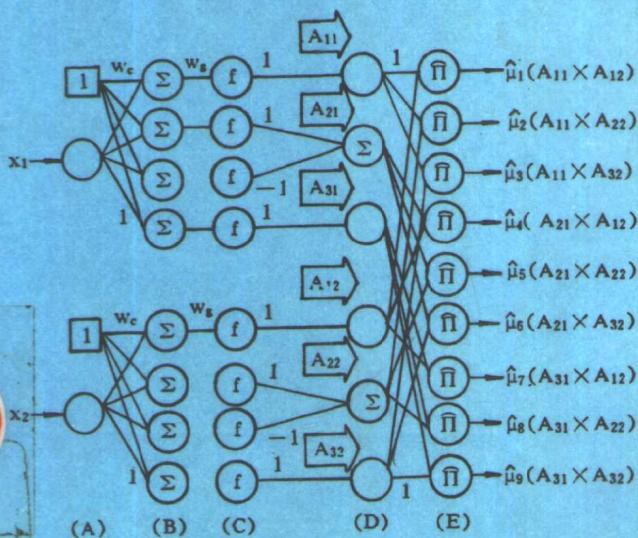


复杂系统的模糊辨识与 模糊自适应控制

张化光 著



NEUPRESS
东北大学出版社

复杂系统的模糊辨识与 模糊自适应控制

(国家博士后科学基金
和国家自然科学基金资助课题)

张化光 著

东北大学出版社

(辽)新登字第8号

图书在版编目(CIP)数据

复杂系统的模糊辨识与模糊自适应控制/张化光 著,

沈阳:东北大学出版社,1993.12

ISBN 7-81006-739-5

I. 复...

I. 张...

II. 模糊—自适应—辨识—控制

N. TP·40

责任编辑:李毓兴 责任出版:扬华宁

封页设计:唐敏智 责任校对:米 荣

©东北大学出版社出版

(沈阳·南湖 110006)

大连海运学院印刷厂印刷

东北大学出版社发行

1993年12月第1版

1993年12月 第1次印刷

开本:850×1168 1/32

印张:7

字数:192千字

印数1—1000册

定价:7.50元

前 言

1965年,美国控制论专家 L. A. Zadeh 创立了模糊集合论,为描述、研究和处理模糊性现象提供了新的数学工具。1974年,英国的 E. H. Mamdani 把模糊语言逻辑用于控制并获成功,标志着模糊控制的诞生。

众所周知,经典控制论解决线性定常系统的控制问题是很有有效的。现代控制论在军事科学、空间飞行等方面得到了成功的运用。但是,在工业生产中,却有相当数量的复杂过程难以实现自动控制,如那些大滞后、非线性等复杂工业对象,以及那些难以获得数学模型或模型非常粗糙的工业系统等等。它们仍然以人工操作和人工控制为主。近年来的实践表明,上述难以实现自动控制的复杂生产过程,如果采用模糊控制理论与计算机来实现自动控制,往往效果较好;若能采用基于过程状态模式识别的自校正(或自组织)控制策略或者采用基于模糊模型辨识的自校正控制方法,往往效果更佳。

复杂系统的模糊辨识和模糊自适应控制技术,是近十年来发展起来的一门新型交叉学科,受到国内外过程控制工作者的广泛重视。为了满足广大科技工作者们迫切需要学习和掌握该方面理论和方法的需要,著者草成此书,以期抛砖引玉。

本书共计八章,第一至三章介绍几种模糊控制中常见的模糊模型及其辨识方法;第四、五章介绍两种单变量模糊自校正控制方法;第六、七章介绍两种多变量的模糊自校正控制方法,第八章给出一种能同时考虑两种不确定性的新型模糊推理方法,以及相应的控制方法。本书由东北大学柴天佑教授主审。柴教授对全书的各章节进行了认真的评阅和指点,在此表示感谢。东南大学

ABD 66/02

陈来九教授和东北大学王殿辉博士对本书的许多章节，提出了许多意见和建议，在此谨向他们致谢。

由于作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指教。

作者

1993年10月于东北大学



作者简介

张化光，1959年5月生，1982年1月毕业于东北电力学院生产过程自动化专业，1985年末在该院发电厂工程专业获硕士学位，1991年末在东南大学电厂热动力及其自动化专业获博士学位，1991年末至1993年末，在东北大学自动控制博士后流动站从事博士后研究工作，现任东北大学自控系副教授。

