

第四章 模糊控制系统

(Fuzzy Logic Control)

主要内容

4.1 概述

4.2 模糊集合与模糊推理

4.3 模糊控制

4.3 模糊控制

一、模糊控制系统原理

二、模糊控制器设计

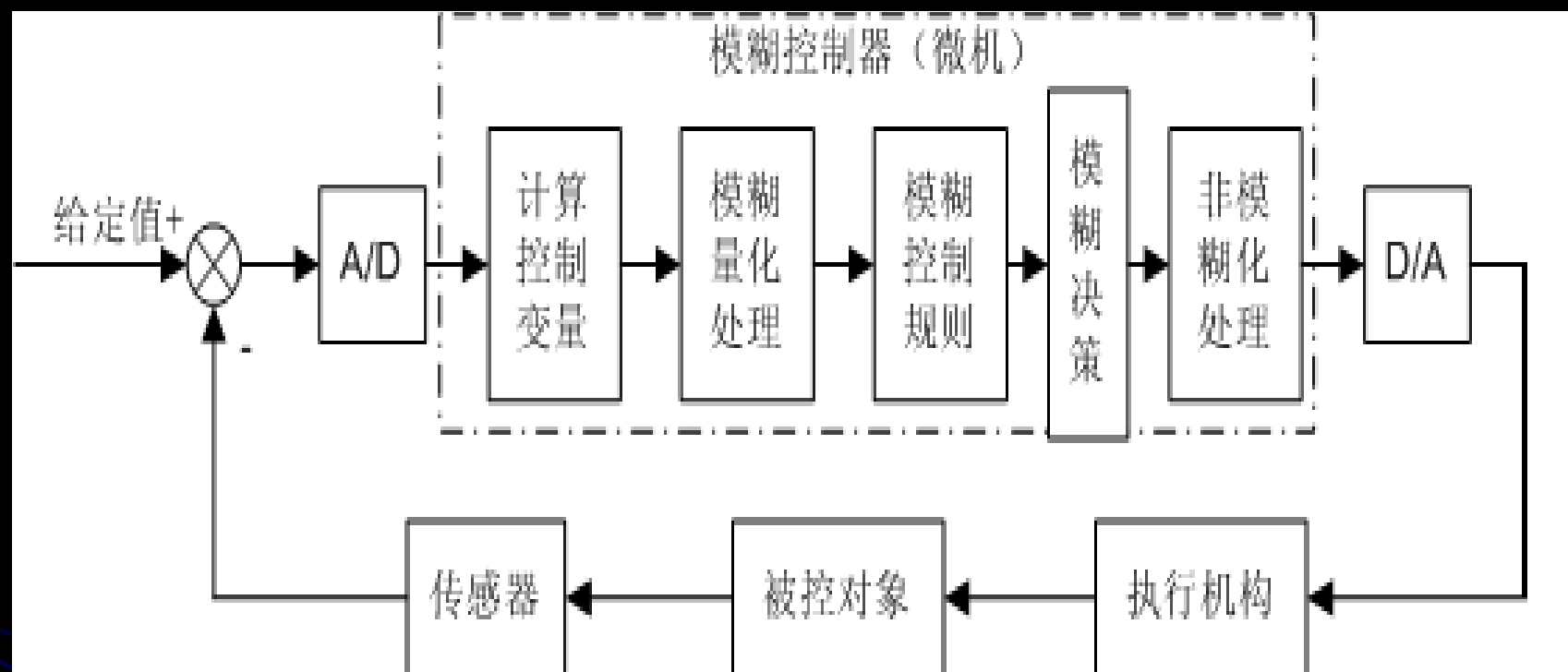
三、模糊控制的发展

一、模糊控制系统原理

1. 模糊控制原理

模糊控制是以模糊集理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的一种智能控制方法，它是从行为上模仿人的模糊推理和决策过程的一种智能控制方法。

该方法首先将操作人员或专家经验编成模糊规则，然后将来自传感器的实时信号模糊化，将模糊化后的信号作为模糊规则的输入，完成模糊推理，将推理后得到的输出量加到执行器上。

