



高等学校电子与电气工程及自动化专业“十一五”规划教材



模糊控制技术

席爱民 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材

模糊控制技术

席爱民 编著

西安电子科技大学出版社

2008

内 容 简 介

本书共 9 章:第 1 章绪论,第 2 章模糊逻辑的数学基础,第 3 章模糊逻辑控制原理,第 4 章模糊逻辑控制器及模糊控制系统设计,第 5 章 MATLAB 辅助模糊系统设计,第 6 章模糊控制系统的非线性分析,第 7 章模糊自适应控制,第 8 章神经模糊控制,第 9 章模糊控制系统的应用。

本书由浅入深地论述了模糊逻辑控制原理、模糊控制器的结构、控制规则的形式、模糊推理以及反模糊化等基本理论;从传统控制工程设计出发,将传统控制理论应用到模糊控制器的设计过程中;介绍了建立模糊控制系统仿真模型的方法及用 MATLAB 建立模糊推理系统和进行系统仿真的方法;此外,还论述了模糊控制系统稳定性分析方法以及稳定性准则;讲述了目前工程上较多采用的模糊控制与其他先进控制技术相结合的控制技术,分析其控制原理及控制系统设计方法。书中列举了很多模糊控制应用实例,具有一定的参考价值。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及其自动化、测控技术以及自动控制等相关专业高年级本科生、研究生教材,也可供有关工程技术人员和教师参考。

★ 本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

模糊控制技术/席爱民编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2008.6

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2015-2

I. 模… II. 席… III. 模糊控制—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 036459 号

策 划 马乐惠

责任编辑 张晓燕 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 17.25

字 数 405 千字

印 数 1~4000 册

定 价 24.00 元

ISBN 978-7-5606-2015-2/TP·1044

XDUP 2307001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

高等学校

自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化专业

“十一五”规划教材编审专家委员会名单

主任：张永康

副主任：姜周曙 刘喜梅 柴光远

自动化组

组长：刘喜梅（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

韦 力 王建中 巨永锋 孙 强 陈在平 李正明
吴 斌 杨马英 张九根 周玉国 党宏社 高 嵩
秦付军 席爱民 穆向阳

电气工程组

组长：姜周曙（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

闫苏莉 李荣正 余健明
段晨东 郝润科 谭博学

机械设计制造组

组长：柴光远（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

刘战锋 刘晓婷 朱建公 朱若燕 何法江 李鹏飞
麦云飞 汪传生 张功学 张永康 胡小平 赵玉刚
柴国钟 原思聪 黄惟公 赫东锋 谭继文

项目策划：马乐惠

策 划：毛红兵 马武装 马晓娟

前 言

模糊控制是近代控制理论中建立在模糊集合论基础上的一种基于语言规则与模糊推理的控制理论。它是智能控制的一个重要分支。

随着科学技术的飞速发展,在那些复杂的,受多因素影响的,严重非线性、不确定性、多样性的大系统中,传统的控制理论和方法越来越显示出其局限性。长期以来,人们期望以人类思维的控制方案为基础,创造出一种能反映人类经验的控制过程知识,并可以达到控制目的,能够用某种形式表示出来,而且这种形式既能够取代那种精密、反复、有错误倾向的模型建造过程,又能避免精密地估计模型方程中各种参数的过程。这就是模糊控制理论及其技术产生的背景。

模糊控制理论和方法的提出,归功于美国加利福尼亚大学电气工程系教授扎德(L. A. Zadeh)。他于1965年首次提出“模糊集合”的概念,1973年又进一步研究了模糊语言处理,这些理论研究给模糊控制理论提供了数学依据,为模糊控制打下了理论基础,使得有人的经验参与的控制过程成为实际的可能。1974年,英国伦敦大学教授玛达尼(E. H. Mamdani)制造出用于锅炉和蒸汽机的第一个模糊控制器,随后模糊控制理论的研究和应用技术迅猛发展。模糊控制系统的应用由工业过程扩展到人类社会活动的方方面面,如航天、航海、天气预报、机器人等。不仅如此,模糊控制还应用到心理学等社会科学领域。

