

机电工程师继续教育丛书

模糊控制技术

廉小宗 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

—— 机电工程师继续教育丛书 ——

模糊控制技术

廉小宗 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是《机电工程师继续教育丛书》中的一本，是关于模糊控制方面的一本实用科技书，全书共分为六章，分别为：绪论、模糊控制的数学基础、模糊控制原理和设计方法、高级模糊控制器的设计方法、模糊控制系统的设计方案和开发软件、Matlab在模糊控制中的应用。在每章后均有一定数量的复习思考题。本书内容深入浅出，便于自学和应用。

本书可作为机电工程师继续教育及其他相关专业学生的教学用书、参考书，亦可供有关工程技术人员自学参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

模糊控制技术/廉小亲编著. —北京：中国电力出版社，2003

(机电工程师继续教育丛书)

ISBN 7-5083-1592-8

I. 模… II. 廉… III. 模糊控制 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 033473 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

利森达印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 8 月第一版 2003 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 11 印张 243 千字

印数 0001—3000 册 定价 18.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)



编委会名单

名誉主任 丁舜年

主 任 沈烈初

副主任 周鹤良 苏竹荆

委 员 (按姓氏笔画为序)

万遇良 马 阳 王 忱 王赞基

齐智平 刘玉琛 吴石增 肖 兰

杨昌焜 陈 瑜 陈祥光 张林昌

赵长德 郝广发 夏德海 廉小亲

主 编 万遇良

副主编 王 忱



序 言

中国电工技术学会电气工程师进修学院组织编写的《机电工程师继续教育丛书》第一套(6册)是以机电一体化技术为核心内容的,于1998年出版。这套丛书出版后深受广大读者欢迎,多次印刷,总印数超过一万套。此套丛书除供广大科技人员自学外,还曾被国家人事部列入《百千万人才工程》高级研修班计划,并由中国电工技术学会以及新疆、武汉等自治区、市有关部门作为系统培训科技人员的教材。据不完全统计,全国参加培训班的科技人员近万人。

信息化带动工业化、工业化促进信息化是新兴工业化道路重要特征之一,而智能化技术又是电工技术的重要发展方向。为了配合我国经济发展和工程建设的需求,根据国家“十五”规划的要求,电气工程师进修学院现编辑出版第二套丛书。该套丛书突出信息化技术,以高新技术改造提升制造业、推动电工行业技术进步与可持续发展的关键技术和共性技术。这套丛书共7册,包括了《传感器与测控技术》,《电力电子与运动控制技术》,《可编程序控制器技术》和《现场总线技术》,正在发展的智能控制技术的两个分支——《模糊控制技术》和《人工神经网络技术及应用》,以及涉及技术和管理的《现代制造企业信息化技术》。

该套丛书和第一套丛书一样,力求达到以下几点要求:

(1) 力争先进。本套丛书的内容跟踪国内外信息化技术的发展与进步,反映其发展现状和趋势。

(2) 力求实用。本套丛书主要适用于具有大专以上专业水平的在职科技人员的继续教育和知识更新,也可用作高等院校学生和相关专业研究生的参考用书。丛书内容理论联系实际,能够指导读者在需要时运用到实际工作中去。

(3) 内容简明。每种书集中阐述一个问题,简明扼要。

(4) 学习方式灵活。既可用于自学,也可用于面授。每种书除包括基本内容外,还包括一些习题,以及必要的参考书目,以帮助读者理解掌握和深入钻研。

编写出版这套丛书是一个新的尝试,不可避免地会存在问题和缺点,热切希望广大读者给予支持,更欢迎给予批评指正。

沈维初

2003年6月



前 言

模糊控制是一种基于语言规则、模糊推理的高级控制技术,是智能控制领域最活跃、最重要的分支之一。然而到目前为止,模糊控制也没有统一的定义。但从广义上可将它定义为:“模糊控制指的是以模糊集合理论、模糊语言变量及模糊推理为基础的一类计算机数字控制方法”或者定义为“基于模糊集合理论、模糊逻辑,并同传统的控制理论相结合,模拟人的思维方式,对难以建立数学模型的对象实施的一种控制方法”。其基本思想是在被控对象的模糊模型的基础上,用机器去模拟人对系统控制的一种方法。