近年来，主要从事模糊系统理论、模糊控制与智能控制理论、自适应控制理论的研究工作，先后指导(或协助指导)该领域的硕士和博士研究生多名。在《中国科学》、《Cybernetics and Systems》、《自动化学报》、《中国电机工程学报》、《控制理论与应用》等国内外权威杂志和重要会议上发表论文五十余篇。

近两年来承接了“国家博士后科学基金”“国家自然科学基金”、“清河电厂1—4号机组计算机集散控制系统”等五项重大科研项目，其中三项已经完成，一项获得了能源部科技进步二等奖。

内 容 简 介

本书系统地介绍了近几年来发展起来的模糊系统辨识技术及其模糊自适应控制方法,并给出了大量的应用实例。全书共8章,内容包括:T-S模型的模糊辨识方法;关系模型的模糊辨识方法;采用神经网络技术的模糊辨识方法;参数自校正模糊控制方法;结构自校正模糊控制方法;多变量模糊自校正控制方法;基于手动控制数据的自适应控制方法;考虑两种不确定性的模糊推理方法与控制方法。

本书综合国内外大量文献以及作者近年来的研究成果,内容深入浅出,便于自学与应用。本书可作为高等工科院校自动控制、信息管理、计算机应用等专业研究生或高年级本科生教材,亦可供有关专业科研人员参考。

目 录

前 言 绪 论

- 0.1 模糊控制与智能控制 1
- 0.2 经典模糊控制的历史回顾 2
- 0.3 多变量模糊控制理论的研究现状 7

第一章 T-S 模型的模糊辨识方法

- 1.1 引言 11
- 1.2 模糊模型的构成 12
- 1.3 模糊辨识方法 16
 - 1.3.1 结论参数的辨识 16
 - 1.3.2 前提参数的辨识 19
 - 1.3.3 前提结构的辨识 21
- 1.4 辨识精度的考核 35
- 1.5 提高模糊辨识速度的一种方法 38
 - 1.5.1 第二种形式的模糊模型 40
 - 1.5.2 前提参数辨识的快速算法 41
 - 1.5.3 结论结构和结论参数的辨识 49

第二章 关系模型的模糊辨识方法

- 2.1 模糊关系模型的描述 61
- 2.2 模糊关系模型的建立方法 63
- 2.3 模糊关系模型辨识的进一步改进 66
- 2.4 多变量模糊关系模型的动态辨识 70

2.4.1	问题的提出	70
2.4.2	参考模糊集合的确定	73
2.4.3	辨识算法 AI——确定 R	73
2.4.4	使用模糊模型	74
2.4.5	模糊模型的自学习	75
2.4.6	举例	78

第三章 采用神经网络技术的模糊辨识方法

3.1	模糊神经网络	82
3.1.1	推理合成方法	82
3.1.1.1	前提	82
3.1.1.2	结论	86
3.1.2	学习算法	91
3.2	利用模糊神经网络的模糊建模	92
3.3	仿真	94

第四章 参数自校正模糊控制方法

4.1	简单模糊控制器的设计	102
4.1.1	精确量的模糊化	103
4.1.2	模糊推理算法	105
4.1.3	输出信息的模糊判决	109
4.2	简单模糊控制器参数与控制系统响应特性关系	111
4.2.1	EK 对系统性能的影响	111
4.2.2	CEK 对系统性能的影响	112
4.2.3	UK 对系统性能的影响	112
4.3	模糊自校正控制方法	113
4.3.1	一组模糊子集的隶属函数的定义	115
4.3.2	模糊自校正控制器的粗调部分	118
4.3.3	模糊自校正控制器的微调部分	120
4.4	仿真研究	121
4.4.1	系统抗扰动性能比较	123

4.4.2	系统抗扰动 I 性能比较	124
4.4.3	扰动 I 和扰动 II 同时作用时性能比较	125
4.5	模糊自校正控制系统的鲁棒性	126
4.5.1	对象的惯性减小	126
4.5.2	对象的惯性增加	129

第五章 结构自校正模糊控制方法

5.1	概述	130
5.2	结构自校正模糊控制器	130
5.2.1	性能测量	131
5.2.2	控制量的校正	132
5.2.3	控制规则的校正	135
5.2.4	控制表的获得	136

