

模糊语言控制器及其在过程控制中的应用

尹长德

模糊集合论 (fuzzy set) 于1965年由美国控制理论学家L. A. Zadeh⁽¹⁾提出来, 至今已十多年了。这十几年模糊数学已有了很大发展。从英国学者 Gaines和Kohout (4, 5) 的资料, 可见其发展情况。他们搜集了一千多篇文献 (至1976年六月), 仅就 763 篇文献进行了分类, 其中判定方面45篇、自动控制方面46篇, 图样识别55篇, 自动机 65篇、学习系统和人工智能22篇、系统理论11篇, 详见表1。世界上有20多个国家200多位研究者从事模糊理论及应用的研究。到1976年6月各年度发表文献的情况见表2。模糊数学引起了数学、计算机科学、控制科学、信息科学、经济学、管理学、系统科学、人工智能、心理学、语言学、生物学和医学等许多领域研究者的极大兴趣。既使这样, 目前仍处在深入研究阶段。这个理论还没有发现几个重大的成功应用的事例。

表1. 763篇文献按专业分类情况

(截止1976年6月摘自(4))

自动机	65	一般逻辑	32	生物学	10
图样识别	55	拓扑	29	格论	10
社会科学	49	生理学	27	归纳逻辑和系统	8
语言学	49	模糊度理论	24	对策论	7
控制	46	集合论	23	反论分析	7
概率论	46	学习系统和人工智能	22	公差容限	4
判定	45	信息检索	18	半环	3
多值逻辑	38	分类理论	15	测不准原理	1
开关逻辑	36	医学科学	13	真值原理	1
形式逻辑	32	系统理论	11	模式逻辑	1

* 表中数字为篇数。

表2 各年度发表文章数

年代	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
文章数	2	4	4	12	22	25	42	58	88	136	227	143 (不完全)

模糊数学的内容很广。本文仅就模糊数学在生产过程控制中应用作一介绍。1975年英国学者 Mamdani 等发表了他们根据模糊算法构成的模糊逻辑控制器及其在工业对象控制中应用的试验结果,从而实验验证了模糊集合论的有用性。这些实际应用的试验结果,尽管是试验室规模的,但它还是给模糊数学提供了有力支持的依据。

本文先简单讨论一下工业生产过程控制的难处,然后介绍一些模糊集合的基础知识、模糊语言控制器的综合,最后介绍模糊控制器在工业对象上试验情况和结果,简要地讨论一下存在问题。

一、工业生产过程控制中问题

在意义明确的系统领域,例如导弹和空间飞船的制导等里,现代控制理论获得了很大的成功。但是,在许多实际工业过程中,尽管发展了大量控制数学理论,实践证明,控制这些过程,传统的方法失效了。当然,这里有许多原因,就其根本原因来讲,缺乏生产过程的详细的结构知识,妨碍了这些理论的应用。

大家知道,按传统方法设计一个生产过程的控制系统,先是采用各种方法,包括运用物理、化学、热力学、力学和电磁学等一系列基本规律,或用数学方法描述这个对象的特征,或用实验方法测定生产过程的动静特性,即找到描述这个过程的数学模型,然后根据这个数学模型进行系统设计并实施,使这个过程达到某种品质指标。如果这个模型是准确的线性描述,则控制问题容易解决;如果是复杂的,譬如非线性、噪音大、大时延和时变系统,则是很难自动控制的。事先知道精确的和有用的过程数学模型,可用现有控制理论去设计这些过程的控制系统。许多难以数学描述的生产过程,如炼钢炉,水泥窑和玻璃工业中压制等,这样的模型是不存在的。虽然各种自适应技术能部分的补偿这方面的不适用性,可是,如果控制对象不能在理论假设范围内建立模型,那就达不到自动控制的目的。此外,在建立数学模型时,还需要大量事前信息,而实际上有些信息只是定性的,即只能用语言给出品质判据。甚至还在某些过程中,如递级管理控制系统,人参与监督判定系统,操作人员是系统中重要组成部分,他们使用大量不确切的语言信息,现有控制理论还不能用这些信息,因而就妨碍传统理论的应用。在这些复杂的工业系统中,有经验的操作人员比常规控制器的自动控制会得到更好的结果。而操作人员采用的控制策略所建立的数条规则,由于规则的不确切性,很难把这些定性控制策略变换为定量控制器的设计。因此,能否根据操作人员的操作经验(如表3所示),再加上运用模糊集合论,构成一种模糊控制器,使用计算机联机控制这一类对象,是人们非常感兴趣的事。许多试验结果肯定了这个设想。

二、模糊集合的基本知识

模糊概念在人类生活中早已存在。当一个人打听情况时问:“开会人到齐了吗?”,另一个人可能回答:“到的很少”,“到的很多”或“差不多到齐了”。当用起重机起吊一个工件时,吊装工人用口喊指挥时,常喊:“快快”、“快”、“慢”、“慢慢”。在工厂里,试调某设备时,一个工人监视仪表,另一个工人调节阀门。监视仪表的工人对调节阀门的工人喊:“正(反)向大调”、“正(反)向中调”、“正(反)向小调”。

表 3 水泥窑操作的某些规则 (共27条这里只摘录 3 条) (10)

情况	条 件	作 用
1	燃烧区温度低	当燃烧区温度激烈降低时 (a) 减小窑转速 (b) 减小燃料比例 当燃烧区温度略微降低时 (a) 增加风机转速 (b) 增加燃料比例
2	燃烧区温度低 空气中氧的百分比低 后头温度全好	(a) 减小窑转速 (b) 减小燃料比例 (c) 减小风机转速
3	燃烧区温度低 空气中氧的百分比低 后头温度高	(a) 减小窑转速 (b) 减小燃料比例 (c) 减小风机转速

人们就是根据这样一些模糊信息和不完全确切的信息, 很简捷地了解事物和做出决定。有些生产过程很难用目前的自动控制办法进行控制, 只好仍然由熟练工人凭经验来操纵。这些经验可以用自然语言表示。前面几个例子中, 多、少、大、小、快、慢、差不多、很等反映模糊事物的词, 就是自然语言的一些表示法, 而用传统的数学模型却无法表示。

