

通用的模糊逻辑控制算法及其应用¹⁾

程 一 庄 诚 安燮南

(中国科学院自动化研究所, 北京 100080)

摘 要

本文提出了一种新的输入变量和输出变量模糊子集的定义方法, 利用 Zadeh 的 max-min 推理合成算法得到了一种通用的模糊逻辑控制算法. 应用该模糊逻辑控制算法在兰化公司化肥厂对尿素合成塔的氨、碳比进行了控制, 其控制效果好于人工控制.

关键词: 模糊逻辑, 规则, 模糊控制.

一、引 言

自从 Mamdani 首次将模糊逻辑应用于自动控制以来, 模糊逻辑控制的研究和应用取得了许多成就. 但目前模糊逻辑控制还没有得到广泛的应用, 其原因主要是因为实用的用于指导模糊控制系统设计的原则很少. 由于对模糊控制器的理论研究还不充分, 因而在设计时对诸如为每个变量选多少模糊子集, 每个模糊子集的隶属函数具有什么形状比较好等问题的回答还没有理论上的依据, 这样就要求模糊控制系统本身的调试整定很方便, 在具体应用过程中通过在线调试, 使系统性能达到要求.

现有的模糊逻辑控制算法大多是不便于调整的, 如现在应用较多的离散式的查表算法调整起来就比较困难, 比例因子的调整是按比例地调整控制量的大小, 这是一种线性调整, 但这种线性调整往往是不够的.

在进行尿素合成塔的模糊控制应用研究时, 作者提出了一种新的模糊子集的定义方法, 利用 Zadeh 的 max-min 推理合成算法得到了一种通用的模糊控制算法. 这种算法的调试整定非常方便, 算法输入输出关系的仿真研究和实际应用都表明了所提算法的合理性.

二、模糊控制算法

1. 算法概述

本文用 x 表示测量值, 用 y 表示模糊控制器的输出值. 首先对每个测量值和输出值定义一个所考虑的范围, 如对测量值 x_1 有所考虑的范围 $[a_1, b_1]$, 该范围内的所有 x_1

本文于 1991 年 3 月 22 日收到.

1) 本文曾在自动化学会第三届学术会议上宣读.

构成了一个论域 X_1 , 同样对输出值有论域 Y_1 等。在每个论域上可定义一些模糊子集, 如对检测变量温度, 可定义太高、稍高、合适、稍低、太低这样几个模糊子集。

模糊逻辑控制的核心是控制规则。规则的形式为“IF-THEN”型, 如: “IF 尿素合成塔底部温度稍高且顶部温度稍高 THEN 稍降低入塔氨量”。所有这样的控制规则组成了控制规则集。对于单输出情形, 任何形式的规则均可组织成如下的形式, 设总共有 k 个检测变量和 n 条规则, 则有

$$R_j \text{ IF } x_1 \in A_{1j} \text{ and } \dots, \text{ and } x_k \in A_{kj} \text{ THEN } y \in B_j, (j = 1, \dots, n)$$

其中 A_{ij} 是论域 X_i 上的模糊子集, B_j 是论域 Y 上的模糊子集。每一条规则的形式均为 IF condition THEN action。这里, condition 是关于被控过程状态的模糊命题, action 是关于当前状态下应采取的控制量的模糊命题, 每一条这样的规则规定了一个模糊关系, 即

$$R_j = A_j \cap B_j, \quad (1)$$

其中 $A_j = A_{1j} \cap \dots \cap A_{kj}$ 。这里将采用 MAX-MIN 推理合成算法(当然也可以采用其它形式的算法, 但研究说明这是一种较好的算法^[4]), 因而关系 R_j 的隶属度函数为

$$\mu_{R_j}(x, y) = \min(\beta_j, \mu_{B_j}(y)), \quad (2)$$

式中 $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$, $\beta_j = \min\{\mu_{A_{1j}}(x_1), \mu_{A_{2j}}(x_2), \dots, \mu_{A_{kj}}(x_k)\}$, $\mu_{A_{ij}}(x_i)$ 为 x_i 属于模糊子集 A_{ij} 的隶属函数, $\mu_{B_j}(y)$ 为 y 属于 B_j 的隶属函数。如果为论域 X_i 定义了 $m(i)$ 个模糊子集, 设用 $I_{i1}, \dots, I_{im}(i)$ 表示, 则 $A_{ij} \in \{I_{i1}, \dots, I_{im}(i)\}$ 。同理, 设为 Y 定义了 s 个模糊子集, 分别用 O_1, \dots, O_s 表示, 则 $B_j \in \{O_1, \dots, O_s\}$ 。规则集中所有不同的规则所规定的不同的关系之间是一种或的关系, 因而总的模糊控制关系为

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_n, \quad (3)$$

而该关系的隶属度函数为

$$\mu_R(x, y) = \max[\mu_{R_1}(x, y), \dots, \mu_{R_n}(x, y)]. \quad (4)$$

有了这样的关系, 则对任意一确定的非模糊化的当前测量值 x_0 , 满足该关系的所有 y 所组成的模糊集 B' 应具有隶属函数

$$\mu_{B'}(y) = \mu_R(x_0, y). \quad (5)$$

即给定一测量值, 由关系 R 所规定的应采取的控制量所组成的模糊集的隶属函数为式(5)。此后一般有两种方法从此模糊集推导出—非模糊的精确控制量。

1) 最大隶属度法, 即取 y' 使该隶属函数达最大值。采用这种方法时, 某一状态下的控制量只依赖于某一条控制规则。这时的控制算法基本上相当于普通的逻辑控制^[1];