当今,模糊控制技术已广泛应用于工业、农业、国防、医学等诸多行业。学习和掌握模糊控制技术,已成为相关领域广大工程技术人员及大专院校师生的迫切需要。本书从初学者角度出发,在模糊控制原理的基础上,让读者了解在实际应用中搭建一个模糊控制系统的几种方案,便于读者在实际工作中参考。并让读者了解、重视 Matlab 仿真软件在模糊控制中的应用等问题。

本书共分六章,每章内容简述如下:

第一章介绍了模糊控制技术发展的历史背景及其特点、模糊控制应用领域、现状及发展方向。

第二章介绍了模糊控制的数学基础。本章首先在普通集合概念的基础上,重点讲述了模糊集合论的有关内容,包括模糊集合、隶属度的概念及模糊集合的表示方法;其次,在普通关系的基础之上,介绍了模糊关系的概念、表示方法、运算以及模糊向量的笛卡尔积的概念;最后,讲述了模糊语言、模糊推理及模糊集合运算的定律等内容,其中简要介绍了语言变量、语言值及模糊命题等概念,并重点介绍了模糊推理的概念及方法。

第三章介绍了模糊控制原理和设计方法。本章首先通过实例说明了人一机系统中操作者的控制思想,让读者对模糊控制思想有了最初的了解,并给出了模糊控制系统的组成,重点介绍了模糊控制系统的工作原理;其次,重点讲述了基本模糊控制器的设计方法;最后,针对实例详细说明了基本模糊控制器的设计方法。

第四章针对基本模糊控制器在实际应用中存在的不足等问题,重点讨论了结构较复杂、但性能较好的高级模糊控制器的设计方法,如带修正因子的自组织模糊控制器的设计、PID 参数自组织模糊控制器的设计及混合型模糊控制器的设计等。

第五章讲述的是有关模糊控制系统的设计方案和开发软件的基本知识。首先,重点介绍了模糊控制系统几种常见的设计方案,旨在让读者了解诸多方案的优、缺点。并以两个

应用实例——基于 DSP 芯片的伺服电机模糊控制系统和基于单片微处理器的 ABS 防抱死制动系统为主线，讲述了采用微处理器芯片设计模糊控制系统的原理与方法。另外，还对我国自行研制的模糊控制通用芯片 F200 及相应开发软件 FDS2 作了介绍。最后，介绍了 FuzzyTECH、TILShell 和 Freeware 三种模糊开发软件。

第六章讲述 Matlab 在模糊控制中应用的有关知识。首先，介绍了模糊逻辑工具箱函数的基本内容；其次，讲述了 FIS 结构的建立方法及步骤；最后，通过具体的模糊控制实例讲述了 Matlab 技术在模糊控制系统中的仿真应用，主要介绍采用 Simulink 工具、Matlab 语言实现对模糊控制系统的仿真，其中涉及 S 函数、模糊子系统的创建与封装、模糊参数自调整等有关常识，给出了应用修正因子设计模糊规则库的方法，并详细列出了模糊控制的应用程序，比较了模糊控制、模糊—积分控制与传统 PID 控制的动态特性。

书中有些章节参考了本书参考文献中所列各位学者的论著、论文的相关内容，在此深表谢意。需要特别指出的是，在本书的第一章模糊控制在国内应用部分，列举了许多学者所著论文的题目，但有些文章并未在参考文献中列出，在此深表歉意。

本书由北京工商大学廉小亲编写，曹志国同学编制了第六章的程序，并编写了第六章的部分内容。全书由北京理工大学张宇河教授审阅，并在百忙之中提出了许多宝贵的意见和独到的见解。本书在编写过程中得到了北京电气工程师进修学院专家组老师的热情指导和帮助，并且还得到了中科院计算所沈理教授的热情支持。最后，本书的出版得到了中国电力出版社的支持和帮助。在此，对他们表示最衷心的感谢。

由于作者水平有限，不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编著者

2003 年 1 月

目 录

序言

前言

第一章 绪论	1
第一节 模糊控制技术发展的历史背景及其特点.....	1
第二节 模糊控制应用领域及现状.....	3
第三节 应用动向及发展方向.....	7
第二章 模糊控制的数学基础	10
第一节 概述	10
第二节 普通集合及其运算性质	10
第三节 模糊集合论基础	12
第四节 模糊关系及其运算	17
第五节 模糊语言及模糊推理	22
复习思考题	30
第三章 模糊控制原理和设计方法	32
第一节 引言	32
第二节 模糊控制系统的工作原理	32
第三节 基本模糊控制器的设计方法	35
第四节 模糊控制器设计举例	47
复习思考题	52
第四章 高级模糊控制器的设计方法	53
第一节 带修正因子的自组织模糊控制器的设计	53
第二节 PID 参数自组织模糊控制器的设计	61
第三节 混合型模糊控制器的设计	69
复习思考题	72
第五章 模糊控制系统的设计方案和开发软件	73
第一节 模糊控制系统的设计方案	73
第二节 模糊逻辑开发软件	94
复习思考题	104

