.6.2 仿真实例

被控对象为

$$G_p(s) = \frac{133}{s^2 + 25s}$$

采样时间为**1ms**，采用**z**变换进行离散化，离散化后的被控对象为：

$$\begin{aligned} y(k) = & -\text{den}(2)y(k-1) - \text{den}(3)y(k-2) \\ & + \text{num}(2)u(k-1) + \text{num}(3)u(k-2) \end{aligned}$$

位置指令为单位阶跃信号。仿真时，先运行模糊推理系统设计程序**chap4_7a.m**，实现模糊推理系统 **fuzzpid.fis** 的设计，并将此模糊推理系统调入内存中，然后运行模糊控制程序**chap4_7b.m**。

4.6 模糊自适应整定PID控制

在程序chap4_7a.m中，根据模糊规则表4-15至4-16，分别对 e 、 ec 、 k_p 、 k_i 进行隶属函数的设计。在MATLAB环境下，对模糊系统 a ，运行 plotmf 命令，可得到模糊系统的隶属函数，如图4-30至4-33所示。

4.6 模糊自适应整定PID控制

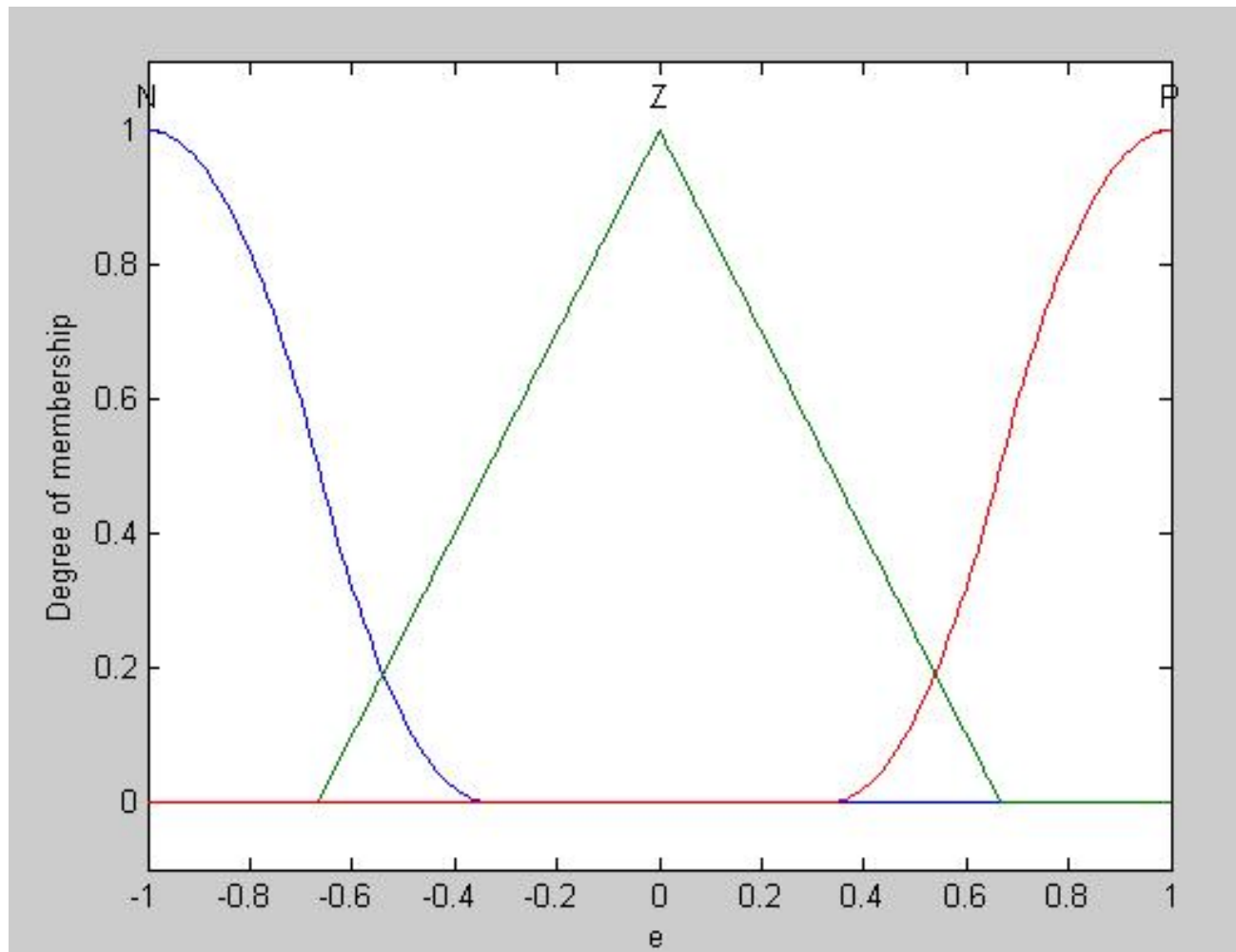


图4-30 误差 e 的隶属函数

4.6 模糊自适应整定PID控制

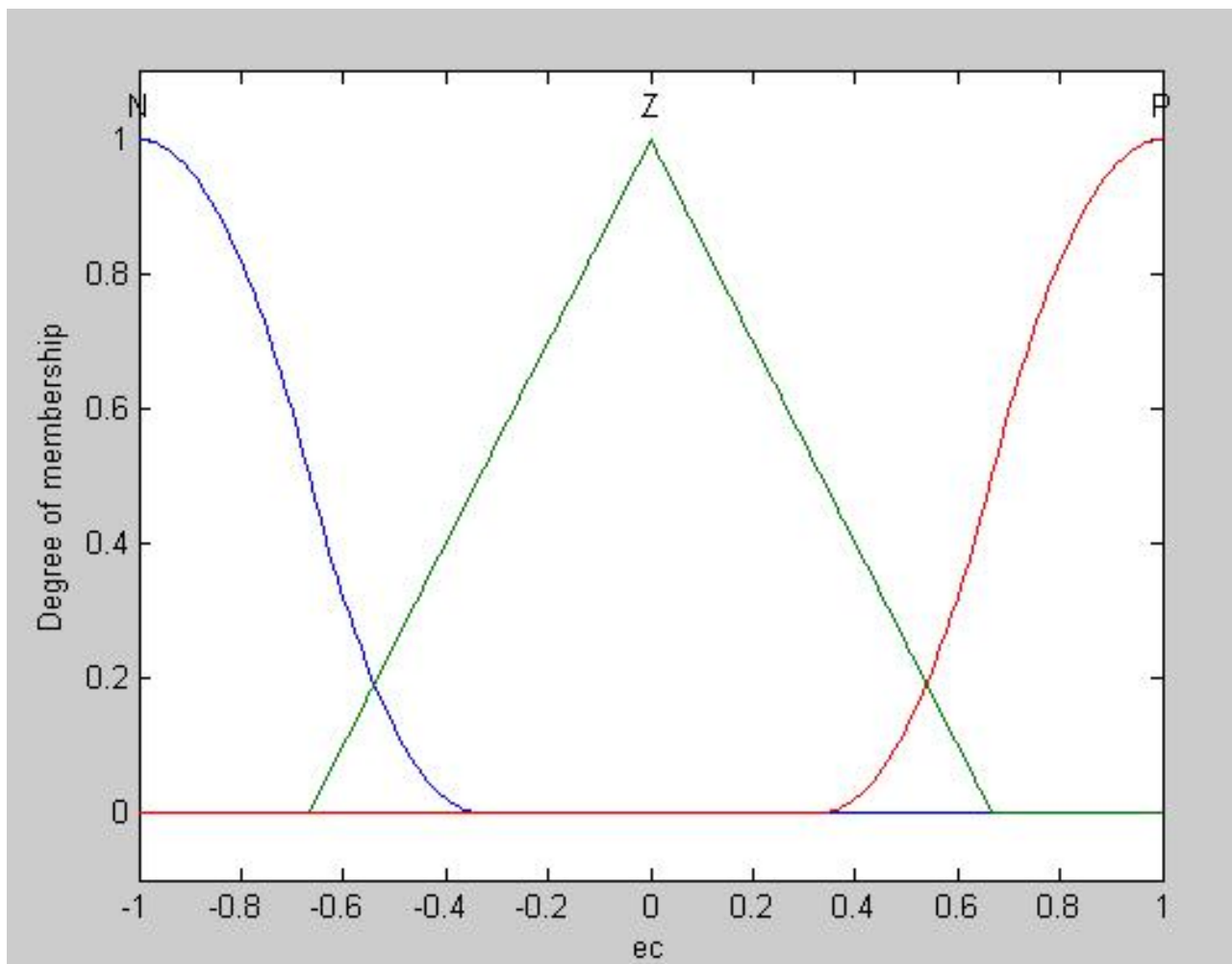


图4-31 误差变化率 ec 的隶属函数

4.6 模糊自适应整定PID控制

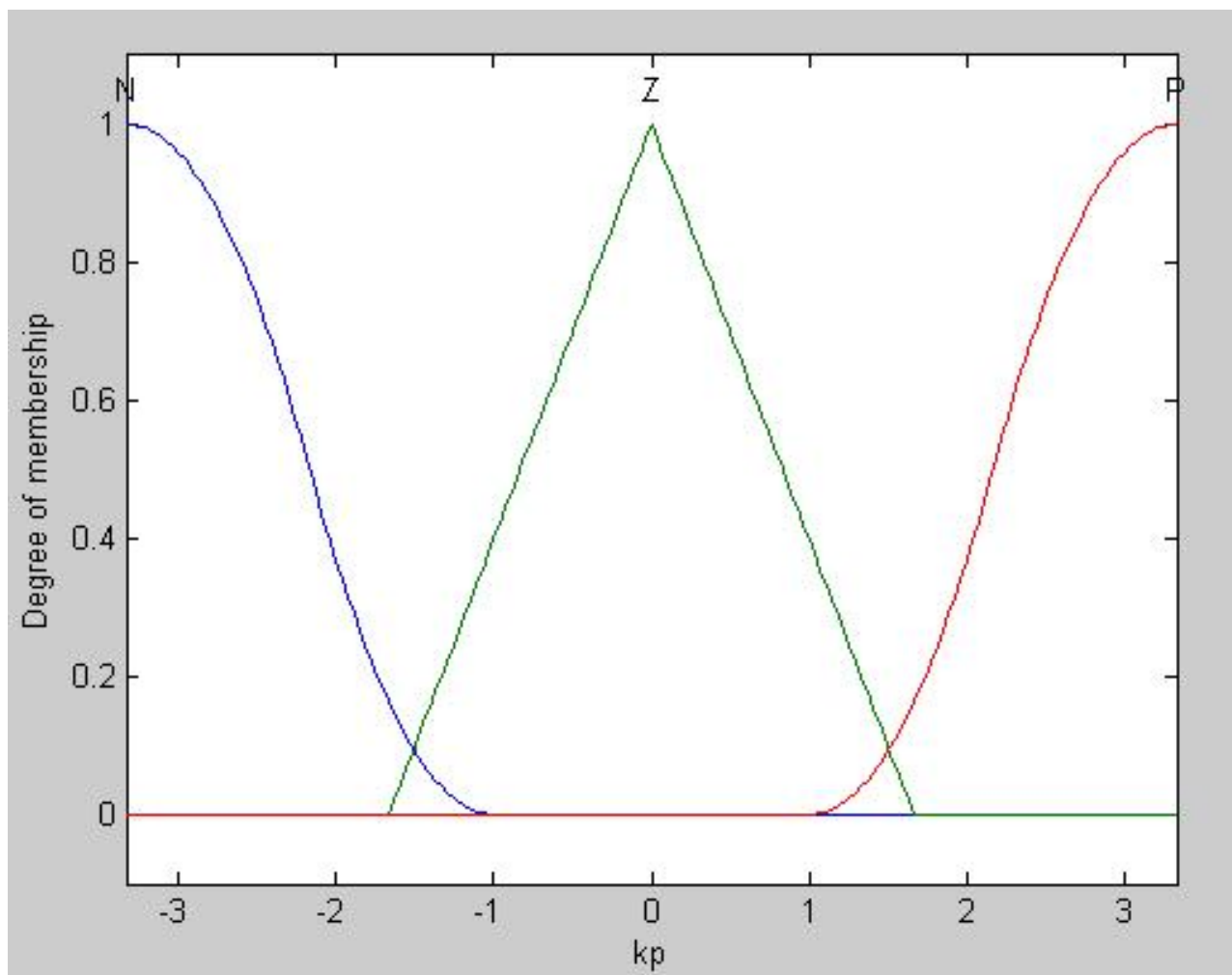


图4-32 k_p 的隶属函数