2) 重心法^[2], 取 y' 使

$$y' = \frac{\int \mu_{B'}(y)y dy}{\int \mu_{B'}(y) dy} = \frac{\int \max[\min(\beta_1, \mu_{B_1}(y)), \dots, \min(\beta_n, \mu_{B_n}(y))]y dy}{\int \max[\min(\beta_1, \mu_{B_1}(y)), \dots, \min(\beta_n, \mu_{B_n}(y))] dy}, \quad (6)$$

其中分子分母的积分范围为整个 Y 论域。这实际上是一种加权平均方法，即以输出论域 Y 中的每个元素对于最终模糊集的隶属度式(5)为权系数求加权平均。这种方法能充分利用最终模糊集所包含的信息，由于它所具有的优点，本文选用重心法作为决策方法。

2. 各模糊子集隶属度函数的定义

输入变量模糊子集的定义方法：对某个论域，根据经验将该论域分为 n 个区间，每个区间相应于一个模糊子集，这样便有 n 个模糊子集，同某一区间相对应的模糊子集的隶属度函数在该区间上的值为 1。而它在相邻区间上是一条在该区间同相邻区间的分界处的值为 1，在相邻区间中点的值为 0 的直线。五个模糊子集的定义方法如图 1 所示(虚线和实线分别对应于不同的模糊子集的隶属度函数)。

显然，这样定义模糊子集时，某一区间的中点属于同该区间相对应的模糊子集的隶属度为 1，属于该论域上任何其它的模糊子集的隶属度为 0，这样的点被称之为该输入变量的特征点(有 n 个特征点)。

这样定义的模糊子集有如下的优点：

1) 调整较简单， n 个模糊子集用 $n + 1$ 个参数即可确定；

2) 结合人工经验时比较方便，具体应用人员不用关心模糊子集是如何定义的，只需根据操作经验将每个测量值论域分成若干挡即可，每一挡就相应于一个模糊子集；

3) 工业过程中的很多操作规则都具有单调性，即某一检测变量离设定值越远，所采取的控制量应越大。如“尿素合成塔底部温度越低且顶部温度低则减氨越多”。若 x_1 表示合成塔底部温度且被分为 7 个模糊子集：太高、中高、稍高、合适、稍低、中低、太低。 x_2 表示合成塔顶部温度且被分为 5 个模糊子集：太高、稍高、合适、稍低、太低。这样系统共有 35 个模糊状态，若只为输出变量定义了 7 个模糊子集，大正、中正、小正、零、小负、中负、大负，则因输出模糊子集数远远小于系统的模糊状态数，规则集中有可能出现这样的规则

的规则

if $x_1 = (\text{太低 or 中低})$ and $x_2 = \text{太低}$ then $y = \text{大负}$ 。

若定义如图 2 所示的模糊子集(现在有很多文献中都采取这种定义方法)且假设 x_2 为“太低”的满足程度为 1(即 x_2 属于“太低”的隶属度为 1)，则有 $x = a$ 时， $y = \text{“大负”}$ 完全得到满足。 $x = b$ 时， $y = \text{“大负”}$ 本来更应该得到满足，但

