

“模糊控制”专题研讨会

論文集

中国仪器仪表学会过程检测控制仪表学会

1987年7月

目 录

1、	模糊控制发展的几个阶段·····	黄金丽	{1}
2、	模糊控制摘评·····	刘俊杰	(7)
3、	模糊自适应控制器·····	杨志泽 孙 波	(9)
4、	模糊控制的发展、应用及展望·····	鲍新福 王芳君 都志杰	(18)
5、	模糊控制器的本质探讨·····	殷 实 蒋慰孙	(25)
6、	关于模糊控制作用原理的探讨·····	都志杰	(32)
7、	专家模糊控制的工程应用设计·····	荣 冈 王树清 王骥程	(42)
8、	一种Fuzzy控制规则自调整算法·····	赵 炜 姜宝之	(49)
9、	模糊PI控制器·····	丁纪凯 熊 宁	(59)
10、	一种简化的模糊控制算法·····	孙熊岳	(69)
11、	微型机还原炉自适应Fuzzy控制系统及其节能·····	王学慧	(78)
12、	以微计算机为主体的气炼机控制系统·····		
	·····	罗 安 熊秋思 杨 杰 刘一江	(85)
13、	锅炉给水三冲量系统的模糊控制的探讨·····	袁 绎	(95)
14、	模糊关系系统的反馈解耦·····	徐承伟	(102)
15、	方块脉冲函数用于Fuzzy控制系统分析与设计的研究·····		
	·····	周长久 王殿方	(112)
16、	一类模糊线性动态模型的辨识·····	王家声	(120)
17、	一类基于系统Fuzzy模型的Fuzzy控制器设计与综合·····		
	·····	王殿方 周长久	(128)
18、	Fuzzy系统的分析与综合·····	高崇德	(140)

模糊控制发展的几个阶段

· 上海师范大学 黄金丽

提要 自从1965年L. A. Zadeh 提出模糊集以后, 模糊集理论应用于控制不久就应运而生。在20余年内, 模糊控制无论在理论上还是在应用上都有了很大的发展。本文将论述模糊控制发展的几个阶段: 第一阶段为简单模糊控制器(以模糊控制规则表为其特征); 第二阶段为自组织模糊控制器; 第三阶段为智能模糊控制。同时将概要介绍模糊控制在我国应用情况。

(一) 简单模糊控制器

由于许多生产过程(如化工、炼钢等)的精确数学模型难以获得, 因而不能采用经典控制论与现代控制论的方法实行过程控制。另外, 在经济学、管理科学、社会科学、环境科学、心理学、医学、生物学等领域中, 传统的定量分析方法有时将会遇到很大的困难。因为其完整精确的数学模型难以建立, 甚或很复杂。模糊控制正是致力于这些领域的探究, 从而能给出控制过程的定量描述。

模糊控制的主要工作是建立在人工经验的基础上, 操作人员往往并没有从精确的数学表达式的角度去了解受控系统, 但是他们却能凭借实践积累的经验, 察言观色采取适当的对策, 完成控制任务。

模糊控制器建立的过程步骤:

- 1、把人的经验归纳成定性表述的一组条件语句, 如表1所示;
- 2、利用模糊集理论作为工具把条件语句量化, 使控制器得以接受人的经验, 模仿人的操作策略, 这样就产生了模糊控制器。

模糊控制器的控制过程: 模糊控制通常取三个变量: 输出误差 ΔE , 误差变化或变化率 $E C$ 或 ΔE 和控制量 u 。

- 1、计算现时的误差及误差变化率;
- 2、将误差和误差变化率转化为模糊量;
- 3、依据模糊算法, 由控制规则计算出模糊控制量;
- 4、进行模糊判决(或决策)得出确切(清晰)的控制量, 加到对象上去, 这样就完成一个控制过程。

其框图如图1所示。

为了便于进行实时控制, 我们可事先对各种误差和误差变化率用计算机算好一个

控制表，将控制表存储于计算机内，每当测量到误差 ΔE ，计算出相应的 ΔE ，然后根据 ΔE 、 $\Delta \dot{E}$ ，从控制表中找出相应的控制等级 u ，就可实行实时控制了。

表 1

C \ E	E								
		NB	NM	NS	O	PS	PM	PB	
E	NB	PB						O	
	NM								
	NS			PM		O		NS	
	NO	PM						NM	
	PO			PS	O	NS			
	PS	PS		O					
	PM					NB			
	PB	O							

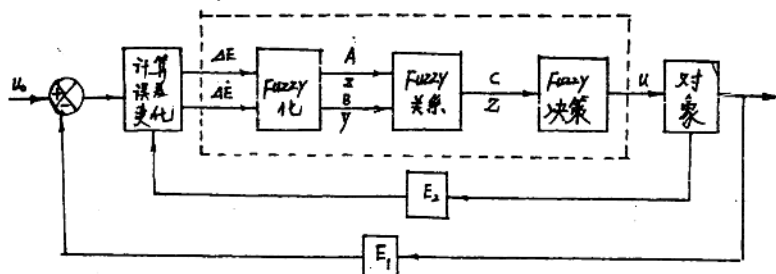


图 1 Fuzzy 控制器框图

(二) 自组织模糊控制器

我们已经简单的叙述了模糊控制器的原理，要使模糊控制器有效，关键在于条件语句的正确完整和模糊算法。但是，在一些复杂的过程中，有时人们很难精确完整的总结出经验，即控制规则很粗糙，不完善，这样势必影响控制效果。另一方面，即使控制规则较完善，但是由于过程是不断变化的，老是按照原来的控制规则进行运算，