4.6 模糊自适应整定PID控制

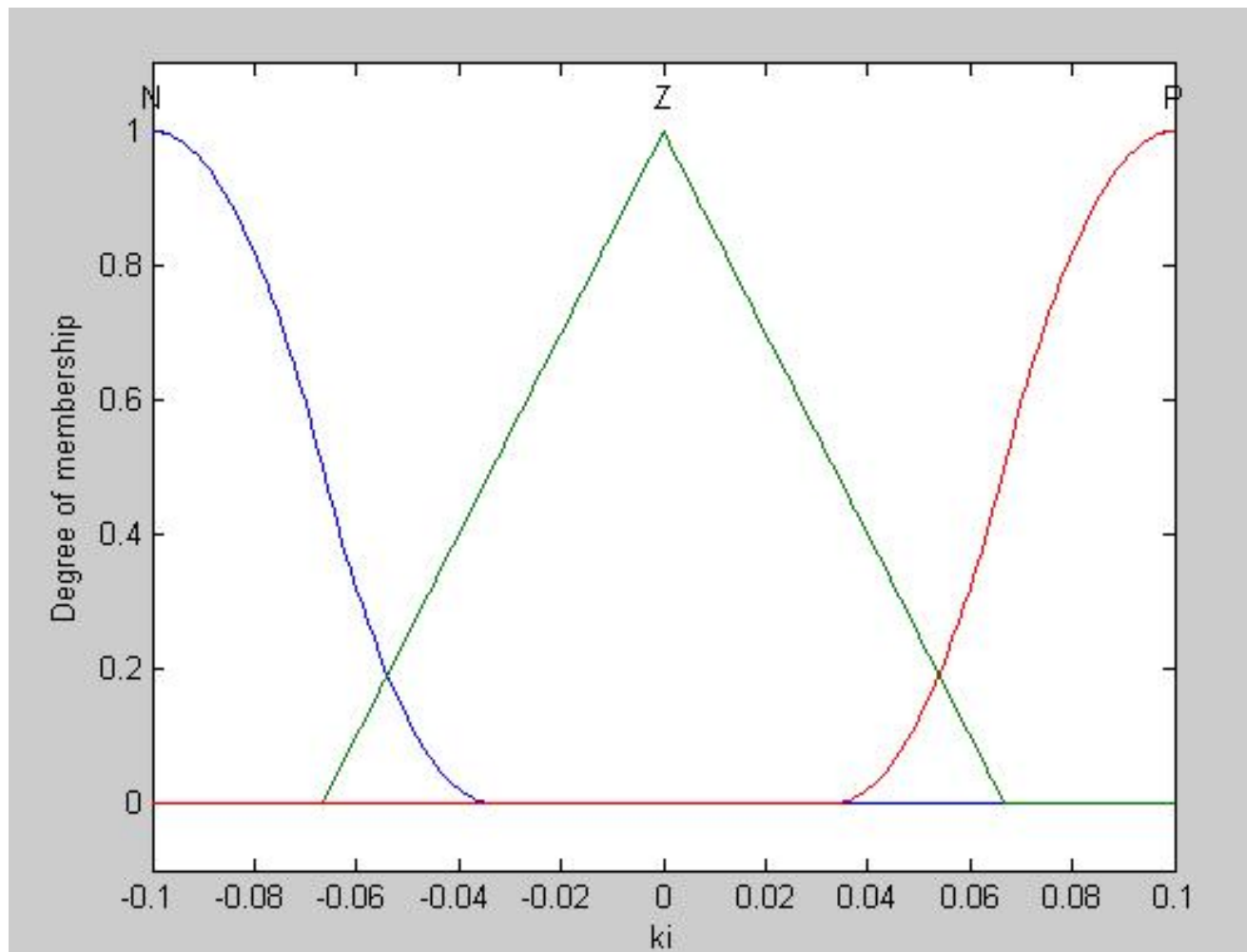


图4-33 k_i 的隶属函数

4.6 模糊自适应整定PID控制

❖ 运行命令showrule可显示模糊规则。

- (1) if (e is N) and (ec is N) then (kp is N) (ki is Z)
- (2) if (e is N) and (ec is Z) then (kp is N) (ki is Z)
- (3) if (e is N) and (ec is P) then (kp is N) (ki is Z)
- (4) if (e is Z) and (ec is N) then (kp is N) (ki is P)
- (5) if (e is Z) and (ec is Z) then (kp is P) (ki is P)
- (6) if (e is Z) and (ec is P) then (kp is P) (ki is P)
- (7) if (e is P) and (ec is N) then (kp is P) (ki is Z)
- (8) if (e is P) and (ec is Z) then (kp is P) (ki is Z)
- (9) if (e is P) and (ec is P) then (kp is P) (ki is Z)

4.6 模糊自适应整定PID控制

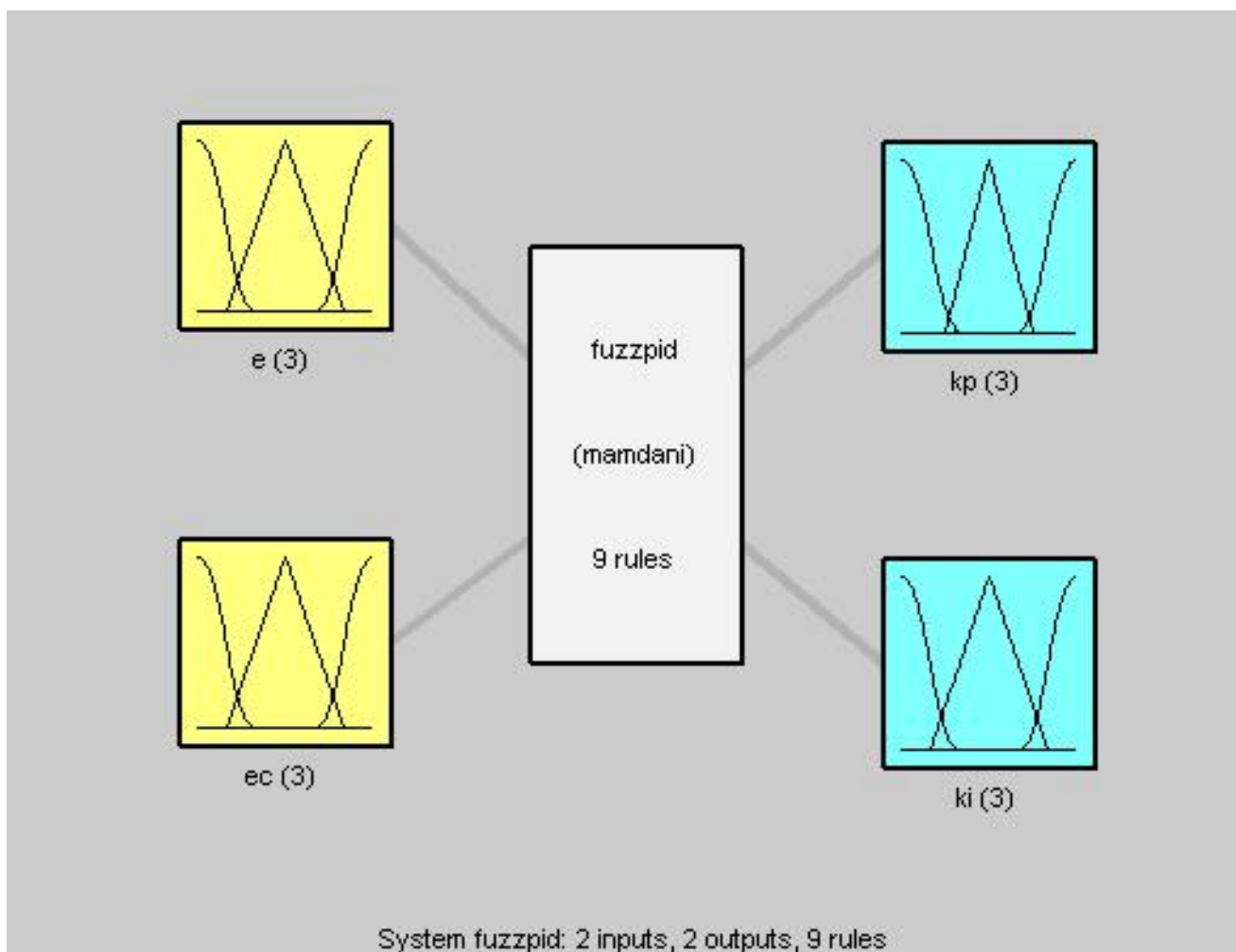


图4-34 模糊系统 `fuzzpid.fis` 的结构(plotfis)