应当指出一点, 人们在谈话中讲这些模糊量时, 由于过去的实践, 人们脑子里已经对那个模糊量在那个条件下, 有了一个量的范围, 如前面例子中说: “差不多到齐了”, 自然想到大约有90%以上的人到了会场。如果他对那个模糊量没有一定条件下的一个量的范围, 他也就不理解那个模糊量。这就说明模糊量要有一定范围。

1. 基本运算的定义。在言语域中, 支持集X中的模糊集A, 用隶属函数 (membership function) $\mu_A(x)$ 表征, 对每个元素 $x \in X$, $\mu_A(x)$ 数值定义在闭区间 [0,1] 内, 它表示X在A中的隶属等级, 即X属于A的程度。

在模糊集合论中, 应用了三个基本运算, 定义如下:

(a) 言语域的模糊子集A和B的并集是一个模糊子集, 表示为 $A \cup B$, 其隶属函数定义为

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in X \quad (2.1)$$

并集对应于连接符‘OR’。式中 $\forall x$ 指所有X。

(b) 模糊子集A和B的交集是一个模糊子集, 表示为 $A \cap B$, 其隶属函数定义为

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in X \quad (2.2)$$

交集对应于连接符‘AND’。

(c) 集合的模糊子集A的补集是一个模糊子集, 表示为 $\neg A$, 其隶属函数定义为

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X \quad (2.3)$$

补集对应于连接符‘NOT’。

(d) 并集、交集和补集的某些性质

$$\begin{aligned} \text{i) } \neg (A \cup B) &= \neg A \cap \neg B \\ \neg (A \cap B) &= \neg A \cup \neg B \end{aligned} \quad (2.4 a)$$

$$\begin{aligned} \text{ii) } C \cap (A \cup B) &= (C \cap A) \cup (C \cap B) \\ C \cup (A \cap B) &= (C \cup A) \cap (C \cup B) \end{aligned} \quad (2.4 b)$$

这些性质也可以用隶属函数表示, 比如

$$1 - \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \min[1 - \mu_A(x), 1 - \mu_B(x)] \quad (2.5)$$

2. 模糊化运算 (fuzzification)

把非模糊集转换成模糊集的效果或增加一个模糊集的模糊度称为模糊化运算 (或更具体地讲, 称为支持模糊化 (support fuzzification))。用 $F(A)$ 或 \tilde{A} 表示对 A 进行模糊化。波浪号称为模糊算子。 $X \approx 3$ 指“ X 近似等于 3”, 而 $X = \tilde{3}$ 指“ X 是近似到 3 的一个模糊集”。模糊算子 F 用它的 Kernel $K(x)$ 表示, 它是把 F 应用到单一量 $1/X$ 得到的模糊集。于是

$$K(x) \triangleq \tilde{1}/X \quad (2.6)$$

对模糊集 A 进行模糊化运算, 得到下式

$$F(A, k) \triangleq \mu_A(x) K(x) \quad (2.7)$$

$$x \in X$$

这里描述了标量 $\mu_A(x)$ 与模糊集 $K(x)$ 的乘积。

3. 模糊语言

前面谈到, 当人们讲到模糊语言时, 实际上大都进行了定量分析, 亦就是对于这些非数值领域中问题数值化、定量化。在自然语言或人工语言中, 相应地有不少表现模糊的词或词组。语言变量值就是用短语或语义型式 U 的模糊子集来表示。一般来讲, 语言变量值是由原始词 (又称原子项、如年青、年老)、否定词 (不)、连接词 (与、或)、程度副词 (如很、多、轻轻地、多或少, 这里“多或少”复合了三个单词, 但可以把它看成一个原子项) 和记号 (如圆括号) 等通过一定的毗连方式构成词组。这个词组可以写成模糊逻辑公式。计算步骤的优先次序见表 4。表中 h 是语言副词的运算。习惯上, 在

表 4 计算的优先次序

优 先 次 序	运 算
第 一	h, not
第 二	and
第 三	or

逻辑公式中用圆括号来改变计算步骤的优先次序。

4. 模糊条件语句和模糊关系式

工业生产中, 语言表达式像流量是“大”、“中”、“小”“不大”等等, 显然是言语域“流量”的模糊子集。因此, 为了表示把输入以模糊方式变到输出的系统映像的概念, 引进了模糊条件语句的概念。把系统描述为模糊条件语句的集合, 其型式为

如果‘输入是大的’，则‘输出是中等的’， (2.8)

现给出言语域X中的模糊子集A和Y中模糊子集B，对应于模糊条件语句S：

if A then B (2.9)*

的隶属函数，由〔3〕定义为

$$\mu_S(y, x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad x \in X, y \in Y. \quad (2.10)$$

把这个模糊语句用到整个系统，例如两个模糊语句用连接符‘OR’连接，得到

if‘输入是大的’，then‘输出是中等的’
or (else) (2.11)

if‘输入是中等的’，then‘输出是小的’

模糊语句S组合了两个语句：if A₁ then B₁ or (else) if A₂ then B₂，其隶属函数为

$$\mu_S(y, x) = \max[\min[\mu_{A_1}(x), \mu_{B_1}(y)]; \min[\mu_{A_2}(x), \mu_{B_2}(y)]] \quad (2.12)$$

同样方法，可以扩展到多于两个模糊语句的情况。

通过模糊条件语句建立了模糊子集之间的关系式之后，下一步，我们从给定的模糊语句来计算推理的模糊子集。假设已知规则：if‘输入是大的’then‘输出是中等的’。现在要求出‘输入是很大’时输出是什么？这里，我们可以应用下列推理的组合规则：给出一个模糊语句S：if A then B，而模糊子集B’可以从给出的模糊输入子集A’推理得出。（这里A和A’是X中模糊子集，B和B’是Y中模糊子集），其隶属函数定义为：

$$\mu_{B'}(y) = \max \min[\mu_{A'}(x), \mu_S(y, x)] \quad (2.13)$$

或用模糊逻辑公式表示

$$Y = X \circ R$$

这里R是从X到Y的模糊关系式，在此例中，它由模糊条件语句(2.9)给出，亦即由(2.15)式求出。

这里再说明一下，式(2.9)可写成模糊逻辑公式为

$$\text{if } A \text{ then } B \triangleq A \cap B \quad (2.15)$$

式(2.11)可写成：

$$\text{if } A_1 \text{ then } B_1 \text{ or if } A_2 \text{ then } B_2 \triangleq A_1 \cap B_1 \cup A_2 \cap B_2 \quad (2.16)$$