这时 $y = \text{“大负”}$ 得到满足的程度却小于 1(为 0.5, 如图 2 所示)。采用本文提出的输入变量模糊子集的定义方法就不会出现这种矛盾。

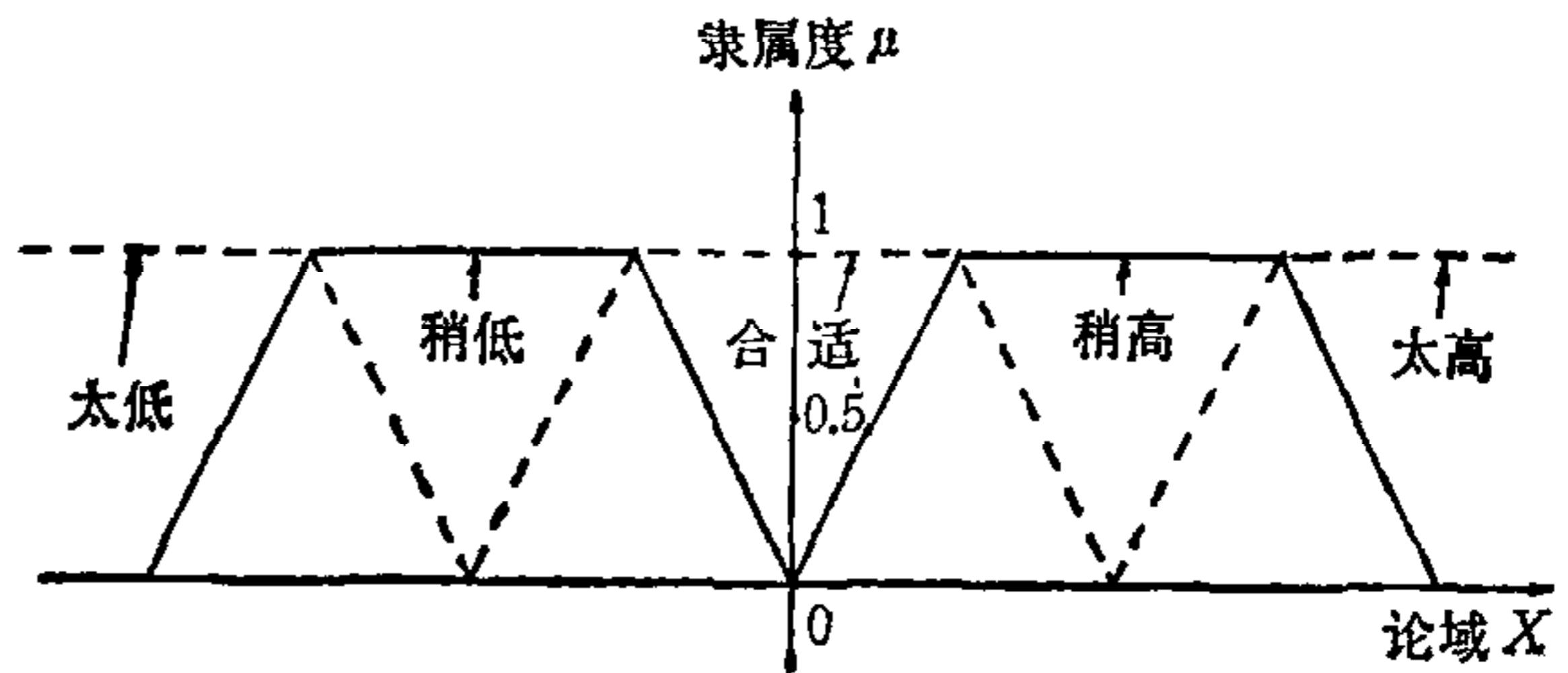


图 1

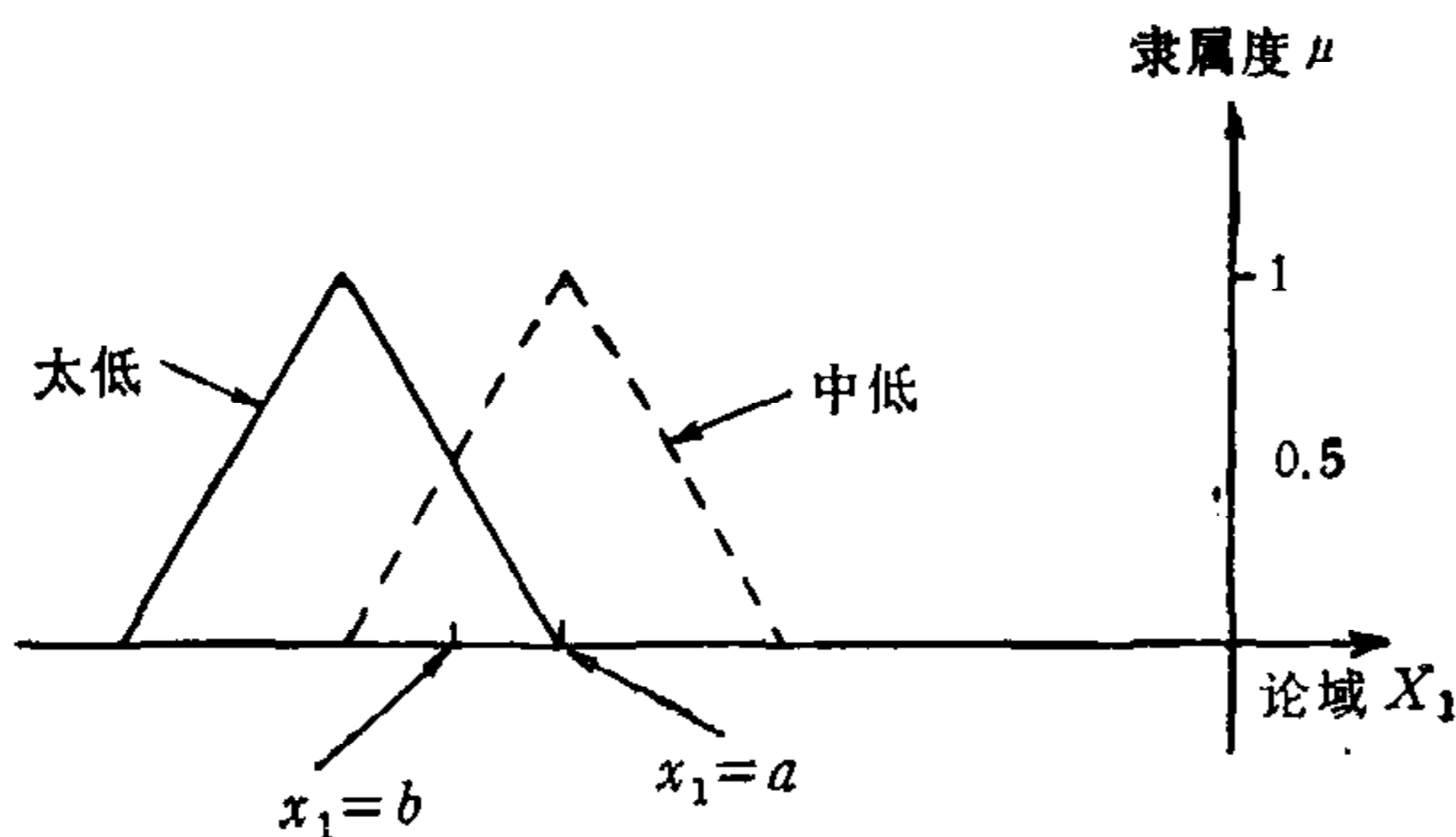


图 2

输出变量模糊子集的定义方法: 本文定义输出论域 Y 的各模糊子集为独点集, 假设共定义 s 个模糊子集, 则在输出论域上根据操作经验选择 s 个点 $\{c_1, \dots, c_s, c_i \in Y\}$, 相对应的模糊子集用 $\{C_1, \dots, C_s\}$ 表示, 且定义相应的输出论域的模糊子集 $\{C_1, \dots, C_s\}$ 如下:

$$\mu_{c_i}(y) = \begin{cases} 1, & y = c_i \\ 0, & y = \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

根据(7)式定义了输出模糊子集之后, 由(6)式得模糊控制算法的输出控制量为

$$y' = \frac{\sum_{i=1}^s [\max\{\beta_1 \mu_{B_1}(c_i), \dots, \beta_n \mu_{B_n}(c_i)\} c_i]}{\sum_{j=1}^s \max\{\beta_1 \mu_{B_1}(c_j), \dots, \beta_n \mu_{B_n}(c_j)\}} \quad (8)$$

现有文献中大多都是采取为输出值论域上的每个模糊子集定义一个非独点隶属函数的方法, 这时的控制量取决于输出量每个模糊子集的隶属函数形状, 而这些形状的选取并无一定的原则, 主观性很大, 而且各形状和最终控制量之间的关系因此而变得很复杂, 不利于算法输入输出关系的调整。而本文的方法有如下几个优点:

1) 简化了计算, 将(6)式的积分转化为(8)式的求和, 这大大减小了计算量, 同时也保留了重心法的优点;

2) 有利于模糊系统的辨识, 可使输出量模糊子集的辨识问题转化为多元线性回归问题, 这样的辨识问题能用线性最小二乘方法来解决;

3) c_i 可根据操作人员的经验来确定, 只要给出同输入特征点相对应的控制量即可。 c_i 可称之为输出特征点, 所以输出模糊子集由输出特征点完全刻划。输入特征点和输出特征点对就构成了输入输出空间中的特征点。若有 m 个输入变量, k 个输出变量, 则每个特征点是 $m \times k$ 维实数空间中的一个点。所有特征点就构成了操作员所希望的控制器的输入输出关系的近似;