4.6 模糊自适应整定PID控制

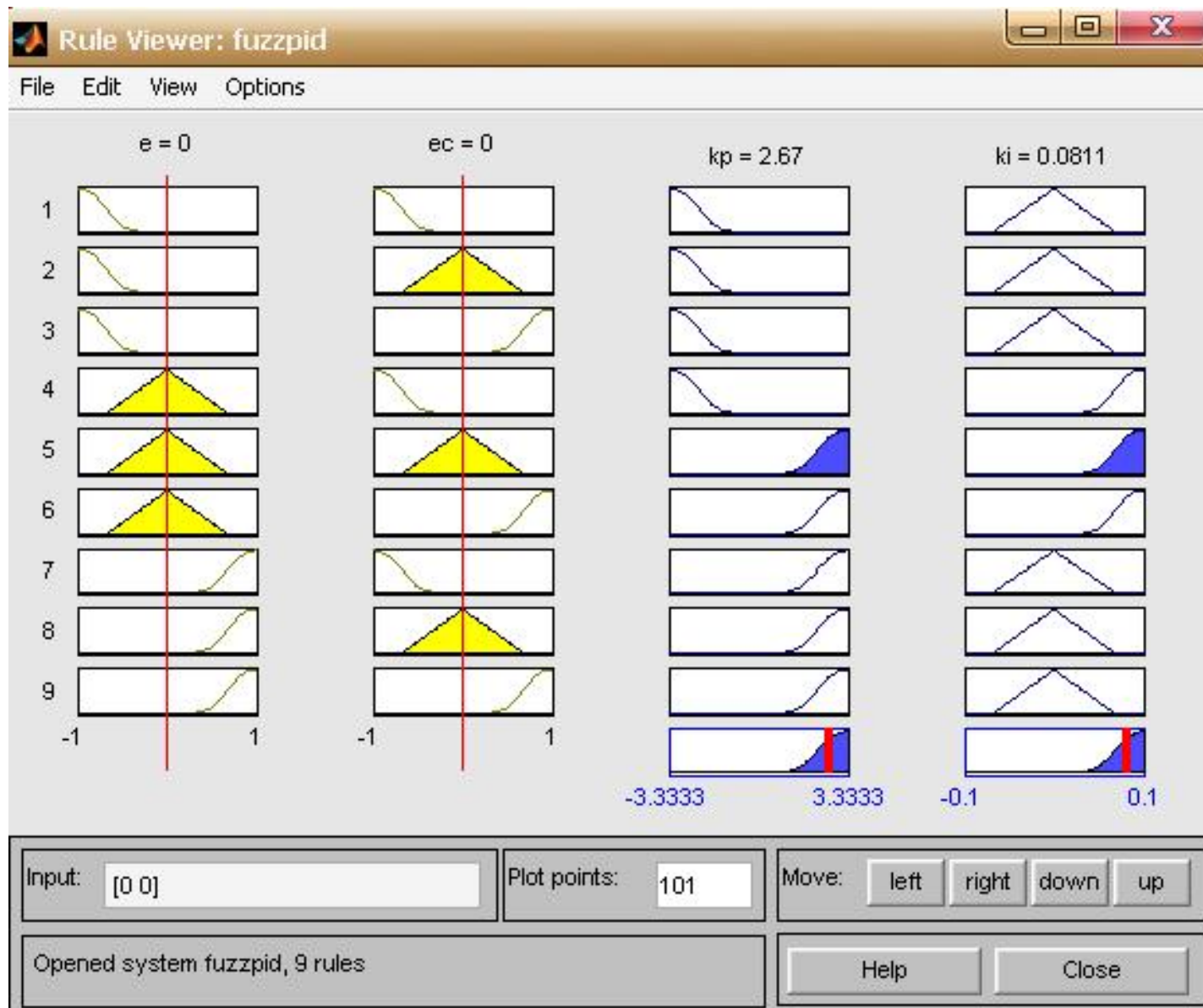


图4-35 模糊推理系统的动态仿真环境(rule view)

4.6 模糊自适应整定PID控制

在程序**chap4_7b.m**中，利用所设计的模糊系统**fuzzpid.fis**进行**PI**控制参数的整定，为了显示模糊规则调整效果，取 k_p 、 k_i 初始值为零，响应结果及**PI**控制参数的自适应变化如图**4-36**至**4-37**所示。