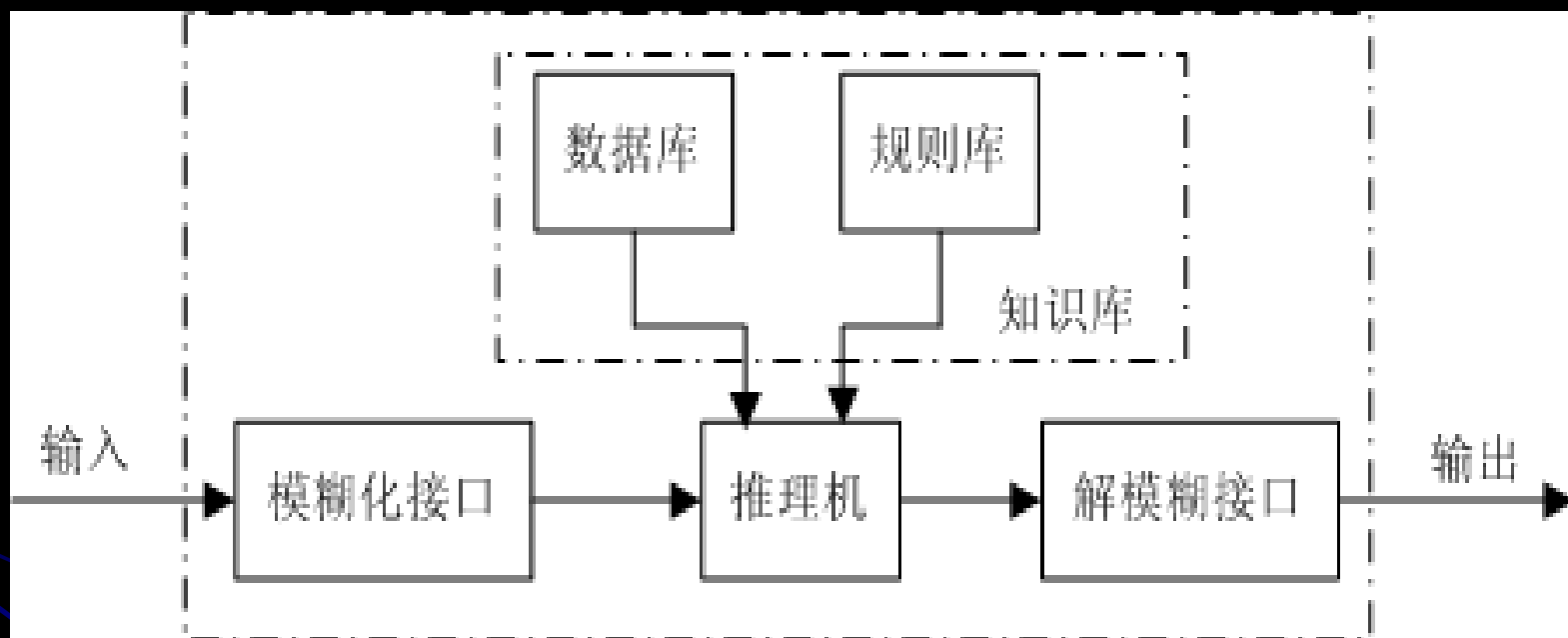


模糊控制原理框图

模糊控制器（Fuzzy Controller—FC）
也称为**模糊逻辑控制器（Fuzzy Logic Controller—FLC）**，由于所采用的模糊控制规则是由模糊理论中模糊条件语句来描述的，因此模糊控制器是一种语言型控制器，故也称为**模糊语言控制器（Fuzzy Language Controller—FLC）**。