第六章 Matlab 在模糊控制中的应用	105
第一节 模糊逻辑工具箱函数	105
第二节 模糊推理系统 (FIS) 的建立	127
第三节 Matlab 在模糊控制系统设计与仿真中的应用	139
复习思考题	163
参考文献	164

第一章

绪论

第一节 模糊控制技术发展的历史背景及其特点

一、历史背景

几十年来,控制理论的发展经历了古典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三个阶段。智能控制又包括模糊控制、神经网络控制、专家控制和仿人智能控制等。

在古典控制理论中,应用最成功的是比例积分微分(PID)控制。它是一种在工业生产中广泛应用的常规控制算法,属于线性控制。这种控制方式的最大优点是结构简单,使用方便,可以不用被控对象的模型参数,直接根据输出的偏差进行调节。该算法由于其简单实用而被广大工程技术人员所熟悉。但是当被控对象比较复杂时,便难以取得满意的控制效果。

现代控制理论为控制复杂系统提供了新的思路。采用该理论进行控制时,需要提供准确的数学模型。尽管数值计算与计算机技术的发展,为求解模型参数提供了有效的方法和工具,但由于这些模型方程中有众多的参数需要估计,而求解这些参数时又往往缺少足够的信息特征和信息量,因此限制了现代控制理论的有效应用。

一个控制系统控制质量的优劣,关键在于它能否对被控对象提供精确的控制。当研究的控制系统涉及非线性、多变量、时变性等这样的大系统时,如煤炭生产过程、金属冶炼、石油化工、工业锅炉等,系统的复杂性与控制技术的精确性便形成了尖锐的矛盾。由于被控对象和过程的非线性、时变性、多参数间的强烈耦合、随机干扰、被控过程的机理错综复杂等,很难建立被控对象的精确数学模型,只能测得其参数间的模糊关系的估计。这就给传统的古典控制理论及现代控制理论方法的应用带来了很大的困难。对于上述难以控制的工业生产过程,有时一个有实践经验的操作人员,手动操作效果却很好。操作人员恰恰是利用了人脑的特点,通过对外界事物进行识别与判决,使看来不经意的模糊手动操作,达到精确控制的目的。

这里我们用模糊数学的创始人、控制理论专家扎德(L.A.Zadeh)教授提出的停车问题作为例子来加以说明。

所谓停车问题是要把汽车停在拥挤的停车场上两辆车之间的空隙处。该问题对于一个搞控制理论的人来说,其做法是给一定的约束条件,设若干个变量,列一些微分方程,然后寻找一个在数学解集合中存在的一个解,在这里即指寻找一个控制量的解 $u(t)$, 目的

是司机在遵循 $u(t)$ 的情况下, 将车较好地停在两车中间。

在现实生活中, 对于司机来说, 在两辆车中间停放一辆车是非常容易的一件事情, 他可以通过观察停车场中两辆车的放置情况, 采用或向左、或向右、或向前、或向后等步骤, 这样反复几次, 即可把车停好。若用传统的控制方式来做, 将把一个表面上看起来并不复杂的问题, 在用精确方法求解时, 由于约束因素过多, 而变得非常复杂。

在上例中, 司机根本就不知道汽车——即被控对象的数学模型, 更不用谈到在基于此模型上的控制, 他靠的是通过观察外界事物, 获取一些有用的信息, 再经过存储和处理, 通过自己的直觉、经验加以判断、推理, 反作用于外界, 从而实现对汽车的控制。