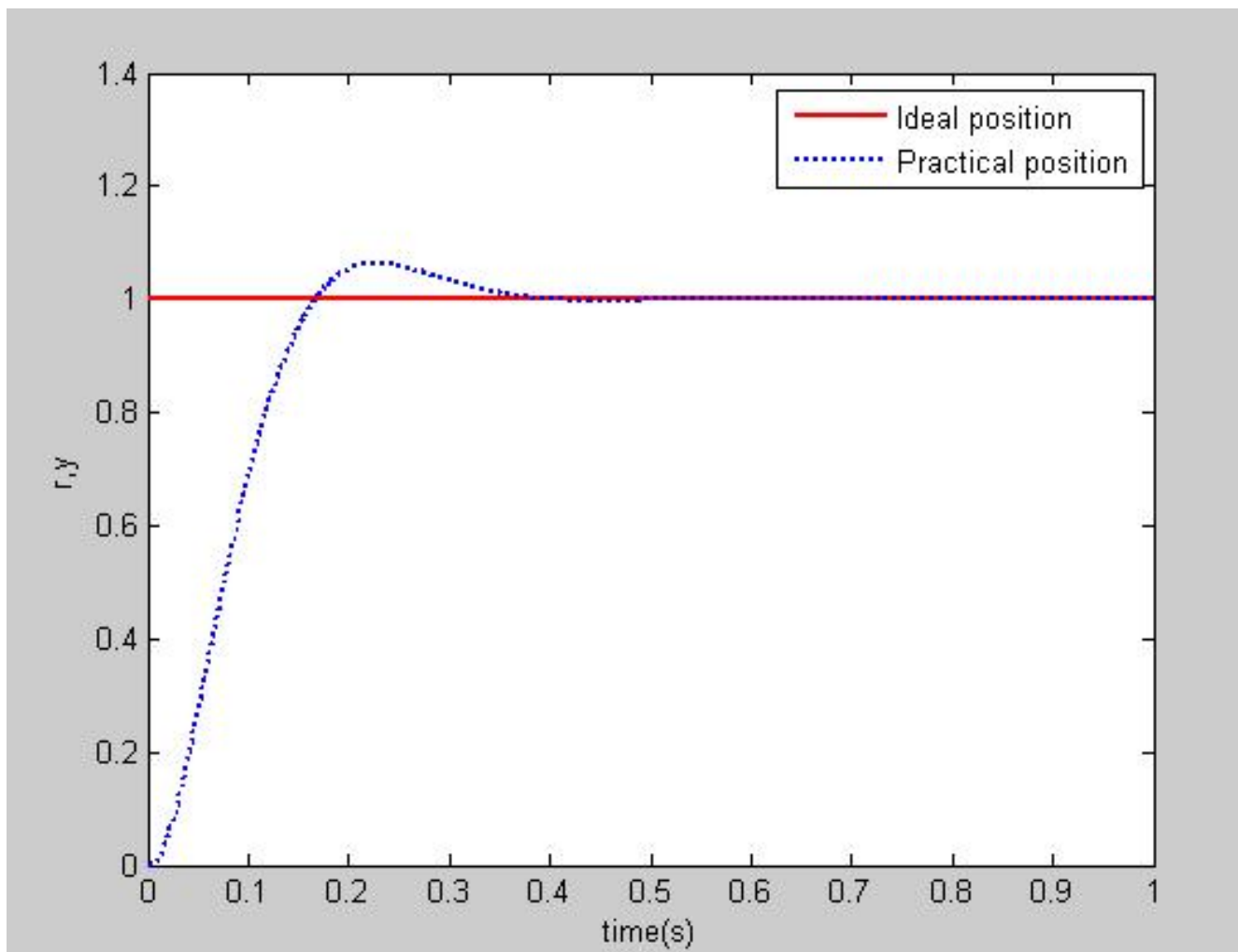


图4-36 模糊PI控制阶跃响应

4.6 模糊自适应整定PID控制

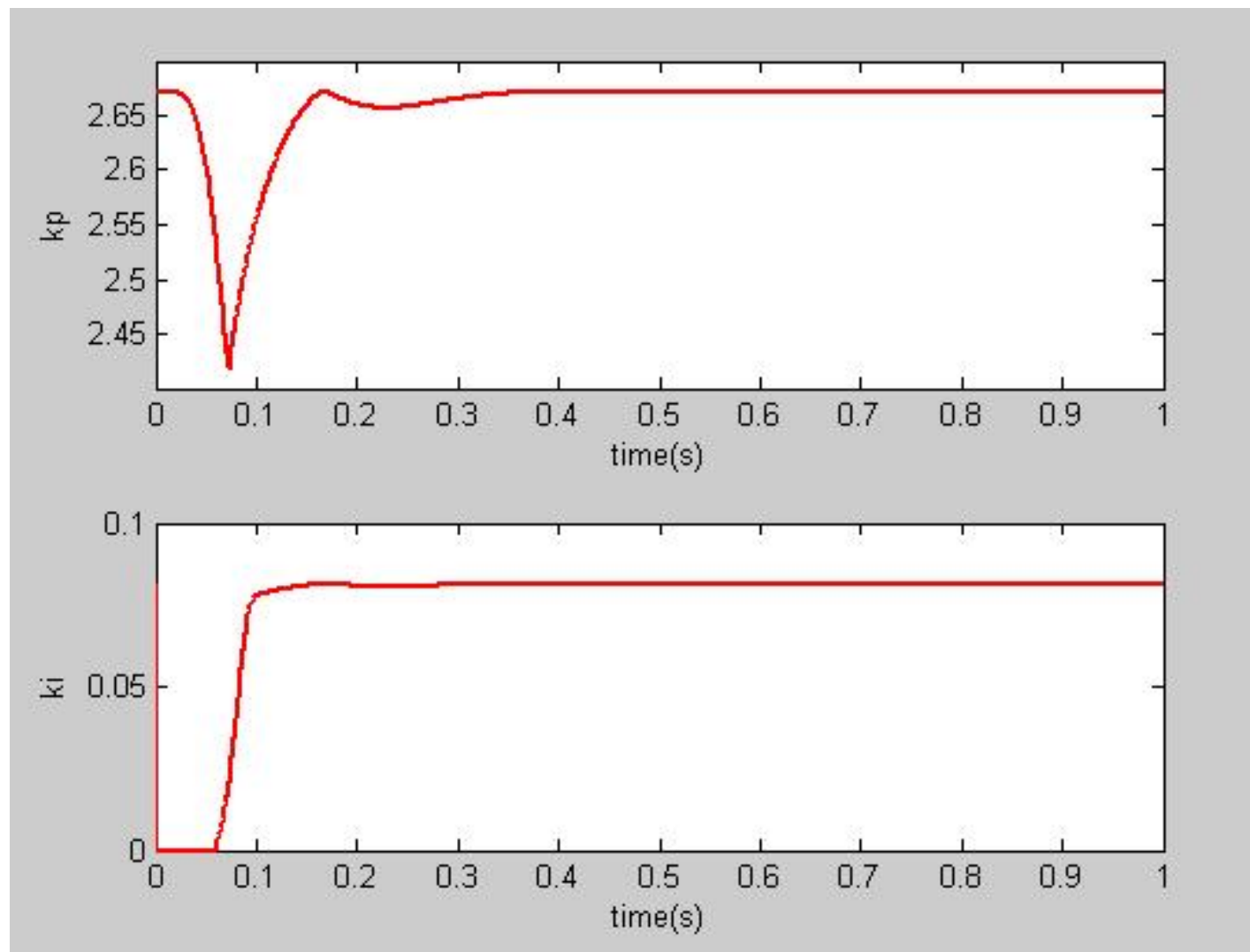


图4-37 k_p 和 k_i 的模糊自适应调整

4.7 T-S(Takagi-Sugeno)模糊模型

4.7.1 T-S模糊模型

传统的模糊系统为Mamdani模糊模型，输出为模糊量。

Mamdani模糊推理的特点：

输出是模糊量→清晰化→清晰量

过程繁琐，并具有随意性，对模糊量进行数学分析不方便。

4.7 Sugeno 模糊模型

Sugeno 模糊模型输出函数为**constant**或**linear**，其函数形式为：

$$y = a$$

$$y = ax + b$$

它与**Mamdani**模型的区别在于：

(1) 输出变量为常量或线性函数；

(2) 输出为精确量。

4.7 Sugeno 模糊模型

Mamdani型模糊推理:

if x_1 is A_1 and x_2 is A_2 , then u is U

若系统局部线性、能够进行分段控制时，可改造为

if x_1 is A_1 and x_2 is A_2 , then $u = f(x_1, x_2)$

当 $f(x_1, x_2)$ 的类型取 x_1 和 x_2 的线性函数时，这种推理就称为**T-S**型模糊推理

4.7 Sugeno 模糊模型

(1) 输出函数 $f(x_1, x_2)$ 的两种形式

- ❖ 0阶T-S型模糊推理: *if x_1 is A_1 and x_2 is A_2 , then $u=k$*
- ❖ 1阶T-S型模糊推理: *if x_1 is A_1 and x_2 is A_2 , then $u=px_1+qx_2+r$*
其中, A_1, A_2 ——模糊集合, k, p, q, r ——常数 (根据系统的大量输入输出数据, 经过辨识确定的)

(2) 计算系统输出 u 的两种方式

用 n 条模糊规则描述系统时, 假设一组具体输入的数据 x_1, x_2 它一般会与多个模糊集合相关, 即

- ❖ 0阶: R^i : *if x_1 is A_1^i and x_2 is A_2^i , then $u^i=k^i$*
- ❖ 1阶: R^i : *if x_1 is A_1^i and x_2 is A_2^i , then $u^i=P^i x_1+q^i x_2+r^i$ ($i=1, 2, 3, \dots, n$)*

4.7 Sugeno模糊模型

4.7.2 仿真实例

设输入 $X \in [0,5]$ 和 $Y \in [0,10]$ ，将它们模糊化为两个模糊量：小，大。输出 Z 为输入 (X, Y) 的线性函数，模糊规则为：

If X 为 small and Y 为 small then $Z = -X + Y - 3$

If X 为 small and Y 为 big then $Z = X + Y + 1$

If X 为 big and Y 为 small then $Z = -2Y + 2$

If X 为 big and Y 为 big then $Z = 2X + Y - 6$

4.7 Sugeno模糊模型

仿真设计：

根据上述规则设计一个二输入、单输出的**T-S**模型，可观察到输入输出隶属函数曲线。

仿真程序：**chap4_8.m**仿真

4.7 Sugeno模糊模型

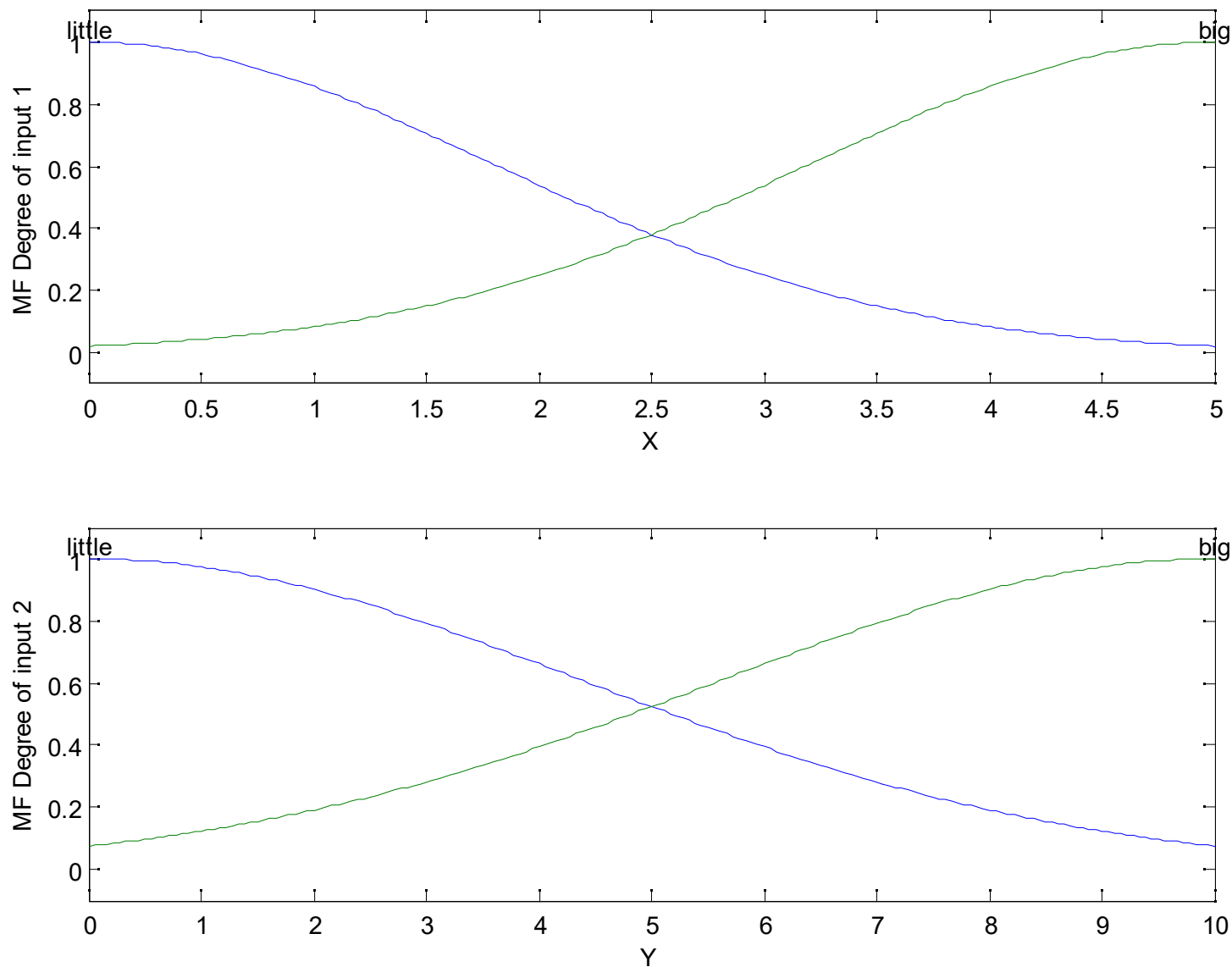


图4-37 Sugeno模糊推理系统的输入隶属函数曲线

4.7 Sugeno模糊模型

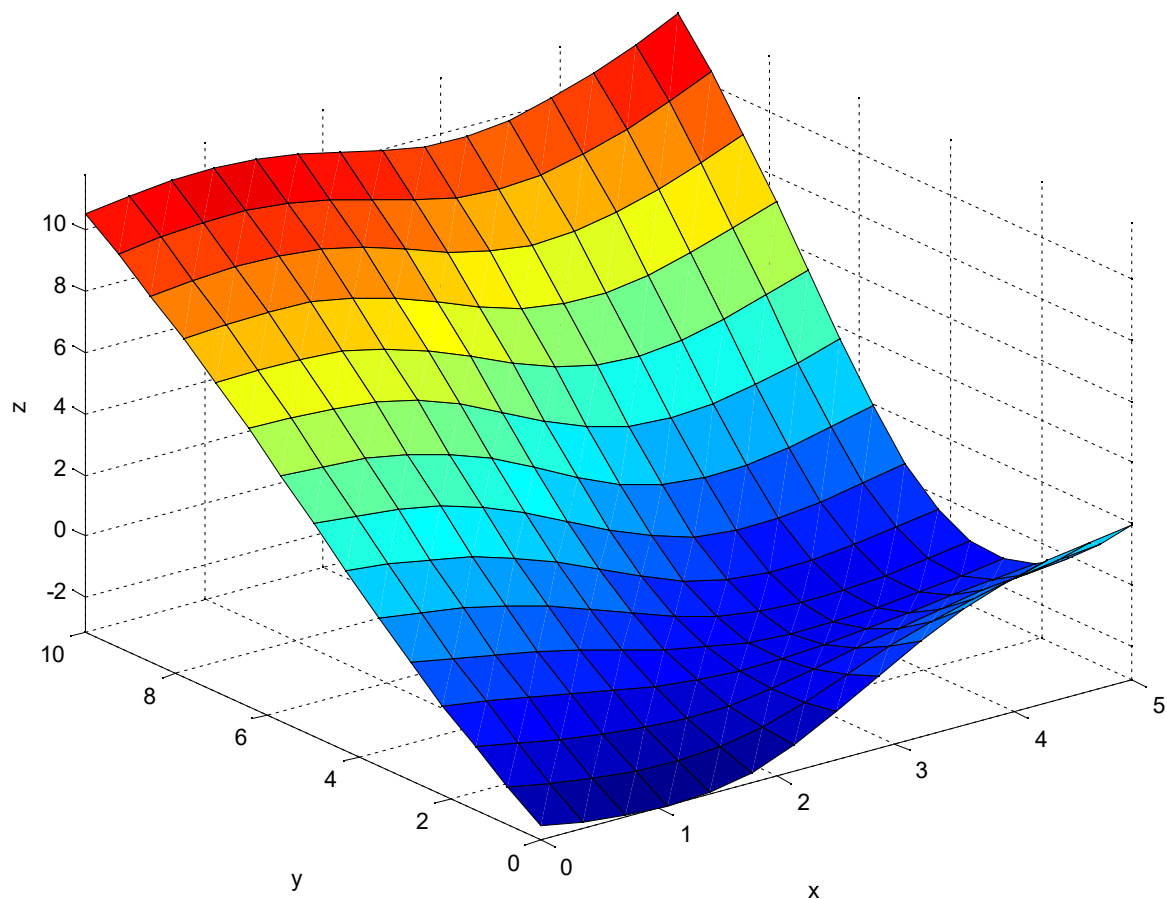


图4-38 Sugeno模糊推理系统的输入/输出曲线

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

4.8.1 T-S模糊系统的设计

针对 n 个状态变量、 m 个控制输入的连续非线性系统，其T-S模糊模型可描述为以下 r 条模糊规则：

Rule i : If $x_1(t) = M_1^i$ and $x_2(t) = M_2^i$ and $\cdots x_n(t) = M_n^i$

Then $\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), i = 1, 2, \cdots r$