2 模糊控制器的组成

模糊控制器的组成框图如图所示。



模糊控制器的组成框图

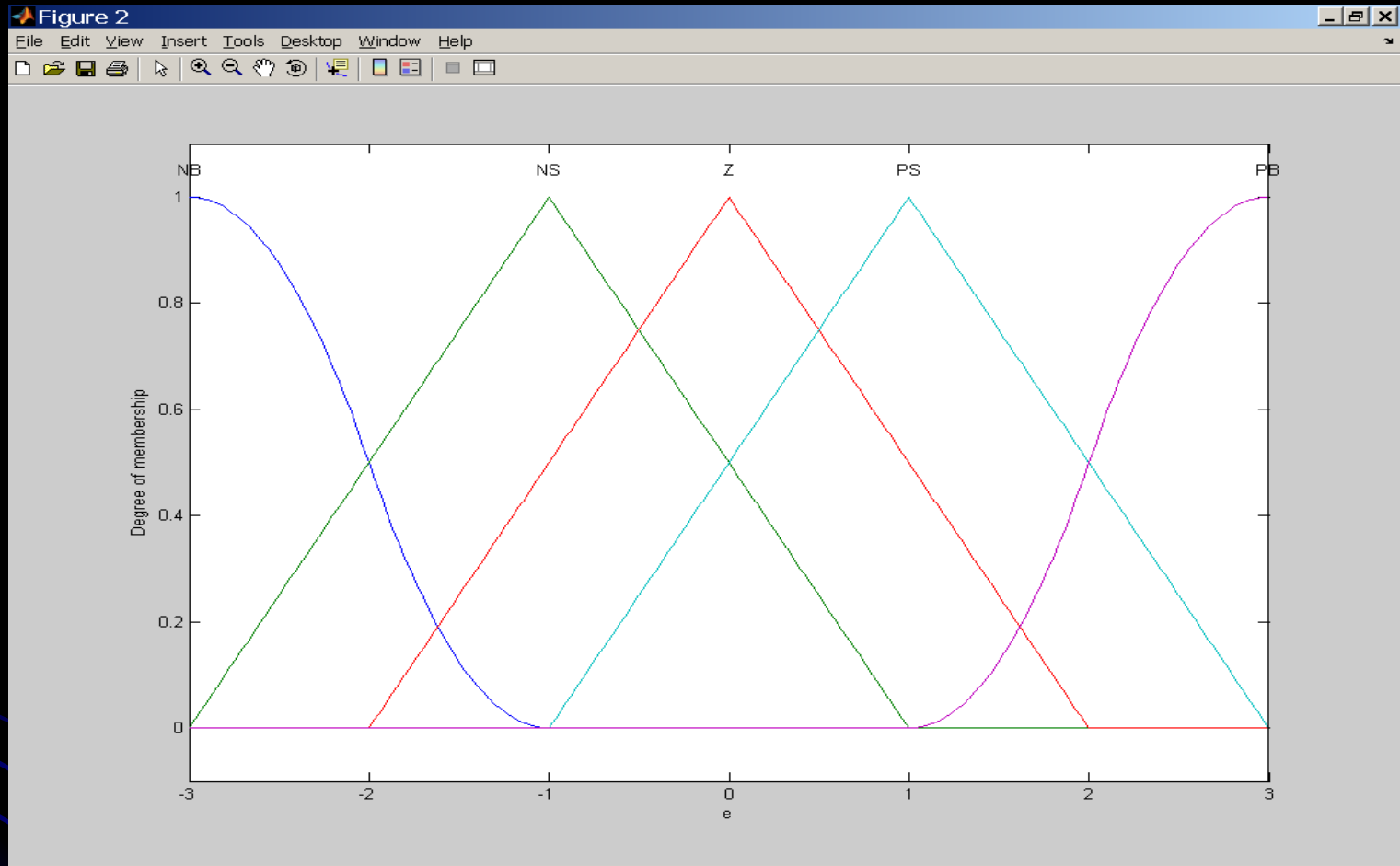
(a) 模糊化接口 (Fuzzy interface)

模糊控制器的输入必须通过模糊化才能用于控制输出的求解，因此它实际上是模糊控制器的输入接口。它的主要作用是将真实的确定量输入转换为一个模糊矢量。

对于一个模糊输入变量 e ，其模糊子集通常可以作如下方式划分：

① $e = \{\text{负大, 负小, 零, 正小, 正大}\} = \{\mathbf{NB, NS, ZO, PS, PB}\}$

② $e = \{\text{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}\} = \{\mathbf{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}\}$



模糊子集和模糊化等级

(b) 知识库 (Knowledge Base—KB)

知识库由**数据库**和**规则库**两部分构成。

数据库 (Data Base—DB) 数据库所存放的是所有输入、输出变量的全部模糊子集的隶属度矢量值 (即经过论域等级离散化以后对应值的集合), 若论域为连续域则为隶属度函数。在规则推理的模糊关系方程求解过程中, 向推理机提供数据。

规则库（Rule Base—RB） 模糊控制器的规则基于专家知识或手动操作人员长期积累的经验，它是按人的直觉推理的一种语言表示形式。

模糊规则通常有一系列的关系词连接而成，如if-then、else、also、end、or等，关系词必须经过“翻译”才能将模糊规则数值化。最常用的关系词为if-then、also，对于多变量模糊控制系统，还有and等。

例如，某模糊控制系统输入变量为（误差）和（误差变化），它们对应的语言变量为E和EC，可给出一组模糊规则：

R1: IF E is NB and EC is NB then U is PB

R2: IF E is NB and EC is NS then U is PM

通常把if...部分称为“前提部”，而then...部分称为“结论部”，其基本结构可归纳为If A and B then C,其中A为论域U上的一个模糊子集，B是论域V上的一个模糊子集。