第六章 多变量模糊自校正控制方法

6.1	多变量模糊自校正控制系统的设计思想	138
6.2	单元机组负荷系统的辨识	140
6.3	模糊模型的等价转换	145
6.4	多变量模糊自校正控制系统及性能分析	150
6.4.1	多变量过程的最优输出预测	150
6.4.2	多变量广义预测控制规律	152
6.4.3	多变量模糊自校正控制系统的闭环稳态分析	154
6.4.4	多变量模糊自校正控制系统的闭环稳定性分析	156
6.5	单元机组负荷系统的模糊自校正控制	157
6.5.1	模糊自校正控制系统及其动态响应	157
6.5.2	模糊自校正控制系统与常规的锅炉跟随系统的比较	160
6.5.3	模糊自校正控制系统的鲁棒性	161

第七章 基于手动控制数据的自适应控制方法

7.1	基于控制作用模型的单元机组负荷系统的控制	165
-----	----------------------------	-----

7.2 仿真研究	170
第八章 考虑两种不确定性的模糊推理方法和控制方法	
8.1 问题的提出	172
8.2 几个基本概念的定义和计算方法	174
8.2.1 贴近测度	174
8.2.2 知识表示和模式匹配	176
8.2.3 修正函数 MF	179
8.3 置信度 CF 的作用和整体推理方法	180
8.4 合成规则的模糊推理	182
8.4.1 “或”合成	182
8.4.2 “与”合成	183
8.5 THFDP 的应用示例	183
8.6 考虑两种不确定性的模糊控制方法	187
附录 模糊状态作用表或查询表的自动生成	194
参考文献	202

绪 论

§ 0.1 模糊控制与智能控制

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量以及模糊逻辑推理为基础的一类计算机数字控制方法^[128]。从线性控制与非线性控制的角度分类,模糊控制是一种非线性控制;从控制器的智能性看,模糊控制属于智能控制的范畴。

智能控制是人工智能、控制理论、管理科学相结合的产物^[129]。它依靠知识模型,把人类社会数以千万计的技术和非技术的人类行为和经验,归纳为若干系统化的规则(或规律),实现对系统的“拟人智能”控制^[130]。

智能控制不同于传统控制之处主要有两大方面。一是利用(或部分利用)受控对象的知识模型设计控制策略,该知识模型是通过人们对受控过程认识的大量信息的归纳和运行经验的总结建立的,也包括由计算机智能程序自动推理、演算形成的知识^{[77][132]}。二是具有良好的人机智能结合能力,能够方便地将人的直觉推理和新经验、新知识传递给计算机,以充实和修正知识模型;也可以通过人机对话方式确定某些调节器参数,选择某些多目标决策的满意解等,实现人机共同决策^[31]。对于具体的智能控制系统,考虑到对其性能指标、可靠性、实时性及对性能/价格比的要求不同,可以将其简化。例如,可以不设人机自然语言对话;考虑到专用性,可将知识模型简化,例如仅含最必要的控制规则及其它必要信息^[128]。

传统的控制理论(包括经典控制理论或现代控制理论)是利用

受控对象的数学模型(即传递函数模型或状态空间模型等)设计控制策略。这种数学模型结构不便于表达和处理有关受控对象的一些不确定信息,也不便于利用人的经验知识、技巧和直觉推理,所以难以对复杂系统进行有效地控制^[45]。

随着科学技术的进步和生产力的发展,受控对象变得越来越复杂,并且人们对其控制质量的要求日益提高,这就向控制工作者提出了严峻的挑战。解决这个问题要同时从两方面入手,一是研制性能优良的控制方法,二是充分利用人类的智能,及时地将专家或操作人员的经验、思考、知识以及直觉推理加入到控制决策之中。而后者尤为重要,正如 K. J. Astrom 指出:“即使象 PID 控制这一类问题,也不能由控制理论单独解决,而直觉推理具有非常重要的作用。……在多变量自校正调节器中,直觉推理更为重要。为了获得高性能的自适应控制系统,应该给系统提供更多的直觉判断逻辑……直觉判断无论在高水平还是低水平控制中都是重要的”^[1]。

模糊控制是智能控制的一类主要方法。它的知识模型是由一组模糊产生式规则(主要是模糊控制规则和表示对象特性的语言规则)构成的,它的人机对话能力较强,能够方便地将专家的经验与思考(例如,“if(温度偏高,温度的变化率偏高)then(减温水量适当增加)”)加入到知识模型中。

§ 0.2 经典模糊控制^①的历史回顾

模糊集合论是六十年代中期由 L. A. Zadeh^[105]提出的。尔后,模糊数学得到迅速发展,形成了一系列比较完整的基础理论^[14]。模糊集合的引入,使得用比较简单的方法对复杂系统作出合乎实