模糊控制技术就是在建立上述被控对象的数学模型较难、以及实现控制较难的背景上产生的。

1965年, 美国加利福尼亚大学自动控制教授 L.A.Zadeh 提出的《Fuzzy Set》开创了模糊数学的历史。1973年, 他又给出了模糊推理的理论基础。从此, 模糊数学逐渐发展、应用起来。自1974年伦敦大学的 E.H.Mamdani 成功地将模糊理论应用于锅炉和汽轮机的过程控制以来, 模糊控制得到迅速发展。模糊控制较大规模的研究是从1980年开始的。1985年, 模糊推理集成块开始开发。1986年, 在日本, 基于模糊控制技术所开发的产品及系统开始出现, 并在实际应用中取得明显的经济效益。之后, 模糊控制在许多国家如美国、西欧、中国、东南亚引起了广泛的重视, 并受到国际控制理论学术界的关注。1984年, 国际模糊系统学会成立。1985年, 召开了第一届国际模糊系统学会的学术交流会, 各国相继成立了模糊控制系统工程研究所, 90年代起, 世界上一些大公司开始了模糊产品的开发, 模糊理论与应用研究及模糊产品的开发像一股强劲的风浪席卷世界各地。

二、模糊控制的特点

到目前为止, 模糊控制还没有统一的定义。但从广义上可将它定义为: “模糊控制指的是以模糊集合理论、模糊语言变量及模糊推理为基础的一类计算机数字控制方法” 或者定义为 “基于模糊集合理论、模糊逻辑, 并同传统的控制理论相结合, 模拟人的思维方式, 对难以建立数学模型的对象实施的一种控制方法”。其基本思想是在被控对象的模糊模型的基础上, 用机器去模拟人对系统控制的一种方法。

模糊控制与传统的控制方式相比, 具有以下特点:

(1) 在设计系统时不需要建立被控对象的数学模型。只要求掌握现场有经验的操作人员或有关专家的经验、知识, 或者操作者在操作过程中的操作数据及被控对象的运行数据等。

(2) 对被控对象特性参数的变化具有较强的鲁棒性。

(3) 适合于对难以建立被控对象的数学模型的复杂系统进行控制, 如非线性、时变、滞后系统。

(4) 为“语言型”控制, 由工业过程的定性认识出发, 较容易建立语言变量控制规则, 易于形成知识库。

(5) 由不同观点出发, 可以设计几个不同的指标函数, 但对一个给定系统而言, 其语

言控制规则是分别独立的，且通过整个控制系统的协调可以取得总体的协调控制。

(6) 控制效果好，且所需设备简单，经济效益显著。

综上所述，把模糊控制技术应用在煤炭生产过程、金属冶炼、石油化工、工业锅炉以及家用电器等方面，将具有很好的应用前景。

第二节 模糊控制应用领域及现状

一、国外状况

自 1965 年，美国著名控制论专家扎德教授创始模糊数学以来，模糊控制理论及其应用得到了迅速地发展起来。模糊控制的应用始于 1973 年，以日本为例，在 80 年代进入了模糊控制实用化时期，1987 年，在模糊控制成功用于仙台地铁之后，各种采用模糊控制技术的家电产品，如电视机、摄像机、洗衣机、电冰箱、电饭锅、空调、照相机、复印机等相继研制成功并投放市场。其中三菱公司研制的使用模糊技术的空调器，控制性能稳定，节能达 24%。之后，模糊控制装置成功地应用于汽车自动变速，电梯控制及生产过程中，其中三菱公司将模糊控制用于电梯群管理，使等电梯的平均时间减少 15%。

据日本电气公司 (NEC) 1991 年 9 月统计，松下、三菱、东芝等公司在空调机、全自动洗衣机、吸尘器等高档家用电器中普遍应用了模糊控制理论；到 1994 年其普及率超过 50%，有的高达 80%。

近年来，为取得更好的读盘效果，三菱钻石光驱在市场中异军突起，它依据模糊数学，模糊控制的原理，使用了新一代的智能控制芯片—— $\mu\text{pc}3302$ 。装有此芯片的 40 倍速光驱，能够智能地根据光盘质量，自动调节激光光束发射功率的大小、强弱以及光头上顶片（聚光片）与光盘的距离。

模糊控制理论在各个方面应用很广。多数情况下，模糊控制器用软件实现。但是在时间要求非常高的情况下，软件实现已不能满足要求，所以各模糊逻辑公司开发了一些模糊通用芯片。有代表性的芯片有：

(1) 日本 Omron 公司模糊通用芯片。目前投放市场的有：FP1000、FP3000、FP5000 和 FP7000，这些产品属于数字式模糊处理器。各芯片配有相应的开发工具。如 FP3000 的开发工具有 FS1000 软件工具和模糊推理板 FB-3098。