假定有下列型式模糊语句：

$$\text{if } A \text{ then (if } B \text{ then } C) \text{ else } D \quad (2.17)$$

也可写成模糊逻辑型式为

$$\begin{aligned} &\text{if } A \text{ then (if } B \text{ then } C) \text{ else } D \\ &\triangleq A \cap B \cap C \cup \neg A \cup D \end{aligned} \quad (2.18)$$

这些公式的计算优先次序见表4。

举例说明式(2.14)。R由式(2.15)求出。给出模糊子集X，则可由X和R的最大最小乘积(2.13)或(1.14)求出：

* if—如果，then—则，以及以后用到else (或OR) —否则 (或)。

$$\begin{array}{c} X \\ [0.2 \ 1 \ 0.3] \end{array} \circ \begin{array}{c} R \\ \begin{pmatrix} 0.8 & 0.9 & 0.2 \\ 0.6 & 1 & 0.4 \\ 0.5 & 0.8 & 1 \end{pmatrix} \end{array} = \begin{array}{c} Y \\ [0.6 \ 1 \ 0.4] \end{array} \quad (2.19)$$

5. 模糊算法

模糊算法是模糊指令的有序集。执行这个模糊指令集得到了所给定问题的近似解。模糊概念特别是模糊条件语句的概念奠定了系统地应用模糊算法的基础。因而，模糊算法成为系统分析和判定过程的重要工具。可是，这种系统和过程若用常规数学方法又太复杂了。

这个模糊算法可用现在的计算机来执行。在模糊算法里，基本指令分为三类：

1) 赋值语句，即

X ≈ 5

X ≈ 小

X 是大

X 是不大和很小

2) 模糊条件语句，即

IF X 是小 THEN Y 是大 ELSE Y 是不大

IF X 是正 THEN 慢慢地减小 Y

IF X 是远大于 8 THEN 停机

IF X 是很小 THEN 转向 7

注意，在这样语句中，或前项，或后项，或两者都可以是模糊集标志。

3) 非条件作用语句，即

X 乘以 X

慢慢地减小 X

删去出现 1 的头几项

转向 7

打印 X

停机

注意这些指令中某些是模糊的，某些则不是。

三、“模糊控制器”的语言综合

任何控制器的用途，首先是使有关状态变量变成控制作用变量，也就是周期性地检查状态变量，并且由关系表达式计算控制作用变量的值。我们这里的实际系统的控制器是根据操作人员的操作方法和设计人员的经验设计成的。已知的关系式是模糊的和定性的，完成一组语言控制规则，构成模糊逻辑控制器。这样一来，在这种控制器中，这些测量变量和控制作用变量是可能范围的非模糊域，我们用语言把这些变量表示成为模糊子集。运用模糊逻辑推理的组合规则，对这些指令进行定量解释，判定控制系统下一步

怎样动作？

控制系统结构图在图 1 上。启发式判定规则在误差通道中代替常规反馈控制器。图中 PB, PM, PS 等意义见 (3.1) 式

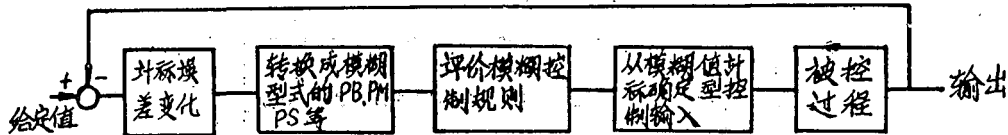


图 1 控制系统结构图

计算控制作用包括下列四步：

- (1) 计算当时误差及其变化率；
- (2) 变换误差值为模糊变量；
- (3) 应用推理组合规则评价判定规则；
- (4) 计算调节过程所要求的确定型输入。

计算当时误差值及其变化率，把这些值量化为言语域的点数，即分成若干级，每一级看成一个模糊集，把误差和误差变化率表示成模糊集作为输入。在 King 和 Mamdani 一文 [8] 中，误差用语言变量分成七个模糊子集，其隶属等级如下：

- (1) PB 是‘正大’；
 - (2) PM 是‘正中’；
 - (3) PS 是‘正小’；
 - (4) PO 是‘正零’；
 - (5) NO 是‘负零’；
 - (6) NS 是‘负小’；
 - (7) NM 是‘负中’；
 - (8) NB 是‘负大’。
- (3.1)

具体作法，先是假设测量误差或误差变化率的变化范围在一闭区间，如 [100℃, 200℃] 使它对应于语言范围，接着规定这个度量是 {围绕 150° 的温度} 的度量，规定隶属函数 [0, 1] 之间所有值。由此，做出测量误差或误差变化率及隶属函数等级之间

表 6 模糊子集与误差值的定量关系 [8]

	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.8	1.0	0.5	0.1	0	0
PO	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0.6	0.1	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0.1	0.6	1.0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.1	0.5	1.0	0.8	0.3	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

关系式，如表 6 所示。其他作者也给出类似表格〔7〕或函数〔11,14〕。

一般来说，过程操作人员应用误差 E 和误差变化率 CE，计算过程输入值 CU 的变化，这通常把判定规则设计成生产过程常用的比例积分控制器。图 2 给出控制规则的系统状态—作用关系〔8〕。