4) 可以定义较多的输出模糊子集, 并为每个模糊状态定义一个相应的输出模糊子集, 增加算法的灵活性。

三、单输入单输出情形下的输入输出关系

从上面的定义及分析过程可以看出, 本文所提出的模糊逻辑控制算法同样适用于多输出情形。

为了考察本文所提出的输入输出模糊子集隶属度函数定义的合理性, 必须研究该算法的输入输出关系。这里只考虑单输入单输出系统, 将本文提出的算法编制成计算机程序后, 利用计算机可以很方便地作出系统的输入输出关系曲线。如图 3 所示一个非常简单的模糊系统的输入输出关系曲线, 输入量 x 有五个模糊子集, 分别定义为太低 = $[-7, -3]$, 稍低 = $[-3, -1]$, 合适 = $[-1, 1]$, 稍高 = $[1, 3]$, 太高 = $[3, 7]$ 。输出量也有五个模糊子集, 分别定义为: 大正 = 3, 小正 = 1.5, 零 = 0, 小负 = -1.5, 大负 = -3。控制规则为: if $x =$ 太低 then $y =$ 大正; if $x =$ 稍低 then $y =$ 小正; if $x =$ 合适 then $y =$ 零;

if $x =$ 稍高 then. $y =$ 小负; if $x =$ 太高 then $y =$ 大负. 可见, 输入输出关系曲线是一条光滑的非线性曲线, 因而本文所提算法的要点就在于用单调连续的非线性曲线(或曲面)来连接由经验给出的特征点. 其特点是

1) 输入特征点上的控制量为相应规则所规定的输出模糊子集所确定的量;

2) 输入特征点之间的控制量由输入特征点上的控制量之间的单调连续的非线性曲线(多输入情形下为非线性曲面)拟合;

3) 定义模糊子集的区间交界处的控制量为两区间中点上的控制量的平均.

若对控制器输入输出关系越肯定, 就可以定义越多的特征点, 这样的关系曲线也就越符合人们所希望的关系曲线(或曲面)(即所希望的控制器输入输出关系). 当然这时必须定义越多的输入输出模糊子集. 由于用规则控制本身就是在无对象精确特性模型的情况下的不得已措施, 因而无法对特性曲线作精确定义, 所以用这样的单调连续变化的非线性曲线来拟合特征点之间的特征曲线是可以的, 只要特征点选得合适, 拟合的特性曲线一定同希望的特性曲线不会相差很大. 同时可以看出, 该算法的调试整定非常方便, 具体应用人员可以通过改变各区间的定义或 ci 的定义而改变特性曲线的形状, 特性曲线的形状同输入和输出各模糊子集的定义之间的关系较为简单和直接.