(2) 美国 Togai Infralogic 公司通用芯片。该公司推出数字模糊处理器 FC110，该芯片采用 68 脚 PLCC 封装，单一 +5V 电源，功耗为 1.1W。既可以用于加速模糊逻辑的推理计算，也可用作微处理器使用，处理速度为 10 万条/s，能够产生 6 万个计算输出结果。它最多可以支持 128K 字节的知识库，在该知识库中允许有 800 条以上的规则和最多 256 个“IF”和“THEN”以及 1024 个输入和 1024 个输出。总共包含 18 条指令。FC110 的开发软件平台有三种：AT 加速板、FC110 开发板、单板模糊控制器。FC110 的开发软件是 TILSHELL，它可以建立、测试、调试和模拟模糊逻辑控制器。

(3) 美国 NS 公司推出神经网络模糊逻辑编译器——NeuFuz4，使 COP8 单片机模糊控制具有自学习功能。

(4) 美国 Neural Logic 公司的 NLX 系列模糊控制通用微处理器投入市场, NLX 是 VLSI 模糊逻辑芯片, 主要用于模式识别领域。其主要产品有: NLX230、NLX220 等。

(5) 德国 Siemens 公司和 Inform 公司联合研制了 Fuzzy-166 微处理器。它是在现存的 16 位微处理器 80C166 上添加一个模糊单元, 与标准 80C166 管脚兼容。

虽然, 模糊控制通用芯片已投放市场, 但由于其应用有些限制, 如输入量的个数、每个变量的模糊子集的个数及规则的条数有一定的范围, 再加之它的成本较高, 故目前模糊控制通用芯片的应用还不广泛。但是, 随着 VLSI 等技术的发展, 模糊控制通用芯片对应用的限制将会越来越少, 应用会越来越广泛。

二、国内状况

自 1979 年以来, 我国许多科研单位和学者在模糊控制的理论、仿真实验及其应用方面做了大量的研究工作, 这些工作主要集中在对模糊控制系统的结构、模糊推理算法、自学习或自组织模糊控制器、模糊控制稳定性问题、神经网络在模糊控制中的应用、遗传算法在模糊控制中的应用, 以及模糊控制芯片等方面的研究, 而其成果应用主要集中于以下几个方面:

(1) 工业炉窑方面。如退火炉、电弧冶炼炉、水泥窑、热风炉、煤粉炉的模糊控制研究。

(2) 石化方面。如石化精馏塔的控制; 废水 pH 值计算机模糊控制系统的设计; 模糊控制理论在玻璃工业中的应用; 神经网络自学习模糊控制及其在合成氨生产中的应用; 模糊控制系统在磨煤机中的应用; 模糊控制在污水处理系统中的应用; 专家模糊控制在球磨机上的应用等。

(3) 煤矿行业。如煤矿生产过程自动控制; 选矿破碎过程的控制; 参数自调整煤矿供水模糊控制系统; 模糊控制理论在煤矿通风安全自动化系统中的应用等。

(4) 食品加工行业。如甜菜制糖生产过程的控制; 模糊控制算法在计算机对发酵过程罐温控制中的应用; 柠檬酸发酵过程的神经网络模糊控制; 食用酒精发酵温度的模糊控制等。

(5) 家电行业。洗衣机、电冰箱、空调、电饭锅、微波炉等的模糊控制, 如市场上近年出现的模糊控制洗衣机、电冰箱、空调、电饭锅等。

(6) 机电行业。如集装箱吊车的模糊控制; 空间机器人柔性臂动力学的模糊控制; 风、流作用下船舶操纵运动的模糊控制; 模糊控制技术在等离子焊接中的应用; 模糊控制对精密实时跟踪控制系统性能的改善; 模糊控制在带钢轧制中的应用; 高压断路器智能操作的模糊控制; 模糊控制在压电陶瓷控制中的应用; 用触摸屏监控器和 PLC 组成矩阵加热模糊控制; 发动机推理测量校准中加载模糊控制; 步进电机模糊控制技术的研究; 模糊控制在烟丝加香控制系统中的应用; 基于 Windows 平台智能模糊控制电火花数控系统; 单片机温度模糊控制系统; 变电站电压无功模糊控制的理论研究; 单级倒立摆的专家模糊控制; 基于滑觉传感器和模糊控制的软抓取研究; 板形模糊控制技术的发展; 改善步进电动机振荡及加减速性能的模糊控制; 自寻优一模糊控制策略在球磨机控制中的实现; 交流随动系统的模糊控制研究; 模糊控制在现场总线节点控制器上的实