根据人工控制经验，可离线组织其控制决策表R, R是笛卡儿乘积集上的一个模糊子集，则某一时刻其控制量由下式给出：

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

式中

- × 模糊交集（直积）运算；
- 模糊合成运算。

规则库是用来存放全部模糊控制规则的，在推理时为“推理机”提供控制规则。

规则条数和模糊变量的模糊子集划分有关，划分越细，规则条数越多，但并不代表规则库的准确度越高，规则库的“准确性”还与专家知识的准确度有关。

(c) 推理与解模糊接口 (Inference and Defuzzy-interface)

推理是模糊控制器中，根据输入模糊量，由模糊控制规则完成模糊推理来求解模糊关系方程，并获得模糊控制量的功能部分。

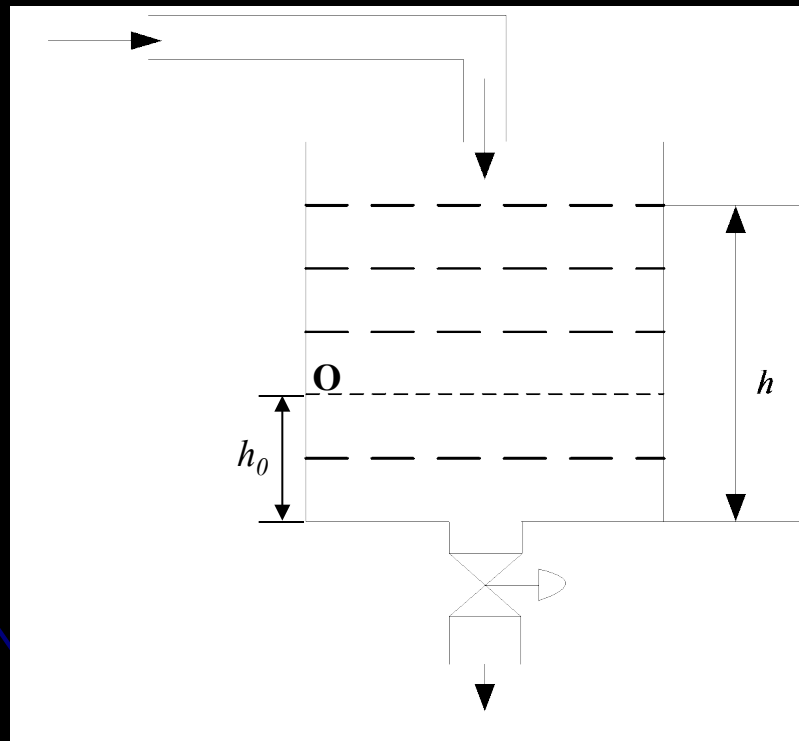
在模糊控制中，考虑到推理时间，通常采用运算较简单的推理方法。

推理结果的获得，表示模糊控制的规则推理功能已经完成。但是，至此所获得的结果仍是一个模糊矢量，不能直接用来作为控制量，还必须作一次转换，求得清晰的控制量输出，即为解模糊。通常把输出端具有转换功能作用的部分称为解模糊接口。

综上所述，模糊控制器实际上就是依靠微机（或单片机）来构成的。它的绝大部分功能都是由计算机程序来完成的。随着专用模糊芯片的研究和开发，也可以由硬件逐步取代各组成单元的软件功能。

4 模糊控制系统的工作原理

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点附近。如图所示。



水箱液位控制

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○点，则向外排水，差值越大，排水越快”；

“若水位低于○点，则向内注水，差值越大，注水越快”。

根据上述经验，按下列步骤设计模糊控制器：

(1) 确定观测量和控制量

定义理想液位O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O点的偏差 e 作为观测量，

(2) 输入量和输出量的模糊化

将偏差 e 分为五级：

负大 (NB)，负小 (NS)，零 (O)，
正小 (PS)，正大 (PB)。

根据偏差 e 的变化范围分为七个等级：-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3。得到水位变化模糊表。

水位变化 e 划分表

| 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 |

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

控制量 u 变化划分表

| 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 |

(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，则 u 负大”
- ② “若 e 负小，则 u 负小”
- ③ “若 e 为0，则 u 为0”
- ④ “若 e 正小，则 u 正小”
- ⑤ “若 e 正大，则 u 正大”