所得的结果可能与实际过程相差甚远。因而就促使人们去研制这样的控制器，它能在运行中自动修改、完善和调整模糊控制规则，使系统的性能不断改善，直至达到预定的效果。这就是所谓自组织模糊控制器。其框图如图2所示。

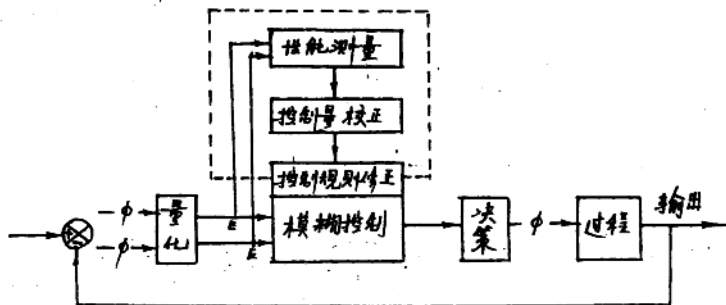


图2 自组织Fuzzy控制器

自组织模糊控制器的工作过程如下：

- 1、由于模糊控制规则较粗糙不完整，必然使输出特性达不到预想的结果，因此首先必须对系统的输出特性进行观测，得出误差（偏差）；
- 2、根据偏差大小，确定对系统输出特性要进行多大的校正量（用P表示），然后在系统的控制量上加上一个校正量，作为新的输入量r；
- 3、要改变输入量就必需落实到控制规则的修正上才能实现。

可见，自组织模糊控制过程是反复进行性能观测、修改控制规则的过程，直至得到输出特性符合要求为止。这类模糊控制器比之简单模糊控制器要优越得多，控制效果较理想。

改善模糊控制器效果的方法有许多，下面介绍几种方法供参考。

- 1、将经典控制PID和模糊控制FC结合起来：即吸取各自的优点设计控制器。在(5)(6)中，将模糊控制器分成两类：非线性比例控制器和非线性比例微分(PD)控制器。就是说模糊控制不具备常规PID或PI控制中的积分作用，因而无法使控制过程的误差减至理想程度。因此，他们将PID和FC有机地结合起来，从而构造一种新型的调节器。

将常规PID调节的数学表达式

$$Y = K E + K_I \int E dt + K_D D$$

进行模糊化得:

$$\underline{Y} = \underline{K} \underline{E} + K_1 \int \underline{E} dt + K_d \underline{D}$$

其中; $\underline{Y}$ 表示输出; $\underline{E}$ 表示误差; $\underline{D} = \frac{dE}{dt}$; $\underline{K}$ 、 K_1 、 K_d 分别表示比例、积分和微分作用的系数; 而 $\underline{E}$ 、 $\underline{D}$ 、 $\underline{Y}$ 分别是将 E 、 D 、 Y 模糊化的结果。

如此可将常规的 PID 和模糊控制能有机地结合起来, 但是在 (6) 中仅对比例因子 K 的寻优进行在线计算, 至于 K_1 、 K_d 则未纳入在线寻优最优判据为

$$Q = \int_0^{\infty} |\underline{E}| t dt$$

2、静态参数的修正规则方法

在 (3) 中, 对模糊控制器的控制规则给出一种带修正因子的量化方法。它将误差 E , 误差变化率 R 分成七档, 用 -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 分别表示负大、负中、负小, 零、正、小、正中、正大。对于控制量也同样取这七档。于是一种带修正因子的控制规则为:

$$C = \langle \alpha E + (1 - \alpha) R \rangle$$

式中 α 是介于 0, 1 之间的实数。 $\langle a \rangle$ 表示一个与 a 同号而其绝对值大于或等于 $|a|$ 的最小整数。

事实上这种带修正因子的方法, 实质就是对误差和误差变化率的赋权, 这反映了人进行控制活动时的思维特点。

3、动态参数的修正控制规则方法

在 (8) 中是将 (3) 中的方法扩展为动态参数的形式,

$$\alpha(t) = \begin{cases} \alpha(t-1) + \beta(t) & \text{当 } \alpha(t-1) + \beta(t) \in (0, 1) \\ \alpha(t-1) & \text{否则} \end{cases}$$