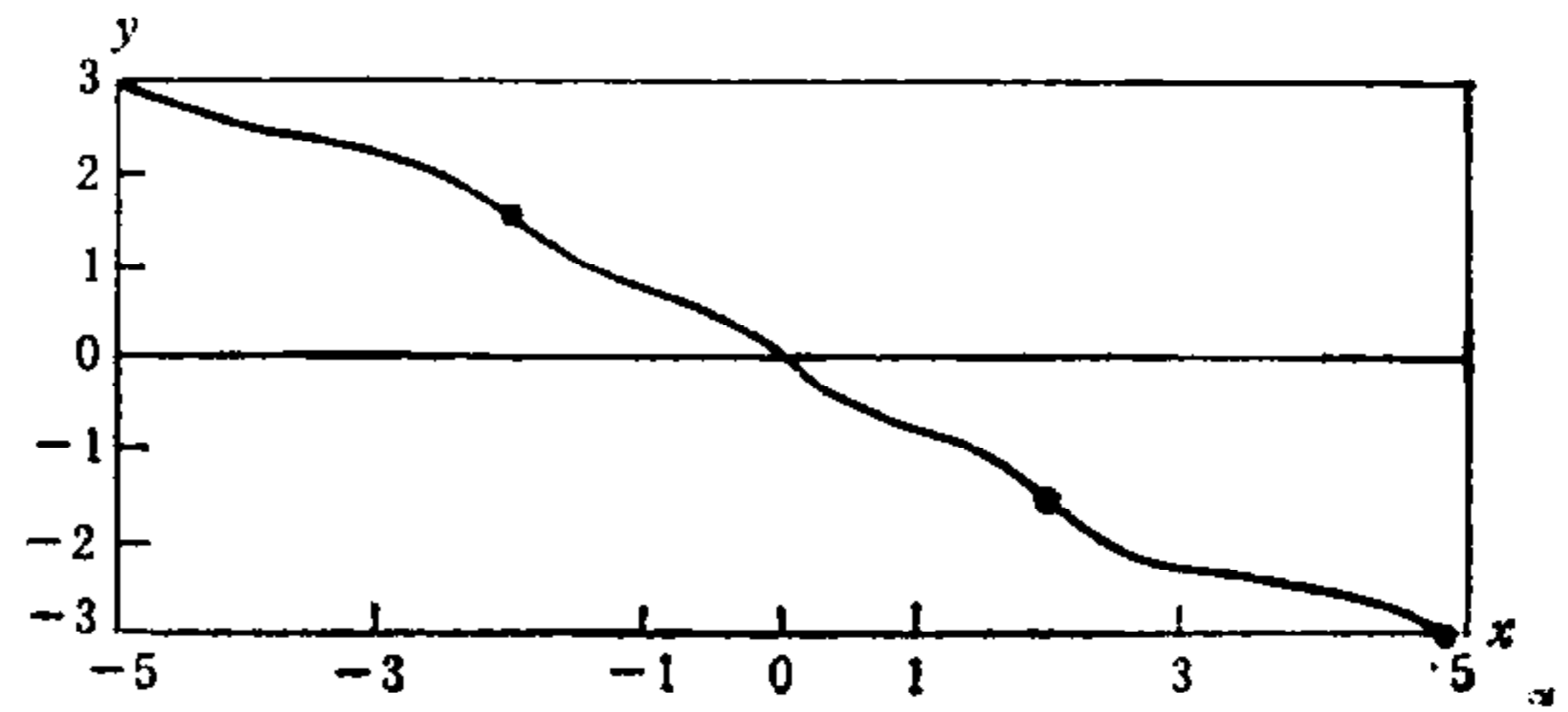


图 3

四、应用效果

1. 算法实现

上面所提出的通用模糊控制算法已用 BAS-IC 语言实现, 选用 BASIC 语言是因为现在很多集散系统的上位机、可编程控制器的智能模块(如 TI 系列的可编程控制器可配 BASIC 模块)上均可运行用 BASIC 语言编制的程序. 变量的定义及规则集的组织是由分别建立名为 variable 和 rule 的两个文件来完成的. 应用这个模糊控制算法时, 用户所做的工作只是建立这两个文件(相应于组态过程). 因而从表面上看, 这个算法同普通的逻辑控制没有什么不同, 用户很容易接受. 且在应用中可随时对这两个文件进行修改, 也就是说该算法的调试整定非常方便.

2. 应用效果

该算法已应用于兰化化肥厂尿素合成塔的氨碳比控制. 合成塔内某一时刻的氨、碳比取决于入塔新鲜物料的氨、碳比和入塔回流物料的氨、碳比. 由于缺乏质量检测仪表, 所以回流物料的氨、碳比无法测量. 因此要直接控制合成塔内物料的氨、碳比是比较困难的. 但合成塔内物料的氨、碳比是否合适同合成塔的温度有关, 所以现在人工控制都是根据合成塔塔顶和塔底的温度来进行的, 检测变量是合成塔的温度, 而操作变量是入合成塔的新鲜氨流量. 合成塔内物料中的氨、碳比同合成塔的温度关系为: “塔顶温度偏高且塔

底温度偏高,则氨、碳比偏低;塔顶温度偏低且塔底温度偏低,则氨、碳比偏高;塔顶温度偏高且塔底温度偏低,则水、碳比偏低;塔顶温度偏低且塔底温度偏高,则水、碳比偏高”。根据这样的定性规则,可建立下面的 rule 和 variable 文件(这两个文件为经过调试后的最终变量定义和规则集)。

1) 文件 variable.