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \frac{w_i [A_i x(t) + B_i u(t)]}{\sum_{i=1}^r w_i} \Rightarrow \begin{cases} 0 \leq \frac{w_i}{\sum_{i=1}^r w_i} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^r \frac{w_i}{\sum_{i=1}^r w_i} = 1 \end{cases}$$

$$w_i = \prod_{k=1}^n M_k^i x_k(t)$$

规则 i 的隶属函数

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

PDC (Parallel Distributed Compensation)模糊控制方法针对每条T-S模糊规则，采用状态反馈方法，可设计 r 条模糊控制规则。

Rule i : If $x_1(t) = M_1^i$ and $x_2(t) = M_2^i$ and $\cdots x_n(t) = M_n^i$
Then $u(t) = K_i x(t)$, $i = 1, 2, \cdots r$

PDC模糊控制方法是一种基于模型的模糊控制器设计方法，适用于解决基于T-S模糊建模的非线性系统的控制问题。

$$u(t) = \frac{\sum_{j=1}^r w_j K_j x(t)}{\sum_{j=1}^r w_j}$$

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

基于PDC 状态反馈控制方法，闭环系统为：

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i h_j \left[A_i x(t) + B_i K_j x(t) \right]$$

$$\text{with } h_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^r w_i}$$

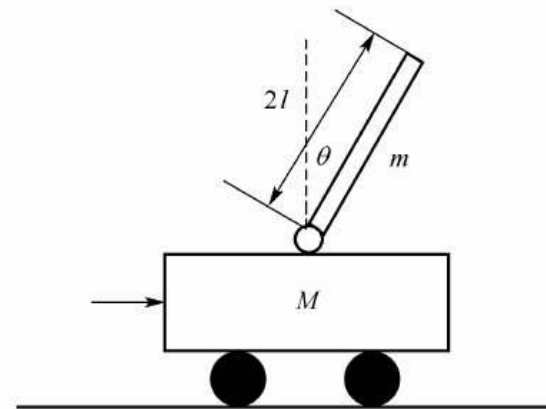
4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

4.8.2 单级倒立摆的T-S模型模糊控制

单级倒立摆模型为：

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{g \sin x_1 - a m l x_2^2 \sin(2x_1)/2 - a u \cos x_1}{4l/3 - a m l \cos^2 x_1}$$



其中 x_1 为摆的角度， x_2 为摆的角速度， $2l$ 为摆长， u 为加在小车上的控制输入， $a = \frac{1}{M+m}$ ， M 和 m 分别为小车和摆的质量。

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

1. 基于两条模糊规则的设计

When $x_1 \rightarrow 0$, $\sin x_1 \rightarrow x_1, \cos x_1 \rightarrow 1$;

When $x_1 \rightarrow \pm \frac{\pi}{2}$, $\sin x_1 \rightarrow \pm 1 \rightarrow \frac{2}{\pi} x_1$.

Rule 1: IF $x_1(t)$ is about 0, THEN $\dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t)$

Rule 2: IF $x_1(t)$ is about $\pm \frac{\pi}{2}$ $\left(|x_1| < \frac{\pi}{2} \right)$, THEN $\dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 u(t)$

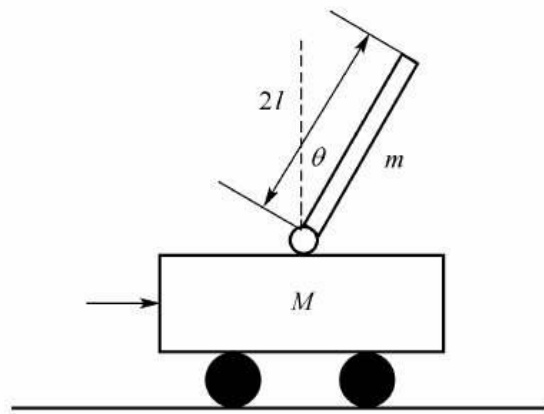
$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{g}{4l/3 - aml} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\alpha}{4l/3 - aml} \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{2g}{\pi(4l/3 - aml\beta^2)} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\alpha\beta}{4l/3 - aml\beta^2} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \cos(88^\circ)$$



4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

针对倒立摆模型，取 $g=9.8\text{m/s}^2$ ，摆的质量 $m=2.0\text{kg}$ ，
小车质量 $M=8.0\text{ kg}$ ， $2l=1.0\text{m}$ 。
根据倒立摆的运动情况，设计2条模糊控制规则：

Rule1: If $x_1(t)$ is about 0 then $u = \mathbf{K}_1 \mathbf{x}(t)$

Rule2: If $x_1(t)$ is about $\pm \frac{\pi}{2}$ $\left(|x_1(t)| < \frac{\pi}{2} \right)$ then $u = \mathbf{K}_2 \mathbf{x}(t)$

采用PDC方法，设计基于T-S型的模糊控制器为：

$$u = w_1(x_1) \mathbf{K}_1 \mathbf{x}(t) + w_2(x_1) \mathbf{K}_2 \mathbf{x}(t)$$

其中 $w_1 + w_2 = 1$ 。

$$u(t) = \frac{\sum_{j=1}^r w_j K_j x(t)}{\sum_{j=1}^r w_j}$$

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

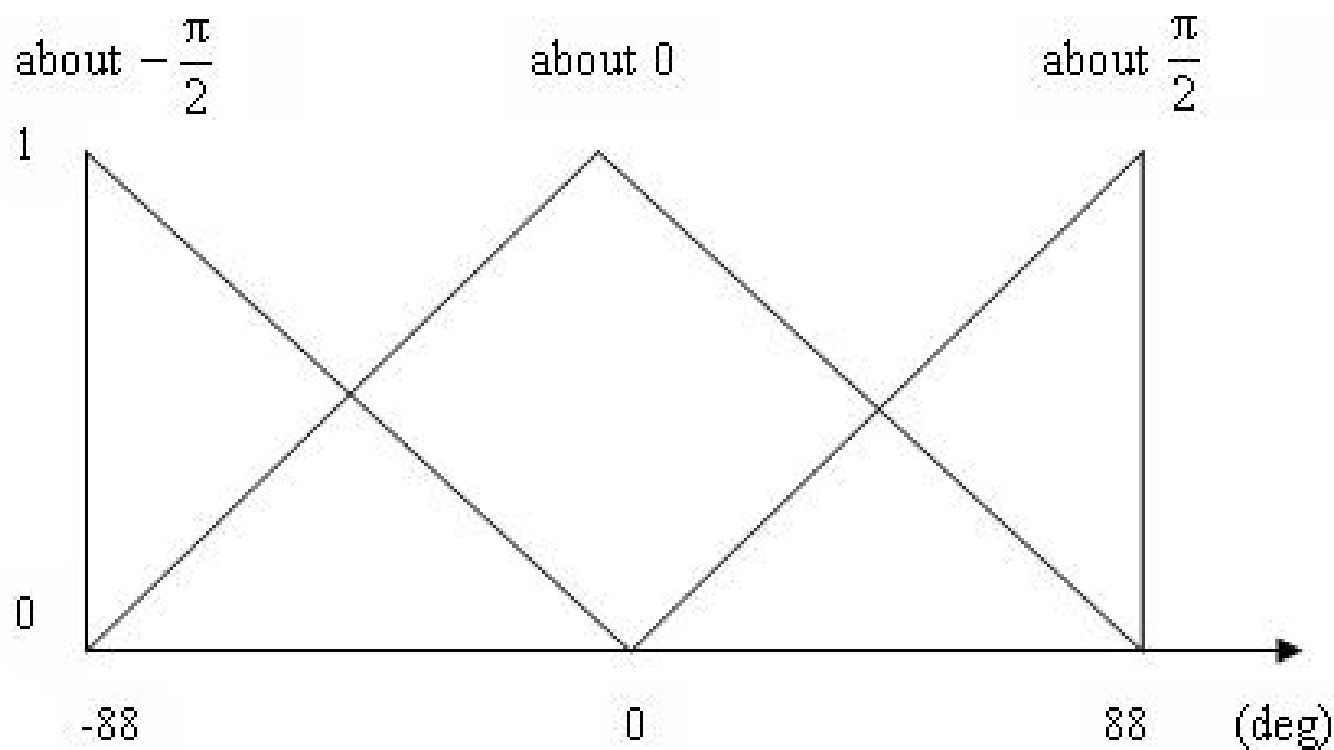


图4-39 模糊隶属度函数示意图(两条模糊规则)