其中 $\alpha(t)$ 表示在 t 时刻的 α 值, $\alpha(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻的 α 值, $\beta(t)$ 则由下式给出:

$$\left[\begin{array}{ll} 0.1, & \text{当 } \underline{e}(t-1) = \underline{e}(t) \neq 0, \dot{\underline{e}}(t) = 0 \\ 0.1, & \text{当 } \underline{e}(t-1) = \underline{e}(t), |\underline{e}(t)| > 1, \text{且 } |\dot{\underline{e}}(t)| < 1; \\ -0.1, & \text{当 } \underline{e}(t-1) \neq \underline{e}(t) = 0, \text{且 } |\dot{\underline{e}}(t)| > 1; \end{array} \right.$$

$$\beta(t) = \begin{cases} -0.1, & \text{当 } \underline{e}(t) > \underline{e}(t-1) > 0_e, |\underline{e}(t)| > 1_e \text{ 或 } |\dot{\underline{e}}(t)| > 1_{\dot{e}}, \\ -0.1, & \text{当 } \underline{e}(t) \text{ 与 } \underline{e}(t-1) \text{ 异号, } |\underline{e}(t)| > 1 \text{ 或 } |\dot{\underline{e}}(t)| > 1_{\dot{e}}, \\ -0.1, & \text{当 } \underline{e}(t) < \underline{e}(t-1) < 0_c, |\underline{e}(t)| > 1_e \text{ 或 } |\dot{\underline{e}}(t)| > 1_{\dot{e}}, \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

令 $\beta(0) = 0$, $\alpha(0) = \alpha_0$ ($\alpha_0 \in (0, 1)$) 为任意指定值。

这种自调整的模糊控制器效果较好。

4、多个修正因子的修正控制规则方法

在(7)中, 引入多个修正因子对控制规则进行调整, 从而使控制规则的调整更加灵活方便。首先引入两个修正因子 α_1, α_2 。它是对误差的不同等级而采用不同修正因子。

$$u = \begin{cases} \langle \alpha_1 E + (1 - \alpha_1) EC \rangle & \text{当 } E = \pm 1, 0; \\ \langle \alpha_2 E + (1 - \alpha_2) EC \rangle & \text{当 } E = \pm 2, \pm 3; \end{cases}$$

式中 E 为误差, EC 为误差变化, u 为控制量。

尽管有两个修正因子, 但 α_1, α_2 的可调范围比较狭窄, 不能完全满足控制系统在不同的状态下对修正因子的不同要求, 因此引入多个修正因子, 即在每个误差等级均引入相应的修正因子,

$$u = \begin{cases} \langle \alpha_0 E + (1 - \alpha_0) EC \rangle & \text{当 } E = 0; \\ \langle \alpha_1 E + (1 - \alpha_1) EC \rangle & \text{当 } E = \pm 1; \\ \langle \alpha_2 E + (1 - \alpha_2) EC \rangle & \text{当 } E = \pm 2; \\ \langle \alpha_3 E + (1 - \alpha_3) EC \rangle & \text{当 } E = \pm 3. \end{cases}$$

其中 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \in (0, 1)$, 这种带多个修正因子的控制规则比之带两个修正因子的规则修正更灵活、优越。

总之, 自组织的模糊控制方式有许多, 目的只有一个, 就是提高控制器的效果。

(三) 智能模糊控制

在工业自动化领域中, 过程自动化(如钢铁冶金、化工)的进展较缓慢。其原因在于连续生产过程中, 运动形式取较高级的形态。由于内部作用的非均匀、迭加、交互和耦合作用较强烈, 同时, 大生产过程随机干扰大, 过程机理的错综复杂等原因,

致使过程控制在线应用的数学模型难以准确完整的获得,因而就难以实现自动控制了。尽管我们在前面介绍了自组织模糊控制器,它能较好地解决一些问题,但是它毕竟是有限的,因为在自组织模糊控制中,还是依照人的意志,事先作了适当的划分,在容许范围内进行调整修正而已。为了能使复杂工业生产过程能进行自动控制,就必须不断了解掌握过程的机理、同时结合操作经验,利用模糊语义及模糊条件语句构成原始的人工智能中的专家系统。然后通过产生式学习系统,对照实际生产过程不断修改完善扩充,从而构造机理、操作经验型的专家系统,利用产生式学习系统软件来决定处理问题的过程,并对原有知识进行反馈修正。如此不断进行,这就是所谓智能控制系统。参见〔10〕、〔11〕。

智能控制是方兴未艾的研究领域,它的研究发展应用将开拓控制理论新阶段。到目前为止,我国学者在这个领域中的研究和应用尚不多。因此,智能控制是今后研究的方向课题,它将会使控制领域引起巨大反响。

参考文献

- 〔1〕 E.H. Mamdani, IEE Proc. 121 No. 12 1585-1588 (1974)
- 〔2〕 张仁生等:“Fuzzy 控制器和Fuzzy系统”,《模糊数学》,1981,1.
- 〔3〕 龙升照、汪培庄:“Fuzzy 控制规则的自调整问题”,《模糊数学》,1982·3.
- 〔4〕 黄金丽:“自组织Fuzzy 控制器”,《模糊数学》,1983·2.
- 〔5〕 涂象初:“Fuzzy 控制器在定值调节中的新应用途径”,《模糊数学》,1984·2.
- 〔6〕 涂象初、汪培庄:“自寻优 Fuzzy PID 调节器与人工智能控制”,《模糊数学》,1985·3.
- 〔7〕 李东辉:“Fuzzy 控制规则自调整和Fuzzy控制系统寻优及其仿真研究”,《模糊数学》,1986·3.
- 〔8〕 韩学功等:“Fuzzy 控制器的自调整模型”,武汉建材学院学报,1985·2.
- 〔9〕 T.J. Procyk and E.H. Mamdani, "A Linguistic Self Organizing Process Controller", Automatica Vol. 15, No. 1. P.15-30(1979).
- 〔10〕 赵红、李太航、沈祖梁:“多元模糊权图——元素网络图理论与系统模型辨识”,《自动化学报》,Vol.9. No.3. 1983.7.
- 〔11〕 李太航等:“Fuzzy 语义推理的自学习算法”,《自动化学报》,Vol.10, No.4, 1984.10.
- 〔12〕 吴望名、陈永义、黄金丽等《应用模糊集方法》,北京师范大学出版社,1986·5.