$x1,5$ ($x1$ 表示塔底温度对正常值的偏差, 5 表示为 $x1$ 定义了 5 个模糊子集)

tl,sl,ok,sh,th (tl,sl,ok,sh,th 为 5 个模糊子集的符号)

-7.0, -3.0, -1.0, 1.0, 3.0, 7.0 (该行的 6 个数为 5 个模糊子集的定义)

$x2,5$ ($x2$ 表示塔顶温度对正常温度的偏差,其余各定义同 $x1$)

tl,sl,ok,sh,th

-6.5, -2.5, -0.8, 0.8, 2.5, 6.5

$y1,l1$ ($y1$ 表示氨流量调节回路设定值的改变量, $l1$ 为其模糊子集数)

-5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5 (该行为 $y1$ 各模糊子集的符号)

-2.2, -1.6, -1.0, -0.6, -0.3, 0.0, 0.3, 0.6, 1.0, 1.6, 2.2 (为各模糊子集的定义)

END

2) 文件 rule. (该文件为控制规则集)

```

if  $x1 = th$  and  $x2 = th$  then  $y1 = +5$ 
if  $x1 = ok$  and  $x2 = th$  then  $y1 = 00$ 
if  $x1 = tl$  and  $x2 = th$  then  $y1 = -1$ 
if  $x1 = sh$  and  $x2 = sh$  then  $y1 = +2$ 
if  $x1 = sl$  and  $x2 = sh$  then  $y1 = 00$ 
if  $x1 = th$  and  $x2 = ok$  then  $y1 = +3$ 
if  $x1 = ok$  and  $x2 = ok$  then  $y1 = 00$ 
if  $x1 = tl$  and  $x2 = ok$  then  $y1 = -3$ 
if  $x1 = sh$  and  $x2 = sl$  then  $y1 = +1$ 
if  $x1 = sl$  and  $x2 = sl$  then  $y1 = -2$ 
if  $x1 = th$  and  $x2 = tl$  then  $y1 = +2$ 
if  $x1 = ok$  and  $x2 = tl$  then  $y1 = 00$ 
if  $x1 = tl$  and  $x2 = tl$  then  $y1 = -5$ 

if  $x1 = sh$  and  $x2 = th$  then  $y1 = +3$ 
if  $x1 = sl$  and  $x2 = th$  then  $y1 = 00$ 
if  $x1 = th$  and  $x2 = sh$  then  $y1 = +4$ 
if  $x1 = ok$  and  $x2 = sh$  then  $y1 = 00$ 
if  $x1 = tl$  and  $x2 = sh$  then  $y1 = -2$ 
if  $x1 = sh$  and  $x2 = ok$  then  $y1 = +1$ 
if  $x1 = sl$  and  $x2 = ok$  then  $y1 = -1$ 
if  $x1 = th$  and  $x2 = sl$  then  $y1 = +2$ 
if  $x1 = ok$  and  $x2 = sl$  then  $y1 = 00$ 
if  $x1 = tl$  and  $x2 = sl$  then  $y1 = -4$ 
if  $x1 = sh$  and  $x2 = tl$  then  $y1 = +1$ 
if  $x1 = sl$  and  $x2 = tl$  then  $y1 = -3$ 
end

```

该氨、碳比控制系统于 1990 年 10 月基本完成,后经过多次调试于 1991 年 1 月 26 日正式投用。作者收集了正式投用前 10 天和正式投用后 10 天一共 60 个氨、碳比的化验值(每天三班,每班一个化验值,这些数值的原始记录可参见尿素车间总控室的操作记录)。投用效果可以从投用前的氨、碳比化验值和投用后的氨、碳比化验值的比较看出(见表 1 和表 2)。

表 1. 氨、碳比模糊控制系统投用后 10 天的氨碳比(控制目标 4.2)

26	27	28	29	30	31	1	2	3	4
4.26	4.18	4.10	4.26	4.19	4.22	4.22	4.20	4.20	4.03
4.11	4.20	4.20	4.09	4.23	4.15	4.12	4.51	4.28	4.23
4.20	4.20	4.10	4.18	4.40	4.27	4.14	4.09	4.27	4.14

表 2. 氨、碳比模糊控制系统投用前 10 天的氨碳比

16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
4.23	4.13	4.00	4.26	4.29	4.35	4.33	4.42	4.11	4.37
4.29	4.16	4.23	4.19	4.19	4.41	4.40	4.23	4.27	4.16
4.24	4.20	4.20	*	4.31	4.34	4.28	4.12	4.25	4.36

从上面两表的数据可以看出,氨、碳比自动控制投用后,合成塔的氨、碳比较人工控制要平稳。氨、碳比的设定值为 4.2, 如果以正负 0.1 作为偏差限,则自动控制时超出偏差限的值为 5 个,而人工控制时超出偏差限的值为 10 个。

参 考 文 献

- [1] 应行仁,采用最大隶属度决策方法的 FUZZY 逻辑控制器分析,模糊数学, 4(1982),1—12.
 [2] Holmblad, I. P. and Ostergaard, J. J. Fuzzy Logic Control: Operator Experience Applied in Automatic Process Control, *FLS Review*, 45 (1981), 11—16.
 [3] Ying, H. et al, Fuzzy Control Theory: A Nonlinear Case, *Automatica*, 26 (1990), 513—520.
 [4] Cao, Z. and Kandel, A. Applicability of Some Fuzzy Implication Operators, *Fuzzy Sets and Systems*, 31 (1989), 151—186.