误差 变化	NB MN NS NO PO PS PM PB							
PB								
PM								
PS								
O								
NS								
NM								
NB								

图 2 控制规则的系统状态—作用图表示法

判定规则真正型式及其所要求的变量与被控过程和要用的启发方法有关，判定规则一般完成一组模糊条件语句：

$$\text{IF } E \text{ 是负大 THEN } CU \text{ 是正大} \quad (3.2)$$

对于给定误差值 E，利用推理组合规则来评价，算出过程输入变化的 CU 值。在大多数情况下，规则比式 (3.2) 复杂得多。对于采用误差和误差变化率的系统，运用下列规则：

$$\text{IF } E \text{ 是正大 OR 正中 THEN IF } CE \text{ 是负小 THEN } CU \text{ 是负大} \quad (3.3)$$

仍然可以用上述方法算出 CU 值。表 7 是 Mamdani 给出的汽轮机加热—压力回路的模糊控制指令。

表 7 汽轮机加热——压力回路模糊控制的指令

IF PE = (NB or NM)	THEN IF CPE = NS	THEN HC = PM
or IF PE = NS	THEN IF CPE = PS	THEN HC = PM
or IF PE = NO	THEN IF CPE = (PB or PM)	THEN HC = PM
or IF PE = NO	THEN IF CPE = (NB or NM)	THEN HC = NM
or IF PE = (PO or NO)	THEN IF CPE = NO	THEN HC = NO
or IF PE = PO	THEN IF CPE = (NB or NM)	THEN HC = PM
or IF PE = PO	THEN IF CPE = (PB or PM)	THEN HC = NM
or IF PE = PS	THEN IF CPE = (PS or NO)	THEN HC = NM
or IF PE = (PB or PM)	THEN IF CPE = NS	THEN HC = NM

表中 PE—压力误差，CPE—压力误差变化率，HC—加热输入变化，其余符号见(3.1)式。

例如，规则是

$$\begin{aligned} & \text{IF } A_1 \text{ THEN (IF } B_1 \text{ THEN } C_1) \\ & \text{IF } A_2 \text{ THEN (IF } B_2 \text{ THEN } C_2) \\ & \dots\dots\dots \end{aligned} \quad (3.4)$$

于是，用 V_e 表示幅度，有

$$\text{测量误差 } E = -V_e \text{ 小, 误差变化率 } CE = +V_e \text{ 小} \quad (3.5)$$

是在言语域上定义的一个模糊短语 P ，其隶属函数等级是

$$\mu_P(e, ce) = \min \{ \mu_{-V_e \text{ 小}}(e), \mu_{+V_e \text{ 小}}(ce) \} \quad (3.6)$$

语句‘如果 P 则 $H = +V_e$ 是中等’也是在 $E \times C \times H$ 上定义的一个模糊短语，其隶属函数等级是

$$\mu_Q(e, ce, h) = \min \{ \mu_P(e, ce), \mu_{+V_e \text{ 中}}(h) \} \quad (3.7)$$

最后，两个或两个以上模糊短语 Q_1, Q_2, \dots ，由定义在 $E \times C \times H$ 上的‘否则’连接成模糊短语 S ，其隶属函数为

$$\mu_S(e, ce, h) = \max \{ \mu_{Q_1}(e, ce, h), \mu_{Q_2}(e, ce, h), \dots \} \quad (3.8)$$

控制作用是按照上述给出的推理规则确定，亦就是给出实际输入 X 和模糊算法集 S ，由最大最小乘积 $X \circ S$ 求出合成输出。

给出测量 A_i 和 B_i 等数值后，就得出单独规则结果是 C'_1, C'_2 等，这些单独规则结果组合给出全部合成控制作用

$$C' = \max (C'_1, C'_2, \dots) \quad (3.9)$$

由此，可以由一个以上的规则计算出控制作用。

对于输入值的特殊集（输入值是非模糊向量，仅一个元素等于1，其余全是零），评价模糊值的结果得到所有可能控制作用的隶属函数的模糊集。为了取得确定型作用，选择这些值之一。选择的步骤取决于隶属函数的等级和特殊应用。在这个工作中，选择最大隶属函数等级作为控制作用，除了几个控制作用都有同样的隶属函数等级的情况外。一个以上的峰或平峰时，选择两个峰之间的值或高处的中心值。图3上示出隶属函数数值和控制作用的典型关系曲线。根据这些曲线形状估价所用控制规则的质量。图3上A曲线表示出现一个主要控制规则，在这个区域里有一个单一强峰值。图3上曲线C示出没有出现一组好的规则的模糊结果；图3上曲线B表示出现两个峰值，它表明至少有两个强的且矛盾的规则出现。在图3上C和B的情况下，适当修改某些规则，一定能得到好

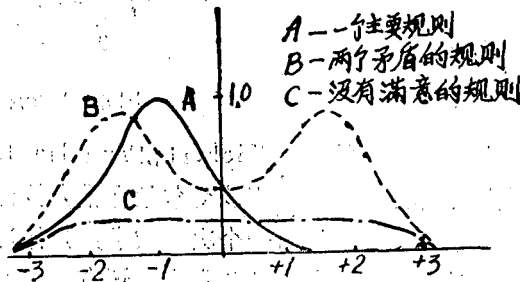


图3：用模糊值计算控制输入变化

的控制作用。

采样区间的选择取决于被控过程的运行。选择使过程调节时间内至少做五个重要控制作用。

四、模糊控制器的试验

Zadeh于1973年发表的有名文章〔3〕是模糊语言控制器的真正先行工作。75年英国Mamdani和Assilian发表了在汽轮机上的试验结果。接着英国Carter和Hague Rutherford在烧结工段上,丹麦P. M. Larsen和Østergaard在热交换器上,荷兰Kickert和Nauta Lemk在化学反应热水槽上,英国Tong在碱性氧气炼钢过程上,英国King在热交换器上,先后做了模糊控制器试验,并同时用数字计算机进行了PI或PID控制试验,将两个结果进行了比较。C. P. Pappis和Mamdani还研究了交通路口模糊控制器。