模 糊 控 制 摘 评

上海师范大学 刘俊杰

自从 Zadeh 提出模糊集的概念并引进了分析复杂系统的一种新思想方法〔1〕(2)以来,模糊控制的研究在理论方面和应用方面有了不少的进展。现略摘一二。

Andrzej ŚWIERNIAK〔3〕用不动点原理讨论了模糊控制器的设计问题。经典数学中的压缩映照原理指出:“在完备的度量空间中的压缩映照有唯一的不动点”。他把这个结论类推到模糊情形,规定了压缩映照的含意,指出,在一定的数学假设之下,一定存在着这样的模糊控制器,它使系统稳定。但讨论未牵扯到系统的性能,如快速、小超调量等。

涂象初、汪培庄〔4〕使模糊控制与常规PID调节相互渗透、结合,并考虑了在线自动寻找最优参数问题,在模拟试验中效果良好。

邓聚龙〔5〕提出了最小信息量的最优模糊控制的概念及其最优解,提出了求最优模糊控制序列的计算方法。通过计算说明了有这样的系统,它们按常规控制是不稳定的,但采用模糊控制可以得到预期的响应。

人们对自组织模糊控制器进行了研究,例如 T.J. Procky 和 E.H. Mamdani〔6〕将系统的输出特性和理想特性相比较,利用偏差及偏差变化的大小来修正控制规则。将这种方法用于高阶的系统、非线性系统及其他系统的模拟试验,效果良好。

J.-J. Østergaard〔7〕将模糊控制用于一个两输入两输出的热交换过程,结果发现控制器的特性像PI控制器一样好。他认为模糊逻辑用于实际过程还处在早期研究阶段,进一步的研究应受到鼓励。

M. Sugeno 和 Nishida〔8〕研究了模型汽车的模糊控制。他们由专门驾驶人员的操作中引出控制规则,将之用于带有传感元件和微机的模型汽车的驾驶试验。结果汽车可以在一定环境条件下采取适当驾驶措施。

Dimitar LAKOV〔9〕研究了模糊控制下的自适应机器人。

模糊控制的应用还向各种不同的学科伸展。例如安宝生〔10〕认为用分立的特殊值代替连续的隶属函数会导致信息的丢失。而用图解方法可以解决这一问题。他把这个方法用于讨论教学过程的控制问题。又如韦泽平〔11〕将模糊控制用于三化螟幼虫显害量的预测,获得了良好的效果。

就目前的情况来说,似可归结以下一些想法。

1、模糊控制的理论研究还期待着坚定的、有系统的、奠基性的内容。它应当有自己丰实的理论基础。

2、在已有的一些讨论中,有一些数学形式的条件和结论,其实际背景和含意如何,是有待于进一步展开的。

3、经过模拟试验的结果,有待落实于真实的过程。

4、希望模糊控制是出自实际问题的迫切需要，希望有它不可取代的优越性。能够清晰的，完全能用其它方法解决的，就不一定要模糊化处理。

5、模糊数学处理中的一些运算，例如取大、取小、最大隶属度原则等等，有信息损失问题，应当设法修正或补偿。

6、传统方法与模糊方法的相互结合以及相互渗透，是一个重要的考虑方向。

参考文献

- [1] L.A.Zadeh, "Fuzzy Sets", Information and Control, 8, 338-353, 1965.
- [2] L.A.Zadeh, "Outline of a new approach to The analysis of Complex Systems and decision processes", IEEE, Trans. Syst. Man Cybern., 2, 28-44, 1973.
- [3] Andrzej ŚWIERNIAK, "Fuzzy Controllers Design via Fixed Point Theorem", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 20, No. 2, 131-136, 1986.
- [4] 涂象初、汪培庄: "自寻优 Fuzzy PID 调节器与人工智能控制", 《模糊数学》, 1985.9.
- [5] 邓聚龙: "最小信息量的最优 Fuzzy 控制", 《模糊数学》, 1983.4.
- [6] T.J.Procky and E.H.Mamdani, "A Linguistic Self Organizing Process Controller", Automatica, Vol. 15, No. 1, 15-30, 1979.
- [7] J.-J. Stargaard, "Fuzzy Logic Control of a Heat Exchanger Process", Fuzzy Automata and Decision Processes, Edited by M.M.Gupta, 285-320, 1977.
- [8] M.Sugeno and Nishida, "Fuzzy Control of Model Car", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 16, No. 2, 103-113, 1985.
- [9] Dimitar LAKOV, "Adaptive Robot under Fuzzy Control", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 17, 1-8, 1985.
- [10] 安宝生: "模糊控制的图解方法及其在控制论教育学中的应用", 《系统工程理论与实践》, 1986 年第 6 卷第 3 期.
- [11] 韦泽平: "Fuzzy 控制在三化螟幼虫显著量预测上的应用", 《模糊数学》1986 年 2 月.