A GENERAL FUZZY LOGIC CONTROLLER AND ITS APPLICATION

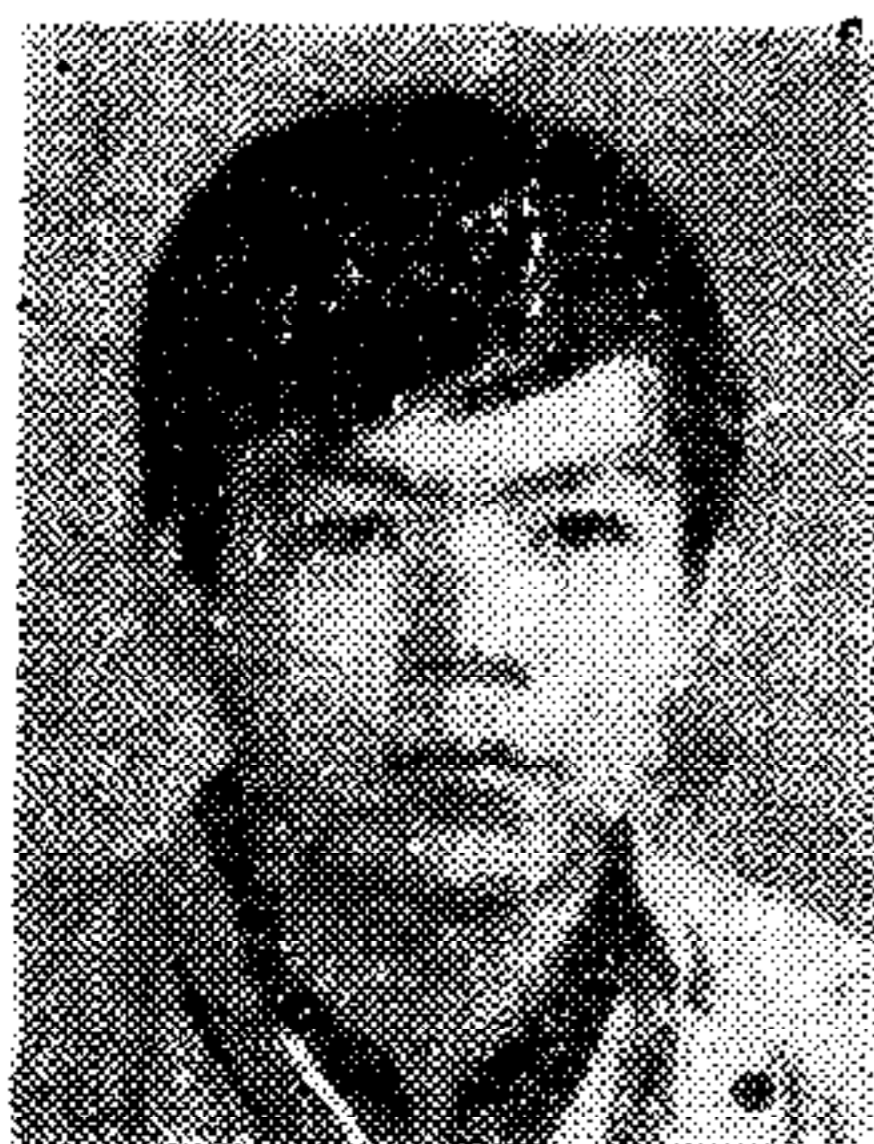
CHENG YI ZHUANG CHENG AN XIENAN

(Institute of Automation, Academia Sinica, Beijing 100080)