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

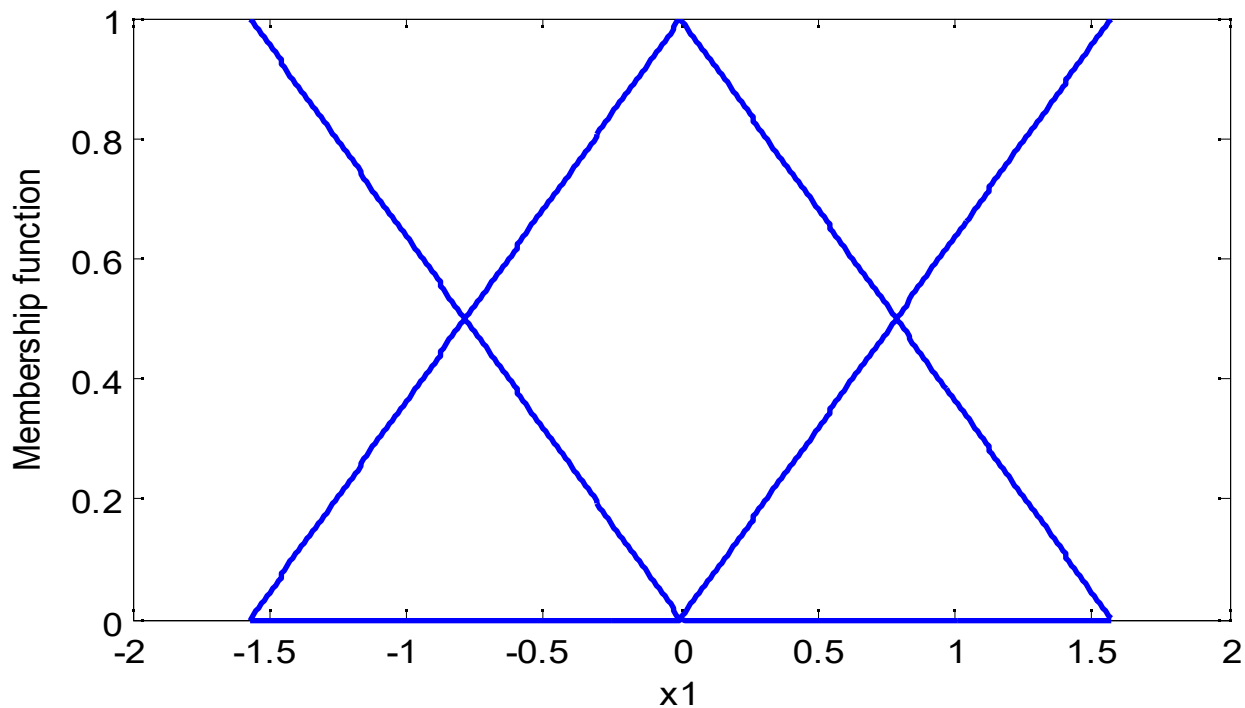


图4-40 仿真中的模糊隶属度函数（ chap4_9mf.m ）

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

选择期望的闭环极点(-3-3i,-3+3i)，利用极点配置函数 `place(A, B, P)`，可以得到系统的反馈增益矩阵：

$$K_1 = [-418 \quad -74] ,$$

$$K_2 = [-10452 \quad -2292] 。$$

采用 $u_i = -\mathbf{K}_i \mathbf{x}$ 的反馈控制，按下式设计控制器，运行 Simulink 主程序 `chap4_9sim.mdl`，仿真结果如图4-41至图4-42所示。

$$u = w_1(x_1) \mathbf{K}_1 \mathbf{x}(t) + w_2(x_1) \mathbf{K}_2 \mathbf{x}(t)$$

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

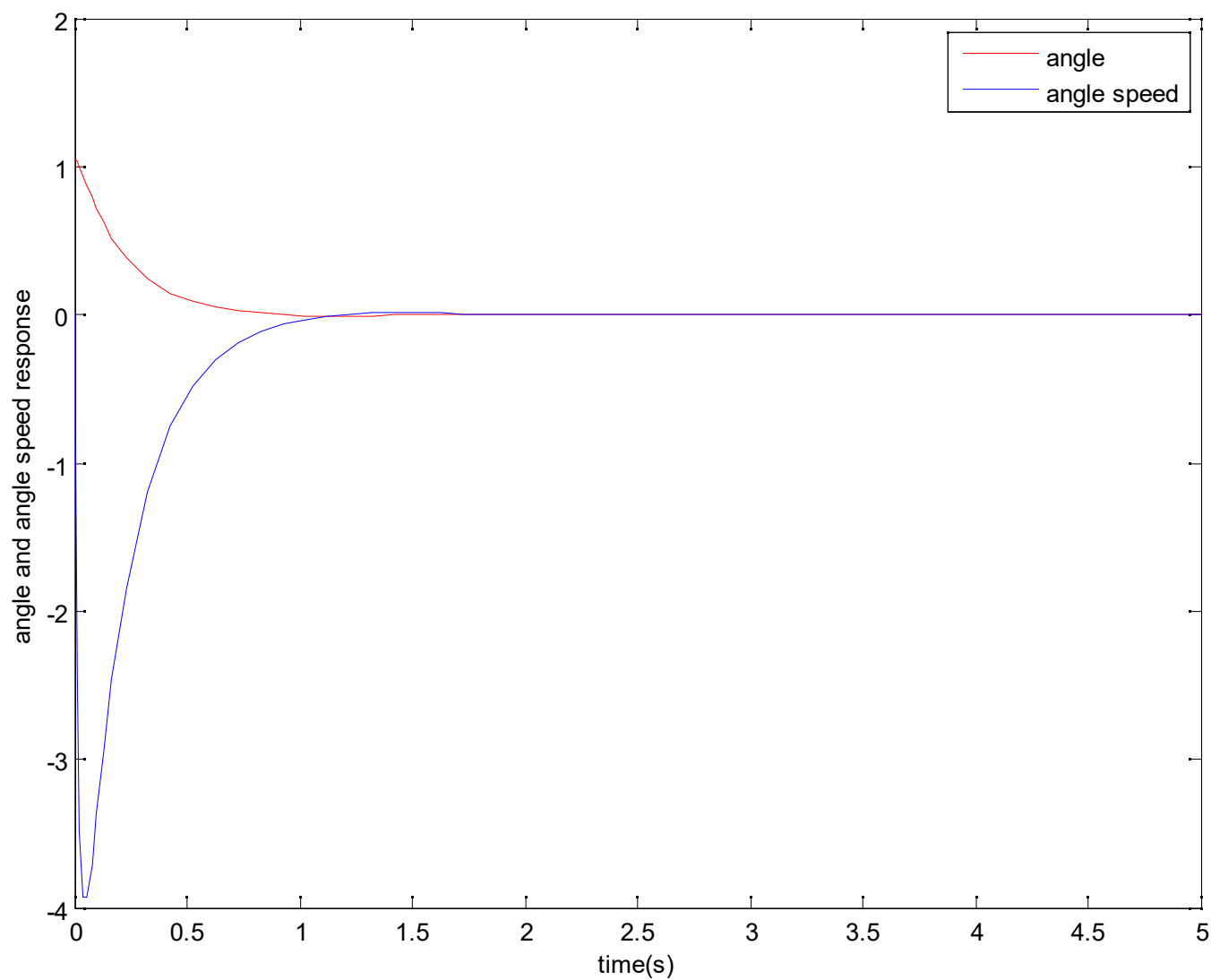


图4-41 角度和速度响应

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

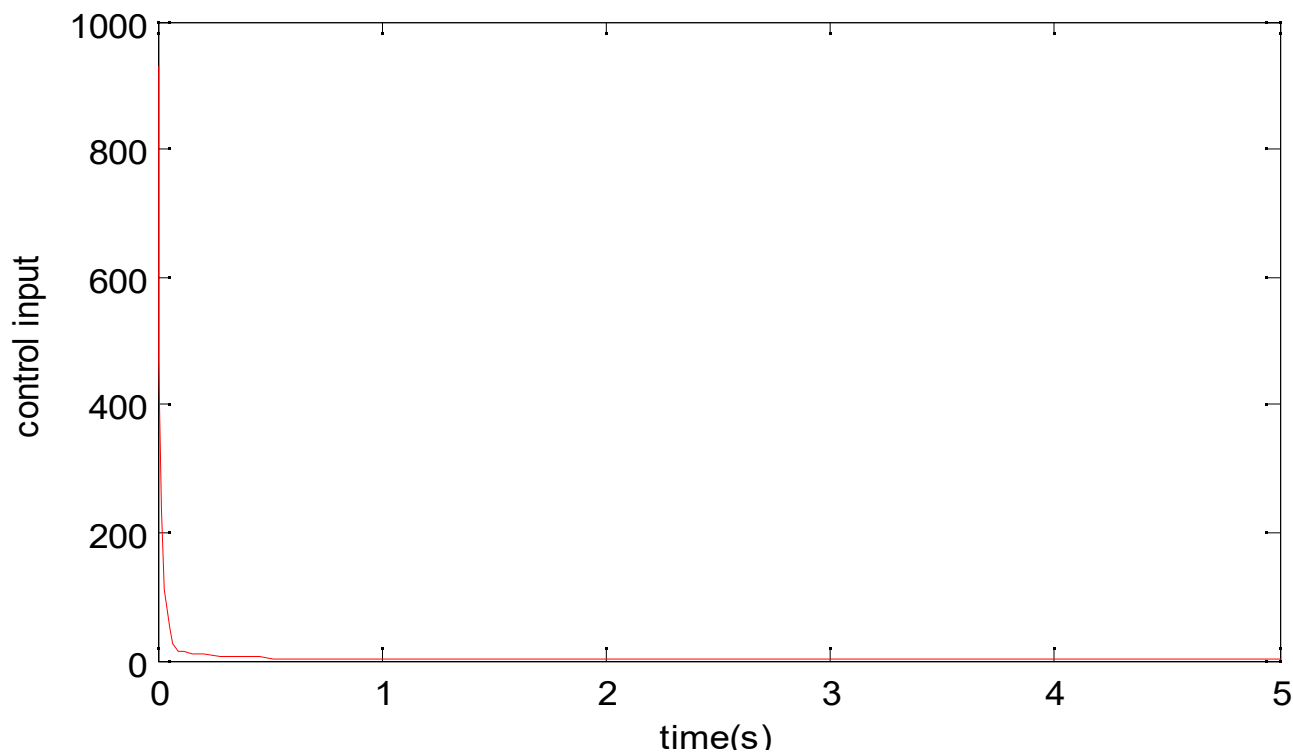
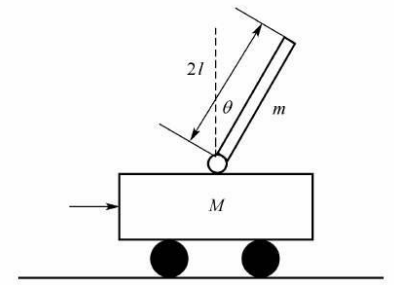