模糊自适应控制器

天津大学自动化系 杨志泽 孙波

(一) 引言

1965年美国学者L. Zadeh提出模糊集合理论(1),从此模糊数学理论及其应用研究发展极为迅速。特别是1974年E. H. Mamdani和S. Assilian首先将模糊数学理论应用到动态过程的控制中(2)(3),并且取得了成功。本文将叙述简单模糊控制器及几种模糊自适应控制器的工作原理,并对今后的发展提出一点看法。

(二) 简单模糊控制器的工作原理

模糊控制是以人在动态过程控制中的思维方式为基础,将过程操作人员的操作经验概括抽象成为一条不精确的条件语句,如:如果温度升高较大则燃油减小较大。每一条条件语句构成一条控制规则,整个简单模糊控制器是由一组控制规则组成的。图1为简单模糊控制系统的框图。控制器的输入变量为过程的偏差 E 和偏差的变化量 C 输出为过程控制量 U 。控制规则写成IF E is E_K AND C is C_K THEN U is U_K 。 E_K, C_K, U_K 为定义在论域 E, C, U 上的模糊子集。将条件语句用模糊关系表示则有

$$R_K = E_K \times C_K \times U_K \quad K=1, 2, \dots, N$$

即
$$\mu_{R_K}(e, c, u) = \mu_{E_K}(e) \wedge \mu_{C_K}(c) \wedge \mu_{U_K}(u)$$

控制器的总关系 R 为 R_K 的并

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_N = \bigcup_K R_K$$

因此利用推理合成规则就可由输入模糊变量 E 和 C 计算出控制器的输出模糊变量

$$U = (E \times C) \circ R$$

$$\mu_U(u) = \bigvee_{\substack{e \in E \\ c \in C}} \mu_R(e, c, u) \wedge \mu_E(e) \wedge \mu_C(c)$$

将上述模糊控制器的工作原理应用到实际中还必须解决以下两个问题

- 1、输入的精确量 E, C 由精确值转化模糊变量的模糊化过程。
- 2、控制器输出的模糊变量 U 决策为精确量的过程。

在实践控制中为了简化控制运算,人们往往根据上述算法事先计算出对应误差及

误差变化量的控制量，将这些量写成矩阵形式组成查询表（如表1所示），在控制中只要查表即可。

表1 查询表

$\begin{matrix} u \\ e \end{matrix} \backslash EC$	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-3	-3	-3	-2	-2	2	-1
-2	-3	-2	-2	-2	-1	-1	-1
-1	-2	-2	-1	-1	0	1	1
0	-2	-1	-1	0	1	1	2
1	-1	-1	0	1	1	2	2
2	1	1	1	2	2	2	3
3	1	2	2	2	3	3	3

简单模糊控制器的原理已经由国内外的许多学者通过仿真及实际应用证明，它在工业过程控制中是可行的。

由于简单模糊控制器中的控制规则是根据操作人员的操作经验总结成的一条一条不精确的条件语句得到的，因此它可以对那些不知道过程精确数学模型或数学模型十分复杂的过程进行控制，它无需大量的精确数据，只要操作人员用语言描述的控制策略即可实现控制，所以模糊控制技术的出现为控制领域开辟了一条新的途径。但是人们对动态过程了解的不完全性、控制策略语言表达的不精确性，以及被控过程的复杂性和模糊控制理论自身的不完备性使简单模糊控制器的品质不十分令人满意，而且通用性较差，克服以上不足的方法就是建立具有自适应能力的控制器。

(三) 自适应模糊控制

简单模糊控制的核心为控制规则，因此自适应模糊控制的特点就在于对控制规则的处理上。下面分别叙述几种不同类型的自适应方案。

1977年T.J.Procyk和Mamdani首先提出了自组织模糊控制器的概念，即自适应模糊控制器。并对有关的问题进行了较详细的研究，使模糊控制理论有了进一步的发展。

图2为自适应模糊控制系统的框图。与图1比较增加了性能测量、校正测定及控制规则修改三部份。它的指导思想就是使用两组控制规则，一组的作用与简单模糊控制器的相同，进行过程控制，而另一组的作用是根据过程的输出特性要求对控制器的规则进行修改。具体的做法是：由于过程偏差和偏差变化量确定出对输出所要进行的修正量 $P(nT)$ ，这一过程由性能测量决策表进行（决策表见表2）

$$P(nT) = \pi(e(nT), c(nT))$$

其中 π 表示性能决策表，它与查询表一样代表了一组控制规则。 $e(nT)$ 、 $c(nT)$ 分别为 nT 时刻的偏差和偏差变化量。

将输出校正量 $P(nT)$ 转化为输入校正量 $r(nT)$ 的校正测量过程是根据下述原

以两输入两输出过程为例，其状态方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{U}, \mathbf{V})$$