本书是工院校自动化、电气工程及其自动化以及相关控制学科专业的高年级本科生、研究生教材。全书共9章。第1章绪论。第2章模糊逻辑的数学基础,采用简单、明了的符号表示模糊集合,着重于基本概念的论述,是学习本书的基础。第3章模糊逻辑控制原理,重点论述模糊控制器的结构、控制规则的形式、模糊推理以及反模糊化。第4章模糊逻辑控制器及模糊控制系统的设计,从传统控制工程设计出发,将传统控制理论应用到模糊控制器的设计过程中,紧扣工程应用论述模糊控制器的设计步骤及注意事项,使设计过程有章可循;在此基础上论述了建立模糊控制系统仿真模型的方法。第5章MATLAB辅助模糊系统设计,主要介绍使用图形界面工具建立模糊推理系统的方法和步骤。第6章模糊控制系统的非线性分析,重点介绍几种模糊控制系统稳定性分析方法以及稳定性准则。第7章模糊自适应控制,重点论述目前工程上实用的模糊控制与其他控制技术相结合的控制原理及控制系统设计方法,如模糊模型参考学习控制(FMRLC)、模糊监督控制、P-模糊-PI的多模态控制、具有修正因子的模糊控制、滞后过程的预估模糊控制等。第8章神经模糊控制,论述模糊控制与神经网络相结合的控制方法,体现了它们各自的优势。第9章模糊控制系统的应用,通过几个模糊控制应用例子,说明模糊控制的应用过程,同时也是对前几章内容的补充。本书附录给出了用MATLAB语言编写的模糊控制器伪码程序清单。

本书是在作者编写并使用多年的教学讲义的基础上，总结本人的教学经验，参考国内外相关的优秀教材编写而成的。书中反映了当前模糊控制的发展状况，讲解基本知识，特别是将模糊控制与传统控制技术相结合对模糊控制系统进行分析和设计，吸收传统控制的研究成果，使读者更容易深刻领会模糊控制系统的本质，更容易掌握模糊控制系统的设计方法。书中采用 MATLAB 进行系统仿真，易于工科院校相关专业的教学，也有助于学生的理解和掌握。

本书编写过程中，得到了西安建筑科技大学的大力支持，研究生司轶芳、刘芳园、张家良、行耿顺、郑荣等对书稿进行了多次校对，在此一并致谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，诚请读者批评指正。

席爱民
于西安建筑科技大学
2008 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 模糊控制的起源及发展	3
1.3 模糊控制理论的研究及应用	6
1.4 模糊控制展望	8
第 2 章 模糊逻辑的数学基础	11
2.1 模糊集合及其表示方法	11
2.1.1 经典集合	11
2.1.2 模糊集合	12
2.1.3 模糊集合的隶属函数	15
2.1.4 模糊集合的运算	22
2.1.5 模糊集合运算的基本性质	25
2.1.6 模糊集合与普通集合的关系	26
2.2 模糊语言逻辑及其算子	29
2.2.1 模糊语言逻辑	29
2.2.2 语言算子	31
2.3 模糊关系与模糊逻辑推理	33
2.3.1 模糊关系	33
2.3.2 模糊关系的合成	36
2.3.3 模糊逻辑推理	37
2.3.4 模糊逻辑推理方式和方法	38
2.4 解模糊判决方法	47
2.4.1 重心法	47
2.4.2 最大隶属度法	48
2.4.3 系数加权平均法	49
2.4.4 隶属度限幅元素平均法	49
2.4.5 中位数法	50
习题	51
第 3 章 模糊逻辑控制原理	54
3.1 传统控制方法	54
3.1.1 传统控制系统的结构与设计方法	54
3.1.2 传统控制的局限性	55
3.2 模糊逻辑控制工作原理	55
3.2.1 模糊控制器结构	55

3.2.2	选择模糊控制器的输入和输出	56
3.2.3	将控制知识装到模糊控制器的规则库	57
3.2.4	知识的模糊量化	60
3.2.5	匹配: 确定使用哪些规则(或激活哪些规则)	61
3.2.6	推理	64
3.2.7	将推理结果转换成实际作用	65
3.2.8	模糊决策的图形描述	67
3.3	模糊控制器的一般组成	68
3.3.1	模糊化	69
3.3.2	数据库	71
3.3.3	规则库	71
3.3.4	推理机(Inference Machine)	73
3.3.5	反模糊化(Defuzzification)	75
3.4	间接模糊推理方法	77
3.5	后件是函数形式的模糊推理方法	79
3.6	模糊控制器结构及其分类	81
	习题	83

第4章 模糊逻辑控制器及模糊控制系统设计 86

4.1	模糊控制器设计	87
4.1.1	模糊控制器设计要求	87
4.1.2	常规模糊控制器设计	88
4.1.3	PID 模糊控制器	90
4.2	模糊控制器的输出形式	91
4.2.1	位置式输出	91
4.2.2	增量式输出	92
4.3	模糊控制器参数与系统控制性能	92
4.3.1	模糊控制器输入、输出变量的论域	93
4.3.2	模糊控制器输入比例因子 K_e 及 K_c 的影响	94
4.3.3	隶属函数的分布对系统的影响	96
4.4	模糊控制器的非线性控制面	98
4.5	模糊控制器在控制系统中的实现	100
4.5.1	在线查表形式	101
4.5.2	在线推理	104
4.6	模糊控制规则的调整	109
4.7	模糊控制系统设计实例	113
4.7.1	温度控制系统	113
4.7.2	控制系统性能分析	119
	习题	122