现；模糊控制在快速伺服定位系统中的应用；流程工业中模糊控制和故障诊断的建模及网络综合集成；预报式模糊控制在热处理电阻炉温控中的应用；模糊控制在火电厂制粉系统的应用；模糊控制在物料混配系统中的实现；液压伺服控制带材“跑偏”系统的模糊控制研究；模糊控制技术在 400kW 电力测功机测控系统中的应用；模糊控制在无速度传感器交流调速系统中的应用；模糊控制技术在疲劳实验系统中的应用；皮带配料秤的模糊控制；电梯群控系统多目标模糊控制算法的设计；基于模糊控制的直流无刷电机调速系统等。

(7) 飞行控制方面。如 MIMO (多输入多输出) 系统模糊控制及其在飞行控制中的应用；模糊控制在导弹倾斜稳定系统中的应用等。

(8) 城市交通方面。如基于模糊控制的多功能交通控制系统；单交叉口的多相位模糊控制；模糊控制原理在城市交通流诱导系统和控制系统一体化研究中的应用；模糊控制理论在城市公共交通中的应用；模糊控制在列车自动驾驶中的应用；城市单路口交通模糊控制系统的实现；交叉路口信号灯的模糊控制；单片机在交通信号模糊控制中的应用；地铁列车驾驶的模糊控制技术；用 PLC 实现道路十字路口交通灯的模糊控制；模糊控制交通智能配时专家系统及针对动态目标模糊识别技术的视频交通监测系统；视频交通流量检测系统；动态接触网检测技术系统；高速电气化铁路接触网检测系统及针对隐含模糊信息提取技术的机动车车型识别系统；感应式交通数据检测器的研究以及大型城市模糊控制交通信号配时系统等。

(9) 其他方面。如模糊控制技术在游泳跳水馆水温调节中的应用；基于模糊控制的蓄电池快速充电系统；模糊控制技术在模拟火灾报警系统中的应用；模糊智能灌溉专家系统；针对静态目标模糊识别技术的模糊掌形识别；邮政包裹几何参数检测系统；车号牌识别系统及超大型内燃机组模糊控制等。特别应提到的是：北京师范大学数学系李洪兴教授领导的模糊系统与模糊信息研究中心暨复杂系统智能控制实验室采用变论域自适应模糊控制理论，于 2002 年 8 月成功地实现了四级倒立摆实物系统控制，并具有很好的稳定性和定位功能。

(10) 模糊控制与其他技术相融合方面。如仿人智能控制与模糊控制神经网络融合技术；产品开发过程中模糊神经网络规则提取及模糊控制；神经网络预测与模糊控制在河流模型水位控制中的应用；空调器基于遗传算法的自适应模糊控制研究；基于遗传算法自动舵模糊控制研究；柠檬酸发酵过程的神经网络模糊控制；基于模糊—神经融合的自适应模糊控制系统研究；受限柔性机器人基于遗传算法的自适应模糊控制；基于遗传算法优化的模糊控制技术；遗传算法与模糊控制的融合研究；一类基于 PID 控制的新型模糊控制方法；一种基于遗传神经网络的模糊控制系统；专家模糊控制在球磨机上的应用等。

(11) 模糊控制系统仿真方面。如燃气轮机转速模糊控制系统在 Simulink 中的实现；模糊控制及其仿真程序的实现；日立单片机模糊控制开发平台的研究；基于 Matlab 模糊逻辑工具箱的模糊控制系统仿真；基于 Matlab (Simulink) 的模糊控制系统计算机仿真；Matlab 软件中的 Fuzzy Logic 工具箱在模糊控制系统仿真中的应用；Matlab 软件在锅炉水位模

糊控制系统中的应用；模糊控制系统的 Matlab/Simulink 仿真与分析等。

(12) 模糊控制芯片、电路板开发方面。

1) 中国科学院计算技术研究所博士生导师沈理研究员，从事计算机学科领域的研究工作。1992 年后进行软计算（计算智能）和模糊系统等研究，主持有关的国家 863 计划项目、国家自然科学基金项目、中科院基础性研究重点项目等研究工作。先后研制成功 A-SIC 芯片，模糊控制推理芯片 F100 和 F200（注：F200 芯片由中科院计算所和中科院微电子中心合作研制）。并开发了 PC-ISA 总线模糊控制电路板 PCB100PC 和 PCB200PC；STD 总线模糊控制电路板 PCB100STD；发明了模糊推理协处理器，申请了专利。