在试图模糊控制时,控制工程师面临两个基本问题。第一个是构成控制算法规则和确定原始模糊集,它是应用过程的事前知识做出。这个知识来源于经验和对过程的物理、化学和工程的理解。第二个基本问题是所谓实现(执行)问题,也就是关于语言的数值描述。主要是决定控制范围、选择控制器输入和控制器输出的量化等级,在定量空间上给原始模糊集以数值化以及选择采样区间。而这两个问题常常是互相依存的。

第一个把模糊集理论应用于动力学过程的控制是Mamdani和Assilian,这是非常重要的工作阶段。

Mamdani和Assilian研究了小型实验室用汽轮机的控制〔7〕。用改变锅炉的加热和改变节流阀的设置来控制汽轮机的速度和锅炉汽压,控制这个过程的难点是非线性、噪声和强耦合,而且人工控制稍微费力,可是找到的算法比平常运行的DDC算法更好地完成控制任务(见图4)。同时该系统对操作条件变化的灵敏度很小。图5是King和Mamdani得到的试验结果。

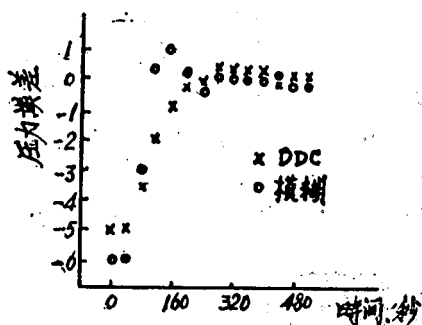


图4 Mamdani和Assilian得到的结果

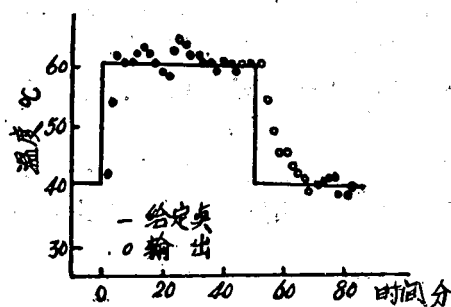


图5 King和Mamdani得到的结果

与此同时独立地进行研究工作的,是Kickert和Van Nauta Lemke。他们研究了试验用温水对象的模糊控制算法的品质。用改变包括在槽内的热交换器的热水量的办法,来调节恒流量流水槽水的温度。还有一个次要要求,是保证对流出水温给定点的阶跃变化响应要快。过程的基本难点是非线性和噪声,还有冷水的不对称的增益特性和纯时延,用基本算法得到的品质同最优PI控制器进行了比较。给定点改变10°C时,阶跃

响应分别是0.3分钟和0.7分钟，显然过程响应模糊算法比PI控制器快。图6给出控制对象的原理图。

为了比较起见，为拟合试验建立了两个相等时间常数和—个时延构成的模型，时延为10秒，时间常数为40秒，用PI控制器控制这个模型。根据不同积分误差判据ITAE, IAE和ISE*和10°C阶跃输入函数，最优调整了控制器，积分增益 K_I 和比例增益 K_P 的最优值示在表8上。

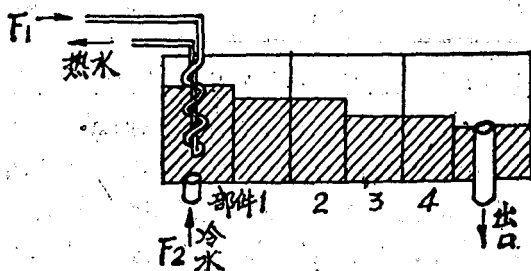


图6 温水被控对象

表8 数字PI控制器的最优 K_I 和 K_P 值
(采样时间1秒)

	ITAE	ISE	IAE
K_I	0.018	0.019	0.020
K_P	1.35	3.02	1.94

应用这个PI控制器的主要困难之一是在所希望的温水温度的很宽范围内工作时，需要调整它。显然，更好的控制器，如以随机自适应控制比单独PI控制会更好。因此PI控制和模糊控制之间比较，被认为仅是相对品质的粗略比较。该作者进行了三种模糊算法的试验。其第三个方案规则集如下：

如果X‘非小’，则 F_1 ‘很小’

则 F_2 ‘很小’

如果X‘中’，则 F_1 ‘靠近稳态’

则 F_2 在稳态

(4.1)

如果X‘很小’，则 F_1 ‘很靠近稳态’

则 F_2 在稳态。

试验结果见表9。

* ITAE等意义可见《现代控制工程》等书。

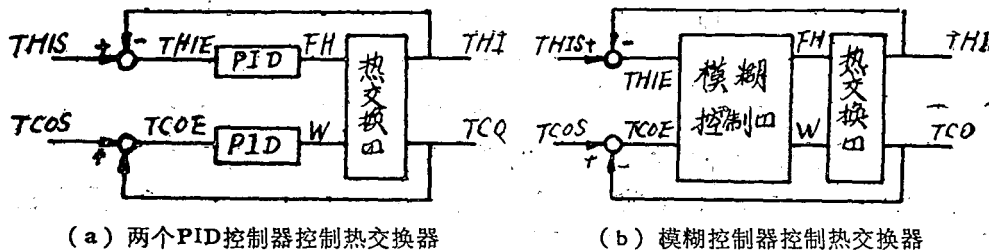
表9 不同控制器在阶跃10℃时响应的品质

控制器	上升时间	超调量(℃)	温度变差(℃)
经典PI型	0.7分	1.5℃	0.4℃
第一种模糊型	0.3分	小于变差	1.5℃(振荡)
第二种模糊型	0.3分	小于变差	1.5℃(振荡)
第三种模糊型	0.3分	小于变差	0.5℃

由表9看出，最后一个结果最好，这是应用了随遇稳态流量位置的附加信息。但带来了重调的缺点。操作者指出这个稳态值的推测可以很好地完成。

英国Rutherford和Carter提出了进一步应用。在这个应用中，模糊算法用来控制原始未处理的料混合的湿气。监督烧结段的予处理烧结矿混合的透气性，来检查烧结矿石的效率和均匀性。这是单输入单输出过程。输入到过程的水流量是控制变量。过程控制的难点是过程的非线性、时变增益、噪音和纯时延，试验结果表明模糊算法比人工操作要好，透气性方差比人工操作减少40%，和常规PI控制一样好，且对过程参数变化不灵敏。