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{G}(\mathbf{y}, \mathbf{U}, \mathbf{V})$$

对于输入的较小变化 $(\delta \mathbf{U}, \delta \mathbf{V})^T$ ，输出的变化为

$$\begin{pmatrix} \delta \dot{\mathbf{x}} \\ \delta \dot{\mathbf{y}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}} & \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{U}} & \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{V}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta \mathbf{U} \\ \delta \mathbf{V} \end{pmatrix}$$

在一个采样周期内的变化为

$$\begin{pmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T \delta \dot{\mathbf{x}} \\ T \delta \dot{\mathbf{y}} \end{pmatrix} = T \mathbf{J} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{U} \\ \Delta \mathbf{V} \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{U} \\ \Delta \mathbf{V} \end{pmatrix}$$

$\mathbf{J}$ 为雅克比矩阵，因此由 $\mathbf{P}(nT)$ 可计算出输入校正量

$$\mathbf{r}(nT) = \begin{pmatrix} r_1(nT) \\ r_2(nT) \end{pmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{pmatrix} p_1(nT) \\ p_2(nT) \end{pmatrix}$$

最后根据输入校正量 $\mathbf{r}(nT)$ 修改控制器的规则。

表2 性能测量决策表

		偏差变化量													
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	
偏	-6	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	6	6	
	-5	0	0	0	2	2	3	6	6	6	6	6	6	6	
	-4	0	0	0	2	4	5	6	6	6	6	6	6	6	
	-3	0	0	0	2	2	3	4	4	4	4	5	5	6	
	-2	0	0	0	0	0	0	2	2	2	3	4	5	6	
	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	3	4	5	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-3	-4	
	1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-2	-3	-3	-4	
	2	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-6	
差	3	0	0	0	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-4	-4	-5	
	4	0	0	0	-2	-4	-4	-6	-5	-6	-5	-6	-5	-6	
	5	0	0	0	-2	-2	-2	-6	-5	-5	-5	-5	-5	-5	
	6	0	0	0	0	0	0	-6	-5	-6	-5	-6	-5	-6	

假设过去第 m 个采样的控制量使现在的性能不符合要求 (m 与过程的滞后有关)。当时的控制量为 $u(nT-mT)$ 而要求的为 $u(nT-mT)+r(nT)$ 而不是 $u(nT-mT)$ 。将其构成模糊集可得：

$$\begin{aligned}
E(nT-mT) &= F\{e(nT-mT)\}, \quad e(nT-mT), \quad c(nT-mT) \text{ 分别为偏差和偏} \\
C(nT-mT) &= F\{c(nT-mT)\} \quad \text{差变化量} \\
U(nT-mT) &= F\{u(nT-mT)\} \\
V(nT-mT) &= F\{u(nT-mT)+r(nT)\}
\end{aligned}$$

其中 F 表示对单个元素模糊化的过程。

对于控制规则的修改工作就是用蕴含式

$$E(nT-mT) \rightarrow C(nT-mT) \rightarrow V(nT-mT)$$

代替

$$E(nT-mT) \rightarrow C(nT-mT) \rightarrow U(nT-mT)$$

用关系矩阵表示修改后的控制规则应为

$$R(nT+mT) = \{ R(nT) \text{ 而不是 } R_1'(nT) \mid \text{否则 } R_2''(nT) \}$$

其中 $R_2''(nT)$ 、 $R_1'(nT)$ 分别表示前述两个蕴含式。

上述方法是以关系矩阵理论为基础，它能够在控制过程中不断修改由实验得到的较粗糙的控制规则使系统特性不断完善。但是这种方法仍存在一定问题，首先矩阵 M^{-1} 的计算是一个难题，尤其是多输入，多输出变量情况。其次性能测量决策表只能粗略地表征出系统的性能，不能全面地考查系统的特性。

在 T. J. Procyk 和 E. H. Mamdani 之后，又有许多学者对自适应控制方法进行了研究，其中一部份人提出了用模糊系统辨识的方法进行自适应模糊控制。1981 年 E. Czogala 和 W. Pedrycz 提出了用模糊方程即模糊关系矩阵描述系统的特性并提出了辨识关系矩阵的方法。〔6〕〔7〕〔9〕

一个系统可用下述模糊关系方程描述：

$$X_{K+1} = X_K \circ R$$

其中 X_{K+1} 、 $X_K \in F(X)$ 是系统的模糊状态变量， $R \in F(X, X)$ 表示系统中存在的相对关系。写成从属函数的形式

$$\mu_{X_{K+1}}(x) = \bigvee_{y \in x} [\mu_{X_K}(y) \wedge \mu_R(y, x)]$$

其中 $\mu_{X_{K+1}}(x)$ 、 $\mu_{X_K}(x)$ 、 $\mu_R(y, x)$ 分别表示模糊变量 x_{K+1} 、 x_K 和模糊关系 R 的从属函数。在介绍辨识方法前先介绍两个定义

定义 1、对于 $A \in F(X)$ 则有下述运算成立

$$\mu_A(x) \alpha \mu_A(y) = \begin{cases} 1 & \mu_A(x) \leq \mu_A(y) \\ \mu_A(y) & \mu_A(x) > \mu_A(y) \end{cases}$$