① 本书中经典模糊控制(有时也称为简单模糊控制)是指采用二维模糊推理的(即模糊产生式规则是二维的)模糊控制。

际的，符合人类思维方式的处理成为可能。今天，模糊集合理论及其应用已成为很引人注意的学科，其应用面涉及自动控制、信息处理、图象识别、农作物选种、河流污染对策、商品评价、化合物分类以及地理学、经济学、社会学、语言学、法学、哲学和管理科学等诸多领域。

1973年，L. A. Zadeh⁽¹⁰⁷⁾继续丰富和发展了模糊集合论，提出了一种把逻辑规则的语言表达转化成相关控制量的思想，从而为经典模糊控制的形成奠定了理论基础。他同时指出：模糊控制方法与通常分析系统所用的定量方法本质是不同的，它有三个主要特点：

- (1)用语言变量代替数学变量或两者结合应用。
- (2)用模糊条件语句来刻划变量间的函数关系。
- (3)用模糊算法来刻划复杂关系。

下面首先比较一下传统控制方法与经典模糊控制方法的差异。

现有的控制理论可以用来处理许多控制问题。例如，利用卡尔曼滤波器可以对有噪声的系统进行状态估计；极大值原理可以用来解决某些最优控制的问题；分离定理为随机系统的控制提供了便利的方法；极点配置技术可以用来处理线性多变量系统；预测控制理论可对大滞后过程进行有效的控制。尽管这些理论在处理实际问题时都得到了不同程度的成功，但是它们都有一个基本的要求，就是必须知道被控对象的数学模型。然而在实际中常出现这样的复杂情况：许多工业被控对象由于具有非线性、时变性、变结构、多层次、多干扰因素以及各种不确定性，难于建立精确的数学模型。即使对一些复杂对象能够建立起数学模型，模型也往往过于复杂，既不利于设计也难以实现有效控制。这时前面提到的方法就无法解决这些对象的控制问题。虽然常规自适应控制技术可以解决一些问题，但其能力也是有限的。另一方面操作者往往可以对这些难以建立数学模型的被控对象进行有效的控制。

操作者对被控对象进行控制时主要是通过不断学习，积累操作经验，这些经验包括他对被控对象特性的了解，在各种情况下的控制策略以及性能指标判据。作为经验，这些信息通常是以自然语言的形式表达出来的，它们的特点是定性的描述，所以具有不确定性和不精确性。这种特性使得人们无法用现有的定量控制理论对这些信息进行处理，但是人们却能根据这些信息建立一组行之有效的控制规则，来对被控对象进行控制。这是一组用语言表达的具有模糊性的控制规则。显然在这种情况下，我们需要一种能处理这种具有模糊性的语言信息的技术，它能根据语言信息构成一个能给出有效控制作用的控制器。模糊集合理论就是具有处理语言信息能力的工具。经典模糊控制器就是人们利用模糊集合这个工具设计的、能够模仿操作人员手动控制作用的控制器，它不要求已知受控对象的数学模型。但是，需要强调指出：经典模糊控制不要求受控对象的数学模型，并不等于对受控对象先验知识一无所知的情况下就可设计一个具有良好控制效果的模糊控制器。恰好相反，它仍然要求对受控对象的特性有充分的了解，只不过它们是以知识模型(由人们对受控过程认识的模糊信息的归纳和操作经验的总结而形成的模型)而不是数学模型的形式表达出来的。

从七十年代中期以来出现了一些经典模糊控制在实际生产过程中得到成功应用的例子。Mamdani(1974)⁽⁶²⁾首先利用简单模糊控制器对一台小型蒸汽机实现了控制，收到了良好的效果。这种控制方法的主要基点就是把人的经验转化为控制策略，从而为模型未知的复杂系统的控制提供了很方便的模式，实践结果表明他们的算法优于DDC算法，并且对运行条件变化不敏感。Tong⁽⁶³⁾从理论上进一步分析了该模糊控制系统。1975年，King等人⁽⁴⁰⁾将经典模糊控制理论用于反应炉的自动温控系统，取得了较好的效果。这个控制问题的主要困难在于被控对象的非线性时变增益。Ostergard(1977)⁽⁶⁵⁾在对小型热交换器进行研究后，提出一个有效