图4-42 控制输入

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制



2. 基于4条模糊规则的设计

为了能在大范围的初始角度下进行控制，在上述2条规则的基础上，需要增加模糊规则数量。

根据倒立摆模型可知， $x_1 \rightarrow \pm \frac{\pi}{2} \left(|x_1| > \frac{\pi}{2} \right)$ 时， $\sin x_1 \rightarrow \pm 1 \rightarrow \frac{2}{\pi} x_1$ ，由于

$\beta = \cos(88^\circ)$ ，则 $\cos(x_1) = \cos(180^\circ - 88^\circ) = -\cos(88^\circ) = -\beta$ ，当 $x_1 \rightarrow \pi$ 时，

$\sin x_1 \rightarrow 0$ $\cos x_1 \rightarrow -1$ ，则近似有 $\dot{x}_2 = \frac{au}{4l/3 - aml}$ ，由此可得以下

另外两条T-S型模糊规则：

规则3: IF $x_1(t)$ is about $\pm \frac{\pi}{2} \left(|x_1| > \frac{\pi}{2} \right)$, THEN $\dot{x}(t) = A_3 x(t) + B_3 u(t)$

规则4: IF $x_1(t)$ is about $\pm \pi$, THEN $\dot{x}(t) = A_4 x(t) + B_4 u(t)$

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

其中

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{2g}{\pi(4l/3 - aml\beta^2)} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\alpha\beta}{4l/3 - aml\beta^2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\alpha}{4l/3 - aml} \end{bmatrix}$$

根据倒立摆的运动情况，设计2条模糊控制规则：

Rule3: If $x_1(t)$ is about $\pm \frac{\pi}{2}$ $\left(|x_1| > \frac{\pi}{2} \right)$ then $u = \mathbf{K}_3 \mathbf{x}(t)$

Rule4: If $x_1(t)$ is about $\pm \pi$ then $u = \mathbf{K}_4 \mathbf{x}(t)$

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

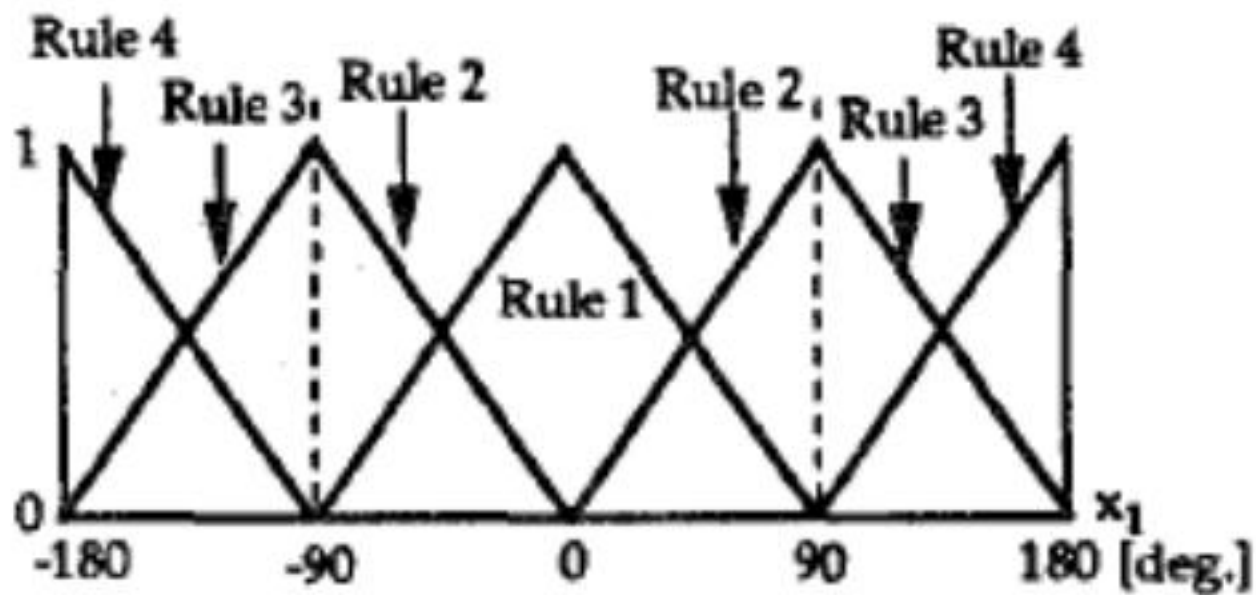


图4-43 模糊隶属度函数示意图

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

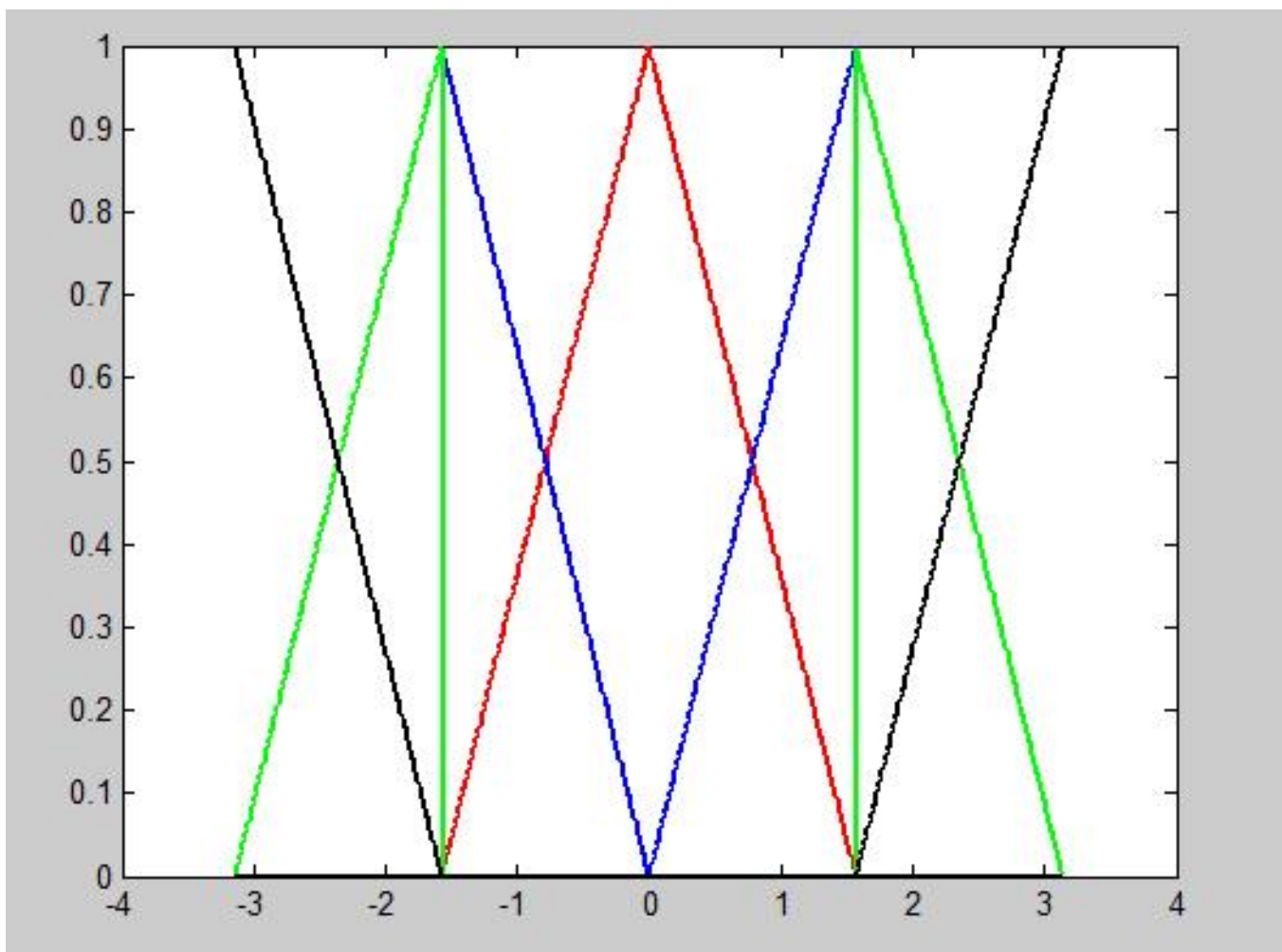


图4-44 仿真中的模糊隶属度函数 (chap4_10mf.m)

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

采用PDC方法，设计基于T-S型的模糊控制器为：

$$\begin{aligned} u = & w_1(x_1)K_1\mathbf{x}(t) + w_2(x_1)K_2\mathbf{x}(t) \\ & + w_3(x_1)K_3\mathbf{x}(t) + w_4(x_1)K_4\mathbf{x}(t) \end{aligned}$$