丹麦Φstergaard报导了控制小型热交换器用的模糊算法的试验结果。这是两个输入两个输出的过程。控制问题是用改变热水流量和加热它的功率的办法，调节冷水出口温度和热水入口温度。难点在于过程有大的非线性和强耦合。控制系统框图示在图7上。



符号说明：THI—热水入口温度，TCO—冷水出口温度，
S—给定值，E—温差，FH—热水流量
W—加热消耗功率

图7 Φstergaard试验原理框图

热交换过程的动特性，这里只是粗略地描述。从加热消耗功率W到THI和TCO的时间常数分别为TWTHI和TWTCO，大约是：

$$TWTHI=12.0分; TWTCO=7.5分、$$

随着FH变化而变化的THI时间常数约为TFHTHI=15.0分。TCO回路采样时间取2分，而THI回路的采样时间取3.5分。

该作者介绍了用APL语言描述模糊算法，可直接应用划分若干级的变量实现控制。设幅度的模糊变量为

$$V \triangleq \text{幅度} \quad (4.2)$$

模糊变量‘幅度’的值，可以用‘正大’，‘正中’，‘正小’等模糊子集表示。用隶属函数 μ_{LPOS} 表示，在APL语言中可用

$$\begin{aligned} &\nabla \text{MYLPOS} \leftarrow \text{LPOSV} \\ [1] \text{MYLPOS} &\leftarrow 1 - \left((0.5 + |1 - V|) \cdot 2.5 \right)^{-0.5} \end{aligned} \quad (4.3) *$$

表示LPOS。LPOS的隶属函数对应于[-1, 1]内的数值。共用21个元素逼近。接着，列举用APL语言写出并集，交集和补集的表达法。

(1) V的两个模糊子集A和B的并集，应用APL语言，给出

$$\begin{aligned} &\nabla \text{OR} (\square) \nabla \\ &\nabla Z \leftarrow X \text{ OR } Y \\ [1] Z &\leftarrow X \vee Y \end{aligned} \quad (4.4)$$

(2) V的两个模糊子集A和B的交集，应用APL语言

$$\begin{aligned} &\nabla \text{AND} (\square) \nabla \\ &\nabla Z \leftarrow X \text{ AND } Y \\ [1] Z &\leftarrow X \wedge Y \end{aligned} \quad (4.5)$$

(3) 模糊子集A的补集，用APL语言

$$\begin{aligned} &\nabla \text{NOT} (\square) \nabla \\ &\nabla Z \leftarrow \text{NOT } X \\ [1] Z &\leftarrow 1 - X \end{aligned} \quad (4.6)$$

模糊子集“正大”、“正中”、“正小”等用在区间[-1, 1]内的隶属函数表征。推理组合规则和模糊算法，可用APL语言写出。整个控制算法都用APL语言写出，总共写出39条APL语句，利用划分变量直接控制热交换器。试验结果见图8。

Tong试验加压液体槽的控制。改变流入槽的液体流量和压缩空气的流量，调节总压力和槽内的液位。控制的难点是过程的非线性、强耦合和完全不同的两个时间常数（各约为3秒和3000秒），采用模糊控制器，也达到了好的结果，但不如特征方程轨迹法设计的控制器进行控制那样好（图9）。

Tong在另一篇文章[13]中讨论了影响关系矩阵R的因素。影响R最大的是改变模糊控制规则，而实现（执行）问题对关系矩阵影响较小，因此，在设计模糊控制器时，改变模糊控制规则本身，效果最明显。

上面介绍的模糊控制器的试验结果，显然是直接运用计算机完成的。没有计算机的发展，模糊控制器根本无法实现。当然这里有个成本问题。

*模糊子集‘正大’表达式为

$$1 - \exp \left[- \left(\frac{0.5}{\text{abs}(1 - V)} \right)^{0.5} \right] \text{其余见[14]}$$

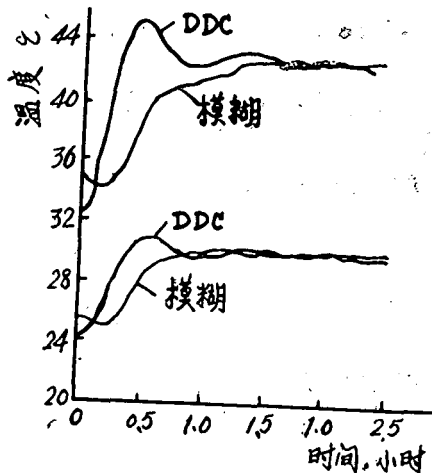


图8 Φ stergaard得到的结果

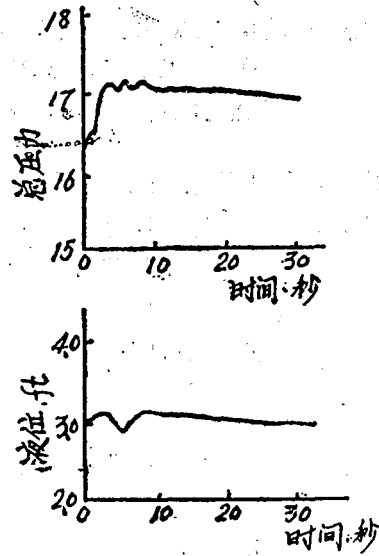


图9 Tnog得到的结果

这里所谈模糊理论只是知识状态的表示。它既不存在于系统中，也不存在于控制器中，而存在于人的思维活动中。虽然实际上设计的控制器称为“模糊逻辑控制器”，事实上它是确定型作用，也就是做判定用的这个算法。虽然以模糊语言术语设想的，在实际设计完成后，即在建立模糊集和语句之后，它不再是模糊的。

这些研究有一些共同点，归纳如下：

1. 最明显的共同特征是它们不依靠过程的显式模型。直接用经验和对过程的定性感觉来构成控制算法，经过反复几次试验和修改，最后得到适用的控制算法。当然做这项工作很费时间，也说明设计这种控制器有一些困难。