的经典模糊控制系统。这个控制问题是在热交换器中通过调节热水的流量和热水加热器的功率来控制出口冷水的温度和入口热水的温度。控制中的主要难点是严重的非线性和强耦合。这个模糊控制器控制效果比一个双环PID控制系统的效果略好。Jensen (1979)^[31]采用类似的方法开发了一个水泥窑的模糊控制方案。Stoirov (1985)^[79]用语言方法设计综合了连续发酵过程的递阶控制,从而使得实时控制系统可以在微计算机上较为容易地实现。Bernard (1988)^[6]利用模糊逻辑建立了鲁棒性很强的规则基控制器,并用于5MW核反应器的实际控制之中,收到了良好的效果。在这些应用例子中,一个共同的特点是控制器的设计不依靠对象的数学模型,而是由受控对象的知识模型设计控制策略,再由实验结果逐步改进控制算法。

在一些非生产过程中,经典模糊控制方法也获得了应用。如:水质控制^{[28][94]},列车自动驾驶^{[98][99][102]},起重机自动操作系统^{[100][101]},电梯自动运行^[16],十字路口交通管理系统^[95]等。

本质上讲,经典模糊控制器是将专家或操作人员的语言控制规则转化为自动控制策略。可是准确地提取人的决策信息形成完善的模糊控制规则是很难办到的。那么,自然就考虑到模糊控制器应向着自适应方向发展,使得模糊控制规则在控制过程中自动地修改、完善和调整,从而提高系统的控制性能,达到良好的控制效果。Procyk and Mamdani (1979)^[71]首先提出了自学习(或自组织)模糊控制器。该控制器由两组规则基构成,第一组规则基是简单模糊控制器的一般规则,第二组规则基是由元规则构成的,从而能够模仿人类的学习能力,按照预定的系统整体性能,来创造和修正一般的规则基。而后,自学习模糊控制器又有了新的发
展^{[48][71][83][86]}。Sugeno (1985)^[81]提出了另一种自学习算法。采用该方法,模型轿车能够自动地启停和运行。

稳定性是模糊控制系统的一个重要的性能指标。Kichert and Mamdani (1978)^[88]利用描述函数方法分析模糊控制系统的稳定

性; Brace and Rutherford(1979)⁽⁶⁾提出了采用语言相平面方法分析和改善模糊控制系统的稳定性。Ray(1984)⁽⁷²⁾等人试图将模糊控制器看成是多维(MISO)多阶继电器,继而利用广义Nyquist稳定判据来判断模糊控制系统的稳定性。上述三种方法的共同局限性是要求模糊控制器是对称的,显然这一点对非线性系统来说是无法保证的。Kiszka(1985)⁽⁴³⁾等人利用能量特征函数的概念建立了一种稳定性判定准则,并提出了某类模糊系统的能量稳定性判据,局限性在于某些模糊系统难于定义能量特征函数。总之,关于模糊控制系统稳定性分析,至今还没有统一的方法,但没有一篇报告中提到因隶属函数和控制规则选择不当而引起不稳定的。看来只要准确地模仿操作经验就不会出现系统不稳定现象。

模糊推理是模糊控制器设计的主要内容之一。在模糊控制器设计过程中所使用的推理方法可以归纳为四种类型⁽⁴⁷⁾:①Mamdani方法(1974)⁽⁵²⁾⁽⁵⁵⁾,②Larsen方法(1980)⁽⁴⁶⁾,③Tsukamoto方法(1979)⁽⁹²⁾,④Takagi方法(1985)⁽⁸⁴⁾。这些方法的差异在于模糊模型的构成和(或)推理合成算子的选择,但它们也有共同点:其模糊性均来自于模糊产生式规则的前提和结论部分的语言描述。Shyi(1988)⁽⁷⁸⁾提出了诸条规则的置信度存在模糊性时的模糊推理方法,并应用于某专家系统的建造之中。

一些学者在模糊控制机和模糊计算机硬件上作了深入的探索。Togai(1986)⁽⁸⁷⁾等人在VLSI上实现了用于实时模糊控制的推理芯片,该模糊推理芯片可以并行处理16条规则。它是由规则基存贮单元、推理单元、控制单元、输入输出接口等四部分组成。仿真结果说明该推理机每秒钟能处理约250000条模糊逻辑推断,比常规的软件快10000倍,从而为模糊控制的实时应用提供了有力的硬件支持。Yamakama(1988)⁽⁹⁶⁾等人正研制模糊逻辑芯片和非模糊化芯片等模糊计算机硬件系统。Watanabo(1989)⁽⁴⁷⁾在North Carolina微电子中心已组装成功了目前世界上最快的模糊逻辑芯片。该芯片由688000个晶体管构成,每秒能处理580000条模糊