2) 由上海贝岭承担的国家重点技术创新项目“模糊控制专用 IC 芯片技术开发”，在 2000 年 6 月通过专家鉴定。

模糊智能控制技术是 21 世纪的一项热门技术，在家用电器、工业控制等领域应用广泛，但目前国内使用的模糊控制专用芯片大多依靠进口。上海贝岭经过几年努力，开发了既与国外同类产品指令兼容，又有创新的微控制器芯片，具备了批量生产模糊控制专用芯片的能力。

专家认为，该项目已经取得了设计、工艺等多方面成果，特别是成功解决了模糊控制芯片的电磁兼容问题，对推动我国模糊控制技术的发展有重要意义。

3) 模糊控制专家樊远征先生通过多年研究探索，独立完成了 FC-3 直觉智能控制芯片技术的研制开发。该项技术是为数不多的由国内科技人员自行设计、开发的，具有中国自主知识产权的智能控制芯片技术。该产品自 2001 年 2 月正式销售以来，市场反应很好。该技术已经成熟并可以广泛应用于工业、民用、国防等领域亟待解决的控制时变参数系统中，可大幅度提高控制性能，并由该产品衍生的下游产品市场空间巨大。该芯片具有极高的性能价格比，它具有控制时变参数系统和不稳定系统、强鲁棒性、生产成本低、性能优越、产品稳定等诸多优点。

4) 2001 年 10 月 25 日，四川省信息产业厅在世能科技公司会议室主持召开了“SN”系列智能充电控制芯片技术及产品鉴定会。本次鉴定会由四川省信息产业厅邀请省内 7 位在充电控制技术方面的专家和用户代表组成鉴定委员会，他们分别就该芯片在负脉冲技术、多变量跟踪技术、模糊控制技术、嵌入操作系统等方面进行了论证和现场抽样测试。鉴定委员会成员们一致认为“SN”系列智能充电控制芯片具有如下特点：①自动调整充电波形、判断准确；②采用负脉冲技术，有效测试电池的内阻、容量等参数；③采用多变量跟踪技术和模糊数学原理，综合判断充满依据，合理有效；④有效避免极化等参数影响电池寿命的问题、对电池有明显的保护功能；⑤充电效率高、快充特点明显、可靠性强。

该技术处于国内领先水平，与国外同类产品相比较，功能更趋完善、设计更具合理性、集成度高、简化了外围电路设计。

5) 2002 年，清华大学微电子学研究所建立了生物芯片研究加工基地。这是一个研制与开发生物芯片的实验中心，还研究多媒体芯片技术及模糊控制、人工神经网络与模糊逻辑芯片。

(13) 模糊控制软件开发方面:

1) 在国家 863 计划支持下,中国科学院计算技术研究所博士生导师沈理研究员在“八五”期间,研制成功模糊控制推理芯片 F100 及其开发环境 FDS1。1996 年 6 月该 863 计划项目通过中国科学院主持的成果鉴定:鉴定意见认为上述芯片和开发系统“在技术上已达到国内领先水平和 90 年代初国际水平”。“九五”期间,该项目继续得到国家 863 计划支持,于 2000 年研制成功第二代模糊控制推理芯片 F200 及其开发环境 FDS2(注:F200 芯片由中科院计算所和中科院微电子中心合作研制)。

2) 2000 年,北方工业大学模糊控制研究所李宇成等人开发成功了日立单片机模糊控制开发平台。在该软件平台上可方便地定义和调试一个复杂的模糊控制系统,并在调试完成后,系统能自动生成用 C 和汇编两种语言书写的模糊控制执行程序。

综上所述,在模糊控制学术界众多科研技术人员的艰苦努力下,我国模糊控制应用技术取得长足地进步。模糊控制技术已从早期的理论研究逐步地向着更实用的方面发展。

第三节 应用动向及发展方向

模糊控制属于智能控制中的一种,是自动化技术中的一个非常活跃的领域。它以现代控制理论为基础,同时结合人工智能技术、神经网络技术、仿人智能技术,并因其具有自身优点,因而在控制领域得到了空前的应用。

目前,主要有以下几个发展方向:

1. Fuzzy-PID 复合控制

Fuzzy-PID 复合控制是用模糊技术与常规 PID 控制算法相结合的控制方法,以此达到较高的控制精度。它比单用模糊控制和单用 PID 调节器均有更好的控制性能。