2. 第二个共同特征，在所有算法中，初始集合都有这样的名称，如“正大”或“负小”等，这是根据这些量的含义和幅值来选择的。

3. 还有一个共同特征，它们原则上涉及到输出调节，但炼钢方面应用就不是。

尽管有上述共同特征，但还有不同点。

1. 最重要一点，或许是处理非模糊量方式。所有研究者都认为过程的精确测量可以表示成模糊单量，即隶属函数除在测量值点等于1外，其余处处等于零的模糊集。而争论点在于怎样从输出模糊集选择单一控制值。前面已作了介绍，至于选哪个好没有明确的理由。

2. 在结构上也有所不同，一种[7、8、14]是用给定点误差和给定点误差变化作输入，控制变化作输出，规则型式为

如果 {给定点误差} 则 {给定点误差变化} 则 {控制变化}

另一种[15]应用给定点误差和给定点误差变化之和作为输入，而且以两种方式工作，如果误差是‘大’，则算法给控制的绝对值。反过来，如果误差是‘小’，给出中

间值。[11]中也应用了具有双重工作方式的算法，目的是力图达到最优时间响应。

3. 和其他一些研究者有所不同，Mamdani和Assilian算法包括两个独立词组，第一个词组有15条规则词组，控制加热来调节汽轮机压力；第二个有9条规则词组，控制节流阀设置来调节汽轮机速度。有两个控制回路。

4. King和Mamdani开始用Mamdani和Assilian压力算法控制在化学反应器的温度，发现过程纯时延引起振荡，这个问题由Kickert解决了，他引入了Smith预测器的模糊等价物，考虑了过程的过去输入这一信息。

5. 在文献[14, 11, 16]中全应用多变量算法，过程输出影响过程的每一个控制输入。 Φ stergaard的算法有17条规则，Kickert等算法有10条规则，Tong有36条规则。

这些研究还叙述了各种各样的实现方法。

1. 在不同计算机上，用不同计算机语言来实现。机器有PDP 8, PDP11, IBM1800等计算机，语言有直接用汇编语言，也有用FORTRAN语言，BASIC语言和APL语言等。

2. 量化有9等、5等、15等和18等。

3. 初始集。一种是选数个量化等级，然后在这些量化等级上定义隶属函数[6, 7, 8]，其优点是：它只是指定数的向量问题，改变灵活，缺点是如果量化等级变了，就要完全重新定义集合。另一种以函数型式定义集合，然后离散化[14, 11]，它允许量化等级改变，而且没有困难。但是，既使集合中有次要因素变化，也要以完全新的函数来描述。

4. 改变控制增益和采样区别。Kickert和Tong研究了由此产生的效果，指出：最好的设置并不总同假设的集合和规则的语言意义相对应。

总之，从这些应用研究中可以得出几点结论：

1. 他们给出一个明显的结论，证明模糊集理论多少是有贡献的。过程的定性知识可以用具有惊人成功程度的模糊算法建立起来。

2. 模糊集合提供了语言综合形式的基础。在复杂系统中，要确定大量精确的控制用方程和信息是比较困难的。语言法是近似推理的更合理的工具。

3. 语言算法能够直接讨论，特别对过程行为有重要经验的非专业工作者能直接插上话，能用语言把经验写下来。在很多情况下，能改写成模糊语言控制。这样，过程操作者能包括在控制回路中，用语言通讯来提供输入状态信息或有效的控制作用。

4. 控制器虽然是非线性，在数字计算机上能简单实现，并且具有闭路品质，显得粗中有细，允许过程参数变化，有抑制噪音能力，特别是对自身实现中的变化不灵敏。

虽然做了大量的研究工作，也提供了大量宝贵的经验，但还有许多问题没有解决，需要今后做大量的研究工作。比如：怎样才能最好地利用事前信息？实现算法时，最好的量化等级、增益和采样区间是什么？被控系统的品质怎样测量？系统是不是稳定？是不是最优？规则中多加哪些规则能改善它的品质？或反之，哪些规则是多余的？在计算机上实现时，怎样使存贮最小而速度最大？等等问题，虽然有些问题已进行了研究，如稳定问题由Kickert和Mamdani进行了研究；计算机实现问题由Rutherford [20]进行了研究。但由于模糊控制器是高维数控制器，这些方面研究还刚刚开始。理论工作距

离使用还差得更远。

最后指出几点关于模糊控制器的下一步研究工作：

1. 研究满足给定判据的控制器设计方法；
2. 研究模糊模型问题，以便得出过程性能的某种假设条件下控制问题的一般解；
3. 研究人机系统的模糊表达式。操作人员成为控制回路中一个好的组成部分。如何评价操作人员完成最好功能和如果计算机能够完成人的这个功能的话，计算机怎样完成人的这个功能？

4. 由于模型法还有误差和模糊控制结构的不确定性，研究控制过程的‘学习’是很重要的。

值得提出，模糊控制系统的理论方法，一些研究者进行了研究(4、5、12、16、18、19)，但还没有解决上述问题。这方面工作要进一步深入研究。

五、结 束 语

模糊集理论发展已十多年了，特别是Zadeh于1973年发表了模糊控制的先行论文，1975年Mamdani应用这个理论研究了模糊控制器，并在生产过程控制中进行了实验。这是以不完全信息和模糊语言构成模糊控制器，由计算机来实现复杂的工业过程的控制。实验证明，取得了惊人的成功。不仅给模糊数学以有力的支持，找到了应用的领域，而且必将给数学和其他科学带来深刻的影响。同时，模糊数学是重要的潜在力量，为了发掘这个潜力，特别是在自动化领域的应用，尚须做非常大量的研究和实验工作。