选择期望的闭环极点(-3-3i,-3+3i)，利用极点配置函数 `place(A, B, P)`，可以得到系统的反馈增益矩阵：

$$K_1 = [-418 \quad -74] ,$$

$$K_2 = [-10452 \quad -2292] ,$$

$$K_3 = [10452 \quad 2292] ,$$

$$K_4 = [222 \quad 74]$$

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

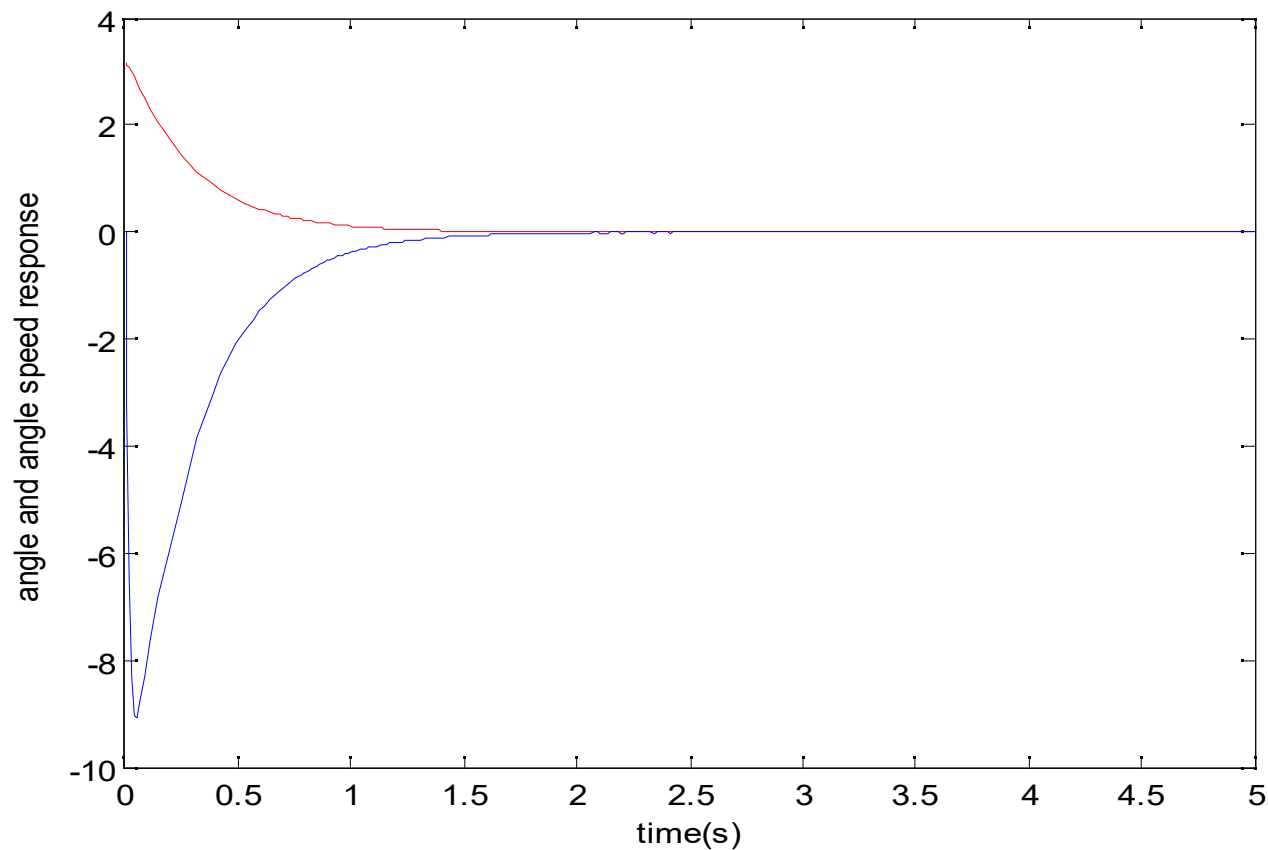


图4-45 角度和速度响应
(chap4_10sim.mdl)

4.8 T-S(Takagi-Sugeno)模糊控制

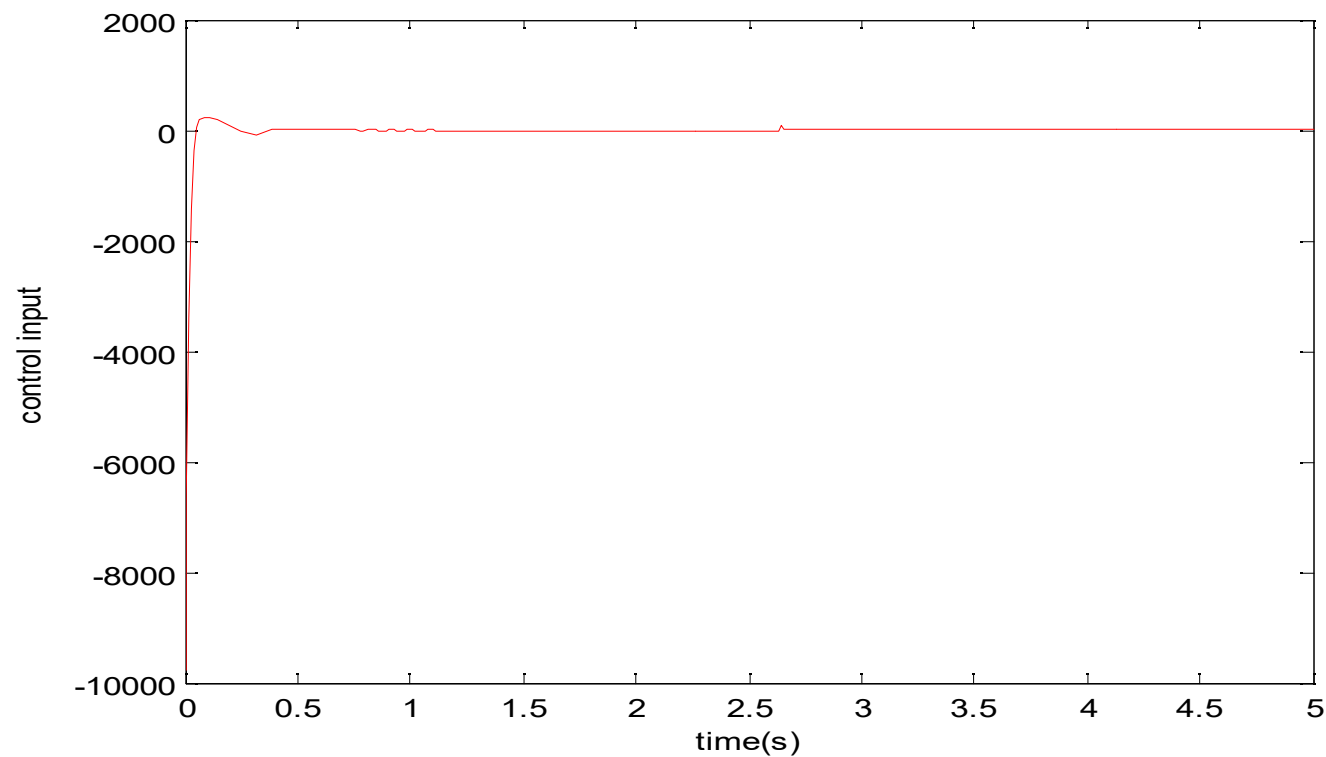


图4-46 控制输入

4.9 模糊控制的应用与发展

4.9.1 模糊控制的应用

1 模糊控制在家电中的应用

模糊电子技术是**21**世纪的核心技术，模糊家电是模糊电子技术的最重要应用领域。所谓模糊家电，就是根据人的经验，在电脑或芯片的控制下实现可模仿人的思维进行操作的家用电器。

几种典型的模糊家电产品如下：

（1）模糊电视机

根据室内光线的强弱自动调整电视机的亮度，根据人与电视机的距离自动调整音量，同时能够自动调节电视机的色度、清晰度和对比度。

1990年3月，日本的三洋公司研制并推出了一种采用模糊技术的彩色电视机，该电视机能够根据室内的亮度和观看距离，对电视机的对比度进行自动调节，保证在各种条件下都能获得最佳的收看效果。

（2）模糊空调

模糊空调可灵敏地控制室内的温度。日本研制了一种模糊空调器，利用红外线传感器识别房间信息（人数、温度、大小、门开关等）快速调整室内温度，提高了舒适感。

（3）模糊微波炉

日本夏普公司生产的**RE-SEI**型微波炉，内部装有**12**个传感器，这些传感器能对食品的重量、高度、形状和温度等进行测量，并利用这些信息自动选择化霜、再热、烧烤和对流四种工作方式，并自动决定烹制时间。

(4) 模糊洗衣机

以我国生产的小天鹅模糊控制全自动洗衣机为例，它能够自动识别洗衣物的重量、质地、污脏性质和程度，采用模糊控制技术来选择合理的水位、洗涤时间、水流程程序等，其性能已达到国外同类产品的水平。

(5) 模糊电动剃刀

日本三洋、松下公司推出了模糊控制电动剃刀，通过利用传感器分析胡须的生长情况和面部轮廓，自动调整刀片，并选择最佳的剃削速度。

4.9 模糊控制的应用与发展

2 模糊控制在过程控制中的应用

(1) 工业炉方面：如退火炉、电弧炉、水泥窑、热风炉、煤粉炉的模糊控制。

(2) 石化方面：如蒸馏塔的模糊控制、废水**pH**值计算机模糊控制系统、污水处理系统的模糊控制等。

(3) 煤矿行业：如选矿破碎过程的模糊控制、煤矿供水的模糊控制等。

(4) 食品加工行业：如甜菜生产过程的模糊控制、酒精发酵温度的模糊控制等。

4.9 模糊控制的应用与发展

3 模糊控制在机电行业中的应用

如集装箱吊车的模糊控制、空间机器人柔性臂动力学的模糊控制、单片机温度模糊控制、交流随动系统的模糊控制、快速伺服系统定位的模糊控制、电梯群控系统多目标模糊控制、直流无刷电机调速的模糊控制等。

4.9 模糊控制的应用与发展

4.9.2 模糊控制的发展

模糊控制主要有以下几个发展方向：

(1) **Fuzzy-PID**复合控制

Fuzzy-PID复合控制是将模糊控制与常规**PID**控制算法相结合的控制方法，以此达到较高的控制精度。它比单用模糊控制和单用**PID**控制均具有更好的控制性能。

(2) 自适应模糊控制

自适应模糊控制能自动地对模糊控制规则进行修改和完善，以提高控制系统的性能。它具有自适应、自学习的能力，对于那些具有非线性、大时滞、高阶次的复杂系统有着更好的控制效果。

(3) 专家模糊控制

专家模糊控制是将专家系统技术与模糊控制相结合的产物。引入专家系统可进一步提高模糊控制的智能水平。专家模糊控制保持了基于规则的方法和模糊集处理带来的灵活性，同时又把专家系统技术的知识表达方法结合进来，能处理更广泛的控制问题。

(4) 神经模糊控制

模糊控制规则和隶属函数的获取与确定是模糊控制中的“瓶颈”问题。神经模糊控制是基于神经网络的模糊控制方法。该方法利用神经网络的学习能力，来获取并修正模糊控制规则和隶属函数。

(5) 多变量模糊控制

多变量模糊控制有多个输入变量和输出变量，它适用于多变量控制系统。多变量耦合和“维数灾”问题是多变量模糊控制需要解决的关键问题。

3 模糊控制面临的主要任务

- (1) 模糊控制的机理及稳定性分析，新型自适应模糊控制系统、专家模糊控制系统、神经网络模糊控制系统和多变量模糊控制系统的分析与设计；
- (2) 模糊集成控制系统的设计方法研究。现代控制理论、神经网络与模糊控制的相互结合及相互渗透，可构成模糊集成控制系统；
- (3) 模糊控制在非线性系统应用中的模糊建模、模糊规则的建立和推理算法的深入研究；
- (4) 自学习模糊控制策略的研究；
- (5) 常规模糊控制系统稳定性的改善；
- (6) 模糊控制芯片、模糊控制装置及通用模糊控制系统的开发及工程应用。

作业 4

1. 简述模糊控制器设计的步骤。
2. 假设一单输入单输出系统，输入为表征饭店服务员服务好坏的值（**1~10**），输出为客人给的小费（**0~30**）。其中规则有如下三条：

IF 服务 差 THEN 小费 低

IF 服务 一般 THEN 小费 中等

IF 服务 好 THEN 小费 高

适当选择服务和小费的隶属函数后，设计一基于**Mamdani**模型的模糊推理系统，并绘制输入输出曲线。