定义 2、如果 $A \in F(X)$ 则 $A \otimes A$ 形成一个模糊关系

其从属函数为

$$\begin{aligned}
\mu_A(x) \otimes \mu_A(y) &= \begin{cases} \min(\mu_A(x), \mu_A(y)) & \begin{matrix} \mu_A(x) = \text{SVP} \mu_A(Z) \\ Z \in A \end{matrix} \\ 0 & \begin{matrix} \mu_A(y) = \text{SUP} \mu_A(Z) \\ Z \in X \end{matrix} \\ & \text{其它} \end{cases}
\end{aligned}$$

下面给出辨识模糊方程的两个定理

定理1、如果 $x \in F(x)$, $y \in F(x)$ 满足模糊方程

$$y = x \circ R \quad R \in F(X \times X)$$

则使方程 $y = x \circ \hat{R}$ 成立的最大模糊关系矩阵为: $\hat{R} = x \circ y$

从属函数: $\mu_{\hat{R}}(x, y) = \mu_x(x) \wedge \mu_y(y)$

定理2、如果 $x \in F(x)$, $y \in F(x)$ 满足模糊方程

$$y = x \circ R \quad R \in F(X \times X)$$

则使方程 $y = x \circ \tilde{R}$ 成立的最小模糊关系矩阵为 $\tilde{R} = x \circ y$

从属函数 $\mu_{\tilde{R}}(x, y) = \mu_x(x) \vee \mu_y(y)$

上述两条定理指示最大, 最小模糊矩阵与系统的模糊矩阵有下述关系:

$$\hat{R} \geq R \quad \tilde{R} \leq R$$

这样由一对对输入输出数据就可以计算出对应的模糊关系矩阵 $\hat{R}_1$ (或 $\tilde{R}_1$), 则系统的关系矩阵可近似为

$$\tilde{R} = \bigcup_{i=1}^K \tilde{R}_i \quad (\text{或 } \hat{R} = \bigcap_{i=1}^K \hat{R}_i)$$

由仿真实验证明上述辨识方法得到的矩阵 $\tilde{R}$ (或 $\hat{R}$) 是收敛于 R 的。将 $\tilde{R}$ (或 $\hat{R}$) 应用到简单模糊控制器的算法中即可实现对过程的控制。使用这种方法只要有足够的数
据就可以得到精度很高的关系矩阵, 但是辨识过程中人们无法人为地控制收敛速度, 这是一个不足之处, 有待进一步的研究。

1985年 T. Takagi 和 M. Sugeno 提出用系统的控制规则即模糊条件语句直接作为系统的数学模型, 从另一个角度说明了系统模糊辨识的可能途径(8)。

系统的数学模型由下述模糊条件语句组成 IF $f(x_1 \text{ is } A_1, \dots, x_K \text{ is } A_K)$ THEN $y = g(x_1, \dots, x_K)$ 其中 $x_1, \dots, x_K, y$ 为控制器的输入输出变量。

$A_1, \dots, A_K$ 为对应输入变量论域上的模糊集, 为了充分利用数字运算的精确性, 从属函数定义为线性函数, 这样只要知道两点的从属函数就可确定整个模糊集的从属函数。

f 表示前题中各模糊语句的逻辑运算。

g 表示如果 $x_1, \dots, x_K$ 满足前题条件则 y 的函数关系, 这里定义 y 为 $x_1, \dots, x_K$ 的线性组合。

利用上述模型推理计算控制器输出量的过程为: 设模型由条件语句 $R_1 (i=1, \dots, n)$ 组成, 控制器的输入变量为 $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_K^0)$ 这样由 R_1 可计算得

$$\begin{aligned} y_1 &= g_1(x_1^0, \dots, x_K^0) \\ &= p_1^0 + p_1^1 x_1^0 + \dots + p_K^1 x_K^0 \end{aligned}$$

以 $y = y_1$ 的真值做为权重系数加权处理得到最后的输出为

$$y = \frac{\sum |y=y_1| xy_1}{\sum |y=y_1|}$$

其中 $|y=y_1|$ 表示 $y=y_1$ 的真值

$$\begin{aligned} |y=y_1| &= |x_1^0 \text{ is } A_1^1 \text{ and } \dots \text{ and } x_K^0 \text{ is } A_K^1| \wedge |R^1| \\ &= (A_1^1(x_1^0) \wedge \dots \wedge A_K^1(x_K^0)) \wedge |R^1| \end{aligned}$$

$|R^1|$ 为条件语句 R_1 的真值，一般取为 1。

由上述推理过程可知，模糊条件语句模型是用线性元近似逼近系统的输入输出之间的关系，因此此方法可以用于非线性系统的控制中。

辨识模型的主要工作就是确定变量 $x_1, \dots, x_K$ 对应的模糊子集 $A_1^1, \dots, A_K^1$ 及其从属函数；确定每条 IF THEN 语句中的系数 $p_0^1, p_1^1, \dots, p_K^1$ ($i=1, 2, \dots$)。