参 考 文 献

1. Zadeh, L. A. Fuzzy Sets. Information and Control 8. 1965, 338—353.
2. Zadeh, L. A. Fuzzy algorithms. Information and Control 12. 1968, 94—102.
3. Zadeh, L. A. Outline of a new approach to the analysis of Complex Systems and decision processes, IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Vol. SMC—3, 1973, 28—44.
4. Gaines, B. R. and Kohout, L. T. The fuzzy decade, a bibliography of Fuzzy systems and Closely related topics, Int. J. Man—Machines 9, 1977, 1—68.
5. Gupta, M. M., Saridis, G. N., Gaines, B. R. ed. Fuzzy Automata and decision Processes. North—Holland, 1977.
6. Mamdani, E. H. Application of fuzzy algorithms for the control of a dynamic Plant. Proc. IEE, Vol. 121, No. 12, 1974. 1585—1588.
7. E. H. Mamdani and Assilican, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. Int. J. Man—Machine studies, Vol. 7, 1975. 1—13
8. P. J. King and E. H. Mamdani, The application of fuzzy Control systems to industrial Processes. Round Table on Fuzzy Automatic and Decision Processes. Proc. Sixth Triennial IFAC World Congress, Cambridge/Boston, MA. August 24—30, 1975. 或Automatica, 13. No. 3, 1977, 235—242.
9. Mamdani, E. H and Baaklini, N, Prescriptive method for deriving control policy in fuzzy—logic controller. Electr. letter, Vol. 11, Dec. 1975, pp625.

10. Mamdani, E. H; Advances in the linguistic synthesis of fuzzy Controllers, Int. J. Man—Machine study 8, 1976. 669—678.
11. M. J. M. Kickert, H. R. Van Nauta Lemke, Application of fuzzy Controller in a Warm Water Plant. Automatica 12. 1976, 301—308
12. R. Jain, Outline of an approach for the analysis of fuzzy systems, Int. J. Control 23, 1976, 627—640, 或见 5.
13. Tong, R. M. Analysis of fuzzy control algorithms using the relation matrix, Int. J. Man—Machine study, 8. 1976. 679—686.
14. Østergaard, J. J. Fuzzy Logic control of a Heat Exchanger Process, 见 5.
15. Rutherford, D. and G. A. Carter, A heuristic adaptive Controller for a sinter Plant. Proc. and IFAC Symp. Automation in Mining, Mineral and Metal Processing. Johannesburg, 1976.
16. Tong, R. M. Control Engineering Review of fuzzy system, Automatica 13. 1977. 559—569.
17. Pappis, C. P. and Mamdani, E. H. A Fuzzy Logic Controller for a traffic Junction, IEEE Trans. System, Man, Cybern. Vol. SMC—7, 1977.
18. Kaufmann, A. Introduction to the theory of fuzzy subsets, Vol. 1, Academic Press, New York, 1975.
19. Negoitã, C. V, and Ralescu, D. A. Applications of Fuzzy sets to systems Analysis, Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart, 1975.
20. Rutherford, D. A. and Bloore, G. C., The Implementatim of Fuzzy Algorithm for— Control Proceedings of IEEE. April, 1976. 572—573.

《学 术 交 流》

△ 德意志联邦共和国弗朗霍夫学会代表团成员西尔勃教授和布林格尔博士于1979年6月13日到中国科学院沈阳自动化研究所参观访问，作学术报告，进行技术座谈。

裂尔勃教授是卡厄斯鲁尔技术和生物信息处理研究所所长，他的专业是测量和控制技术，他报告的题目是“用小型计算机进行分散控制的基本原理”。

布林格尔博士是斯图加特生产技术和自动化所的，他报告的题目是：“基本建设投资和经济收益的关系”。

△ 南斯拉夫联邦人民共和国科学艺术院的马蒂奇、鲍日达尔博士和克西奇、彼得尔博士于1979年6月19日到中国科学院沈阳自动化研究所参观访问和进行技术座谈。

马蒂奇鲍日达尔博士是南动力投资公司自动化所所长，克西奇、彼得尔博士是该公司的顾问。

国外加速器的计算机控制

马 纪 虎

引 言

加速器是二十世纪最壮观的科学实验设备之一。为了进一步探索微观世界的秘密，各主要工业国都不惜耗费巨资，在世界各地争相兴建加速器。为这些加速器服务的控制工作者们设计了一个又一个复杂的系统，但是在他们面前总是摆着新的困难和大量待解决的问题。

杨振宁博士曾经深刻地评论过这种状况。他针对一张堆满控制仪表的泡室控制室照片说：“面对这张照片，使人们充满了一种错综复杂的感觉，一方面对于技术的进步感到钦佩，另一方面对仪器的复杂程度和体积的迅速增长的前景感到疑惑”⁽¹⁾。

十多年过去了，计算机进入控制领域，深刻地改变了控制系统的面貌。复杂的计算机，闪烁着奇异色彩的显示屏代替了笨重的旧式仪表。但是系统的复杂程度比五十年代也增加了不知多少倍。传统上由控制工程师设计、出图即可加工安装的工程，现在必须经过各种专业人员历时数年的大规模集体努力才能完成。

为了致力于迅速利用控制技术的最新成就，同时又必须使复杂性和造价保持在可以接受的水平，控制工作者们设计了各种各样的系统，提出了各种各样的技术手段，使加速器的计算机控制成为一门丰富的技术领域。

本文从世界主要加速器计算机控制系统出发，介绍和评述它们的现状和趋势。

一、美国几个加速器的控制系统

美国是最早大规模发展加速器的国家。但正因为早，所以很多控制系统与西欧最近的工作相比，显得陈旧。有些如ORIC⁽²⁾和Berkeley实验室⁽⁴³⁾将常规仪表控制系统逐渐改为计算机控制系统。有些如IUCF虽然一开始就是计算机控制的，但设计也较早，某些设计思想已不很新。

但是随着新加速器的建设和持续不断的设备更新，美国在一些前沿领域进展迅速，这些领域有分级和分布式计算机系统、微处理机的大规模使用等等。加上美国的加速器很多，研究队伍庞大，所以在世界上仍处于领先地位。

IUCF

IUCF是美国印第安那大学加速器中心的简称。它的计算机控制系统的功能有：监测及显示加速器状态、记录及显示运行历史、自动束流诊断、运行参量的予置及手动控