第5章 MATLAB 辅助模糊系统设计 125

5.1	使用图形界面工具建立模糊推理系统	126
5.1.1	构建模糊推理系统	127

5.1.2 模糊推理系统的调试	131
5.2 MATLAB 仿真环境	132
5.2.1 MATLAB 仿真环境的建立	133
5.2.2 建立仿真系统	134
5.3 模糊控制系统仿真	139
5.3.1 构建模糊推理系统	140
5.3.2 建立 Simulink 仿真编辑环境	142
习题	143
第 6 章 模糊控制系统的非线性分析	144
6.1 概述	144
6.2 参数化模糊控制器	145
6.2.1 比例模糊控制器	145
6.2.2 PD 模糊控制器	146
6.3 李亚普诺夫(Lyapunov)稳定性分析	147
6.3.1 数学预备知识	147
6.3.2 李亚普诺夫意义下的稳定性	149
6.3.3 李亚普诺夫直接方法	151
6.3.4 李亚普诺夫间接方法	152
6.3.5 倒立摆控制稳定性分析	153
6.4 绝对稳定及圆稳定准则	155
6.4.1 绝对稳定性分析	155
6.4.2 举例: 温度控制系统	157
6.5 描述函数分析	160
6.5.1 预测极限环的存在及稳定性	160
6.5.2 单输入单输出系统	163
习题	165
第 7 章 模糊自适应控制	168
7.1 概述	168
7.2 模糊模型参考学习控制(FMRLC)	169
7.2.1 模糊控制器	170
7.2.2 参考模型	171
7.2.3 学习机	172
7.2.4 其他知识库修正器	175
7.2.5 模糊逆模型设计指南	175
7.3 模糊监督控制	177
7.3.1 概述	177
7.3.2 传统控制器的监督	177
7.3.3 模糊控制器的监督	183
7.4 P-模糊-PI 多模态控制系统	186
7.4.1 P-模糊-PI 控制系统	186
7.4.2 P-模糊 PID 控制系统	189

7.5 具有修正因子的模糊控制系统	190
7.5.1 用解析式描述的控制规则	191
7.5.2 带有调整因子的控制规则	192
7.6 滞后过程的预估模糊控制系统	194
7.6.1 施密斯(Smith)预估补偿算法	194
7.6.2 滞后过程的模型预估控制系统	196
7.6.3 欠阻尼过程预估模糊控制系统	198
习题	202
第8章 神经模糊控制	204
8.1 神经网络基础	204
8.1.1 神经元	205
8.1.2 人工神经网络	207
8.1.3 感知器的学习算法	209
8.1.4 神经网络学习的梯度算法	212
8.1.5 反向传播学习的 BP 算法	213
8.2 模糊神经网络	217
8.2.1 逻辑模糊神经网络	218
8.2.2 算术模糊神经网络	219
8.2.3 混合模糊神经网络	220
8.3 遗传算法	222
8.3.1 遗传算法的基本概念	222
8.3.2 遗传算法的原理	223
8.3.3 模糊神经网络的遗传学习算法	226
8.4 神经模糊控制	228
8.4.1 神经模糊控制器	229
8.4.2 神经模糊控制器的学习算法	232
8.4.3 多种神经元组成的神经模糊控制器	234
8.5 神经模糊控制系统	239
习题	243
第9章 模糊控制系统的应用	244
9.1 旋转倒立摆的平衡控制	244
9.1.1 旋转倒立摆	244
9.1.2 摆杆平衡模糊控制	246
9.2 模糊逆向推理(FIR)控制	250
9.3 直流电机模糊控制系统	253
9.4 模糊逻辑控制器在太阳能空调系统中的应用	257
9.4.1 概述	257
9.4.2 DC 电机模糊逻辑控制器的结构与计	258
附录	263
参考文献	265