2. 参数自整定模糊控制

参数自整定模糊控制或称比例因子自整定模糊控制,这种控制方法较之常规的固定比例因子的模糊控制方法对环境变化有更强的适应能力,在随机环境中能对控制器进行自动校正,使得被控对象特性变化或扰动情况下控制系统保持较好性能。

3. 自适应模糊控制

自适应模糊控制能自动地对自适应模糊控制规则进行修改和完善,以提高控制系统的性能。它具有自适应、自学习的能力,对于那些具有非线性、大时滞、高阶次的复杂系统有着更好的控制效果。

4. 专家模糊控制

专家模糊控制是专家系统技术与模糊控制相结合的产物。引入专家系统模糊控制进一步提高了模糊控制器智能水平,专家模糊控制保持了基于规则的方法和用模糊集处理带来的灵活性,同时把专家系统技术的表达与利用知识的长处结合起来,能处理更广泛的控制问题。

5. 神经模糊控制

神经模糊控制是基于神经网络的模糊控制方法。这种控制利用了模糊逻辑具有较强的

结构性知识表达能力,即描述系统定性知识的能力,以及神经网络强大的学习能力与定量数据的直接处理能力。

神经网络是由大量的简单处理单元构成的非线性动力学系统,能映射任意函数关系,且具有学习性,能处理不完整、不精确的、非常模糊的信息。有人证明:一个具有高斯型隶属函数、积推理、中心反模糊化的模糊系统能以任意精度逼近任意闭子集上的实连续函数,可看作是一个三层前馈网络。模糊技术和神经网络的有机结合,可以取长补短,相当于模拟了人脑的软、硬件,有效地推动了自学习模糊控制的发展。它是近年来智能控制领域研究的热点,并且广泛应用于难以建立较准确数学模型的复杂系统、非确定性系统,同时也在自动控制、计算机图像处理、语音识别、手写体识别等领域有重要应用。

模糊控制和神经网络的结合形式有多种,总体分为模糊系统与前馈神经网络的结合和模糊系统与反馈神经网络的结合。模糊系统与前向神经网络的结合又分为模糊神经网络 FNN (Fuzzy neural networks) 和神经模糊系统。

因为控制规则和隶属函数的获取与确定是模糊控制中的“瓶颈”问题,故融入神经网络的主要目的是使用神经网络来获取并修正模糊控制规则和隶属函数。

6. 多变量模糊控制

一个多变量模糊控制器有多个输入变量和输出变量,它适用于多变量控制系统。“维数灾”问题是模糊多变量控制中必须解决的重要问题,分层模糊系统可以有效地解决“维数灾”问题,是一个很有前途的研究方向。目前,清华大学自动化系张乃尧教授所负责的模糊控制理论及应用研究组正在致力于研究此类问题。研究组在已有工作的基础上,系统深入地研究“分层模糊系统”和“分层模糊控制系统”的分析设计方法以及通用逼近性、等效性等理论问题,为解决模糊多变量控制中遇到的“维数灾”问题提供一个系统化的解决方案,促进模糊控制在复杂多变量系统中的应用。

7. 基于遗传算法的模糊控制

遗传算法 (GA) 是一类模拟生物进化过程与机制来求解问题的自适应人工智能技术。它将每个可能的解看作是群体 (所有可能解) 中的一个个体或染色体,并将每个个体编码成字符串的形式,根据预定的目标函数对每个个体进行评价,即给出一个适应度值。开始时总是随机地产生一些个体,根据这些个体的适应度利用遗传算子 (选择、交叉、变异) 对它们进行重新组合,得到一群新的个体。这一群新个体由于继承了上一代的一些优良性能,因而明显优于上一代,逐步逼近最优解。遗传算法具有不依赖于问题模型、全局最优、隐含并行性、高效率 and 解决不同非线性问题的鲁棒性的特点,故已被广泛应用于机器学习、自动控制、模式识别、经济预测、工程优化等领域。模糊控制需要先验知识,神经网络需要不断从输入输出中学习,而遗传算法是属于从过去性能中学习的方法,更易于实现全局优化,有较好的适应性,对于不同的问题用不同的方法来实现。

模糊控制目前发展已由早期的理论研究向着更实用的应用研究方向发展,前景越来越好。模糊控制如前所述有其自身优点,但也有其局限性。模糊控制其控制器的结构过于简单,规则库一般只允许一种格式的规则,规则语言还不足以表达控制复杂过程需要的启发式知识;自学习和自适应能力较差;同时控制动作欠细腻,稳态精度欠佳。但模糊控制具