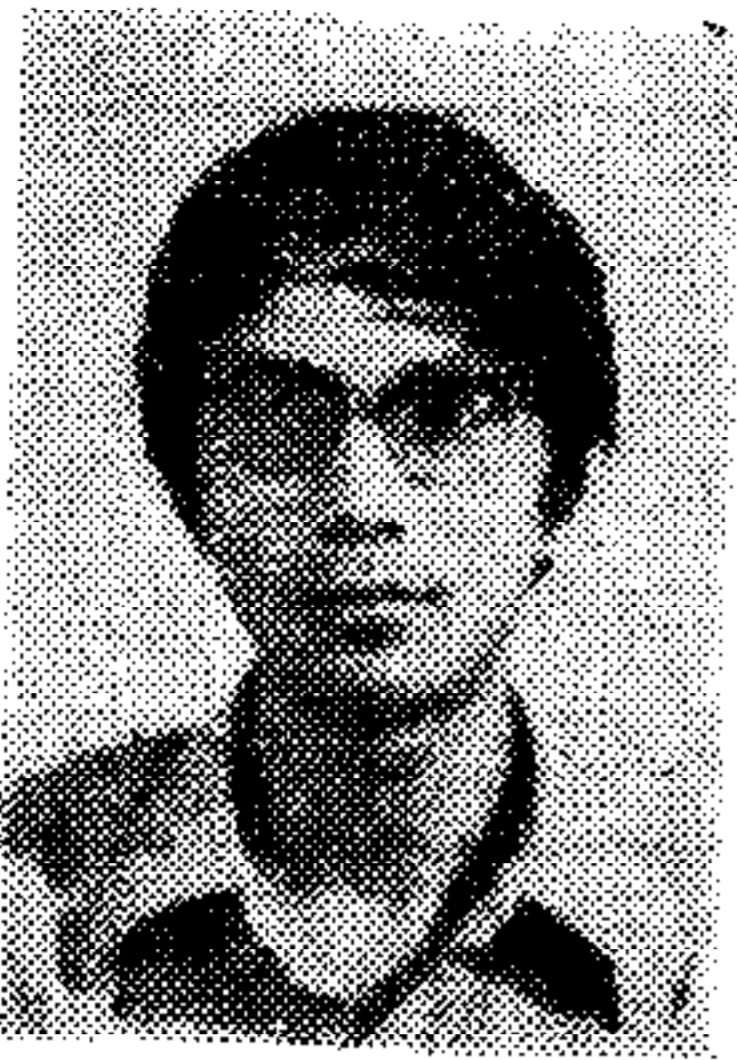
ABSTRACT

In this paper, new definitions for the fuzzy subsets of input variables and output variables of fuzzy controller are given. Then, a general fuzzy logic controller is obtained based on Zadeh's MAX-MIN fuzzy implication operator. A practical use of the controller in a chemical plant illustrates the effectiveness of the controller.

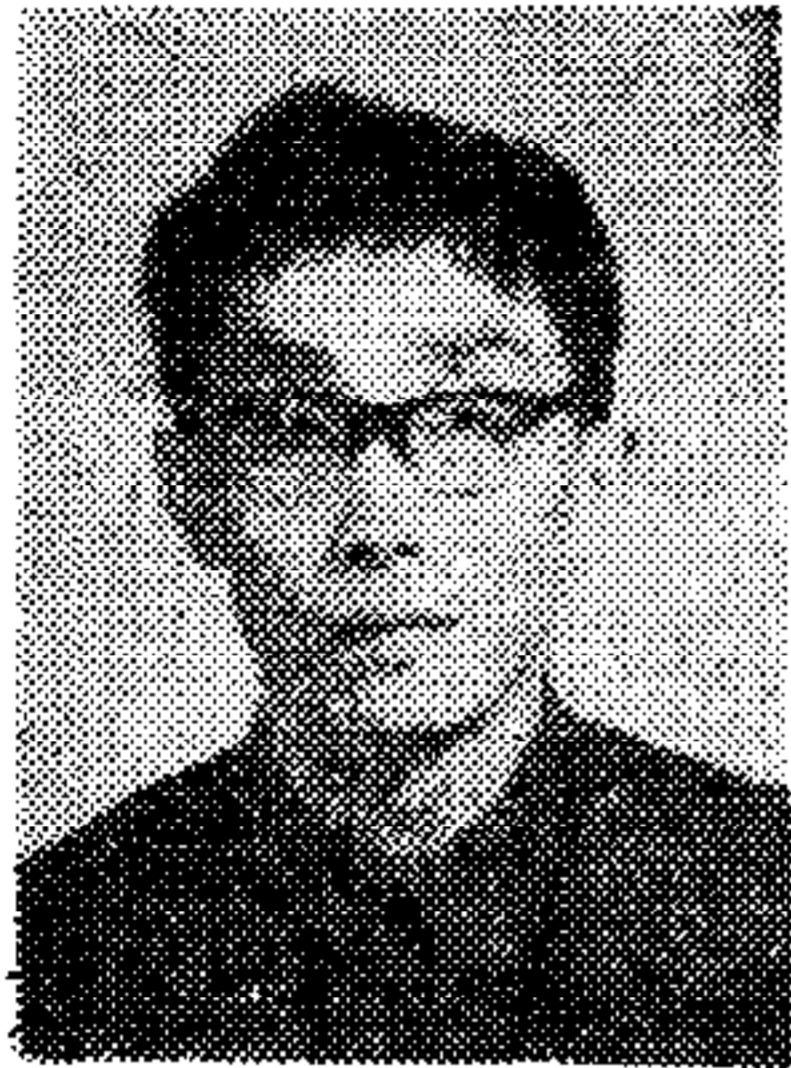
Key words: Rule; fuzzy logic; control.



程 一 中国科学院自动化所副研究员。1960年12月出生,1983年毕业于中国科技大学,后考入中国科学院自动化所读研究生,于1986年和1989年分别获硕士和博士学位,主要研究方向为控制理论在工业过程控制中的应用,包括容错控制、模糊控制等。



庄 诚 中国科学院自动化所工程师。1960年7月出生,1983年毕业于北京化工学院化工自动化及仪表专业,1983年至1987年在北京橡胶六厂工作,1987年后到中国科学院自动化所工作,研究方向为化工生产过程控制。



安 燮 南 中国科学院自动化所研究员。1936年出生,1954年毕业于上海交通大学电工器材制造系。1959年由交大毕业分配到中科院自动化所工作,前期从事工业控制计算机硬件工作,1978年转为计算机应用和工业过程控制研究工作。现担任中国仪器仪表学会理事,中国自动化学会应用专业委员会委员,中国自动化学会计算机应用专业委员会委员和中国化工学会化工自动化及仪表学会理事。研究方向为工业过程控制。