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 $e=0$ then $u=0$

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：

模糊控制规则表

| | | | | | |
|----------|-----|-----|----|-----|-----|
| 若 (IF) | NBe | NSe | Oe | PSe | PBe |
| 则 (THEN) | NBu | Nsu | Ou | PSu | PBu |

(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:

$$R = (NBe \times NBu) \cup (NSe \times NSu) \cup (Oe \times Ou) \cup (PSe \times PSu) \cup (PBe \times PBu)$$

其中规则内的模糊集运算为交集，规则间的模糊集运算取并集。

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

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

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

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

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

由以上五个模糊矩阵求并集（即隶属函数最大值），得：

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

(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, $e = [1.0 \ 0.5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$
控制器输出为

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

(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 $u = -4$ ，即阀门的开度应关大一些，减少进水量。

3 模糊控制系统分类

- 按信号的时变特性分类

- ① 恒值模糊控制系统

是指若系统给定值不变，要求其被控输出量保持恒定，而影响被控量变化的只是进入系统的外界扰动作用，控制的目的是要求系统自动克服这些扰动。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

系统的给定值是时间函数，要求其被控量按一定精度要求，快速地跟踪给定值函数。尽管系统也存在外界扰动，但其对系统的影响不是控制的主要目的。也称为“模糊控制跟踪系统”或“模糊控制伺服系统”，如机器人关节的模糊控制位置随动系统。

- 按系统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。

① 单变量模糊控制器

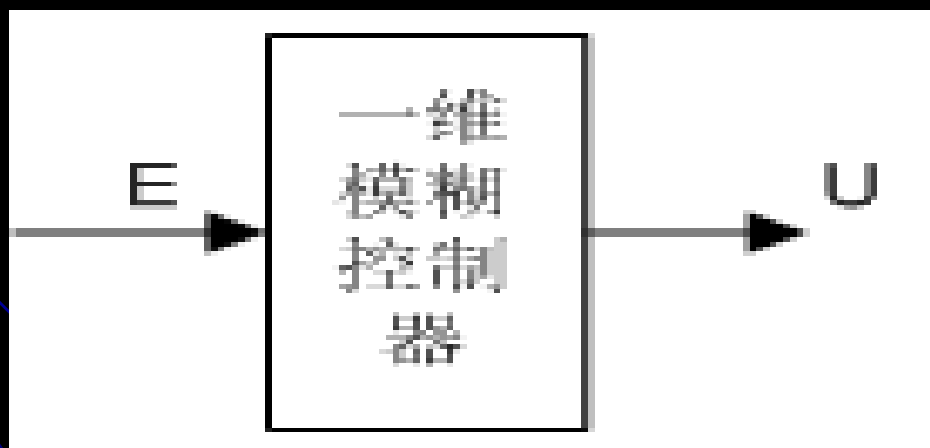
在单变量模糊控制器（Single Variable Fuzzy Controller—SVFC）中，将其输入变量的个数定义为模糊控制的维数。

一维模糊控制器

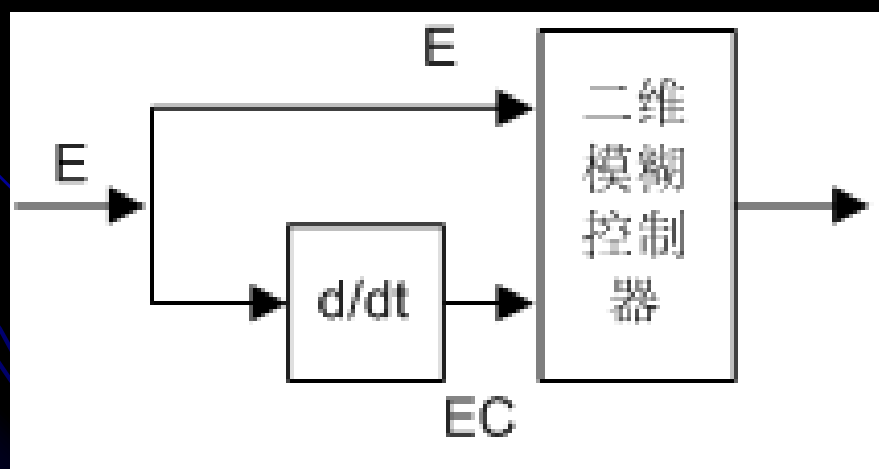
一维模糊控制器的

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。



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。



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/48716502200006114>