前文将 g 函数取为线性函数，因此当 $x_1 \dots x_K$ 及 $A_1^1 \dots A_K^1$ 确定后，对于每一给定的一组输入输出数据 $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Kj}$ 及 y_j ($j=1, 2, \dots$) 利用最小二乘法即可得到系数 $p_0^1, p_1^1, \dots, p_K^1$ ($i=1, \dots, n$)。数学形式为

$$P = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

其中

$$X = \begin{bmatrix} \beta_{11} \dots \beta_{n1}, x_{11} \cdot \beta_{11} \dots x_{11} \cdot \beta_{n1} \dots x_{K1} \cdot \beta_{11} \dots x_{K1} \cdot \beta_{n1} \\ \vdots \\ \beta_{1m} \dots \beta_{nm}, x_{1m} \cdot \beta_{1m} \dots x_{1m} \cdot \beta_{nm} \dots x_{Km} \cdot \beta_{1m} \dots x_{Km} \cdot \beta_{nm} \end{bmatrix}$$

$$\beta_{ij} = \frac{A_1^1(x_{1j}) \wedge \dots \wedge A_K^1(x_{Kj})}{\sum_j A_1^1(x_{1j}) \wedge \dots \wedge A_K^1(x_{Kj})}$$

$$Y = (y_1 \dots y_m)^T$$

$$P = (p_0^1 \dots p_0^n, p_1^1 \dots p_1^n, \dots, p_K^1 \dots p_K^n)^T$$

由于模糊集合 A_1^j 的从属函数为线性函数，所以只要确定从属度为 1 和 0 的点即可。这一工作可以简化成一个非线性规划问题，即选择 A_1^j 的参数及函数 g 中的参数使性能指标最小化，这里我们使用的是众所周知的复合方法。

比较困难的工作是输入变量 $x_1 \dots x_K$ 的确定，即将每个变量对应的论域划分成若干个模糊子集，理论上还没有解决方法，这里使用的是启发式搜索方法。具体做法是：

如果系统为一个 K 输入单输出的系统，输入变量为 $x_1, x_2, \dots, x_K$ 则首先选择 x_1 作为条件语句前题中的变量，将其划分为 small 和 big 两个模糊子集，其它变量不出现，利用前述方法计算出一个模型得到一个性能指标。依次进行在 x_1 中选取性能指标最低的变量作为稳定状态。然后根据前一步的稳定状态 x_1 对变量组 $x_1 -$

$X_j (j=1, \dots, K)$ 继续划分。如果 $i \neq j$ 则 X_i, X_j 分别被划分成 big, small 两个子集; 如果 $i = j$, 则 X_i 被分成四个子集。计算系统模型和性能指标, 同样得到一个稳定状态 $X_1 - X_j$ 。最后按图 3 所示的搜索方式不断重复前面的过程, 直到性能指标满足要求或控制规则数目超过一定值。

上述方法建立系统的模型需要大量的精确数据, 而且这一算法比较复杂只能在大型计算机上实现或离线实现。从自适应模糊控制的仿真实验及实际应用中可以体会到, 控制器的控制规则没必要时时修正, 只有在系统启动时或系统参数发生变化时才有必要进行修正, 因此可以将控制器的自适应部份和控制部份分开进行。另外, 自适应控制算法都比较复杂, 一般使用微型机不能满足要求, 所以在模糊控制的实际应用中, 可以考虑采用分级计算机网络控制方案。在过程控制这一较低层次可用微型机实现控制部份, 在软件中增加一个特性判别模块, 监视控制品质, 一旦性能不满足要求时向上一级计算机提出申请要求进行控制规则的修正。上一级计算机是中型或大型机由它实现自适应部份完成控制规则的修正, 同时在没有自适应要求时, 这台计算机还可以对整个生产过程进行科学管理, 完成其它的一些工作, 如过程监视、数据显示及输出打印、人——机对话联系等。这台计算机还可以与多台微型机联接形成计算机网络(如图 4 所示)。

(四) 小 结

自适应模糊控制是模糊控制发展的必然趋势, 但吸引了大多国内外学者 [10] [11] [12] [13], 随着模糊控制理论的进一步发展, 自适应模糊控制必将成为控制领域中一支新军。

参考文献

- [1] L.A.Zadeh, "Fuzzy Sets", Inf.Control 8, 338-353, (1965).
- [2] E.H.Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithms for control of Simple Dynamic plant", proc.IEE 212, 1585-1588, (1974).
- [3] S.Assilian and E.H.Mamdani, "A Fuzzy Logic Controller for a Dynamic plant", Int.J.Man Machine Stud.T, 1-13, (1975).
- [4] T.J.Procyk, "A Self-organising Controller for Dynamic Process" Ph.D.theseis.Queen Mary College, London, (1977).
- [5] T.J.Procyk and E.H.Mamdani, "A Linguistic Self-organizing Process Controller", Automatica 15, 15-30, (1979).
- [6] E.Czogala and W.Pedrycz, "On Identification in Fuzzy Systems and its Applications in Control Problems", Fuzzy set and Systems, 6, 73-83, (1981).
- [7] W.Pedrycz, "An Approach to the Analysis of Fuzzy Systems", Int. J.Control.V34, 403-421 (1981).