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

在现实世界中,随着工业过程日益走向大型化、连续化、复杂化,很多系统极其复杂,具有高度的非线性、强耦合性、不确定性、信息不完全性和大时滞等特性,并存在苛刻的约束条件,使常规控制无法得到满意的控制效果。由此,先进的工业控制技术也就应运而生。先进控制的目标就是为了解决那些采用常规控制效果不佳甚至无法对付的复杂工业过程控制问题。先进控制的实现通常需要足够的计算能力作为支持,其主要技术内容有:过程辨识技术;过程变量的采集、处理和软测量技术;先进控制算法,如传统的串级、比值、前馈控制等和发展中的鲁棒控制、神经网络控制、模糊控制等以及过程的故障检测、预报、诊断和处理。

对于过程控制的发展阶段,不同的专家和学者有着不同的见解,但大多数学者认为过程控制大致经历了以下三个发展阶段。

第一阶段,在 20 世纪 70 年代以前,由于受到控制理论和控制工具的限制,过程工业的自动化水平相对来讲较低。当时的控制理论主要是经典控制理论,所用到的控制工具主要是常规仪表,控制系统绝大多数是单变量的简单控制系统。但对于复杂的对象,即对于高维、大时滞、严重非线性、耦合及严重不确定性现象,上述简单控制系统往往无能为力。

第二阶段,在 20 世纪 70~80 年代,基于现代控制理论的先进过程控制应运而生。出现先进过程控制的基础是:市场上先进控制工具的出现与完善,现代控制理论的不断发展与提高。

近年来,随着控制技术、计算机技术和通信技术的快速发展,出现了一种新的控制系统,称之为现场总线系统(Field Bus System)。它的特点是全数字化、全分散式、全开放、可互操作性和开放式网络化。它克服了 DCS 的一些缺点,对自动控制系统的体系结构、设计方法、安装调试方法和产品结构等产生了深远的影响。许多专家进一步研究发现,将控制、优化、调度、管理等集于一体的新的控制模式与信号处理技术、数据库技术、通信技术以及计算机网络技术进行有机结合而发展起来的高级自动化具有更重要的意义,因此也就出现了所谓综合自动化系统。这种系统称为计算机集成过程系统(Computer Integrated Process System, CIPS),可以认为是过程控制发展的第三阶段。

先进控制所涉及的各学科简介如下。

1. 自适应控制

自适应控制可以看做是一个能根据环境变化智能调节自身特性的反馈控制系统,以使系统按照一些设定的标准工作在最优状态。目前所研究的自适应控制系统最基本的有两大类,即参考模型自适应控制系统和具有被控对象数学模型在线辨识的自适应控制系统。一般地说,自适应控制在航空、导弹和空间飞行器的控制中很成功,但在工业过程控制应用中,传统的自适应控制并不尽如人意。

2. 鲁棒控制

鲁棒控制是一种着重控制算法可靠性研究的控制器设计方法。鲁棒性一般定义为在真实环境中为保证安全,要求控制系统最小必须满足的要求。鲁棒控制方法是指对时间域或频率域来说,一般假设过程动态特性的信息和它的变化范围。一些算法不需要精确的过程模型,但需要一些离线辨识。鲁棒控制系统的设计以一些最差的情况为基础,因此一般系统并不工作在最优状态。鲁棒控制方法适用于以稳定性和可靠性作为首要目标的应用,同时过程的动态特性已知且不确定因素的变化范围可以预估。过程控制应用中,某些控制系统也可以用鲁棒控制方法设计,特别是那些比较关键且不确定因素变化范围大、稳定裕度小的对象。鲁棒控制系统的设计要由高级专家完成,一旦设计成功,就不需太多的人工干预。另一方面,如果要升级或作重大调整,系统就要重新设计。

3. 最优控制

最优控制是现代控制理论的一个重要组成部分,成功应用于航天航空和军事领域,在许多方面改变了人们的生活。一个典型的最优控制问题描述如下:被控系统的状态方程和初始条件给定,同时给定目标函数,然后寻找一个可行的控制方法使系统从输出状态过渡到目标状态,并达到最优的性能指标。动态规划、最大值原理和变分法是最优控制理论的基本内容和常用方法。庞特里亚金极大值原理和贝尔曼动态规划是在约束条件下获得最优解的两个强有力的工具,应用于大部分最优控制问题。在实际应用中,最优控制很适用于航天航空和军事等领域,例如空间飞行器的登月、火箭的飞行控制和防御导弹的导弹封锁。工业系统中也有一些最优控制的应用,例如生物工程系统中细菌数量的控制等。然而,绝大多数过程控制问题都和流量、压力、温度及液位的控制有关,用传统的最优控制技术来控制它们并不合适。

4. 智能控制

智能控制是现代控制技术的又一个重要领域。关于智能控制有不同的定义。智能控制可以包括如下几种方法:学习控制,专家系统,模糊控制,神经网络控制,混合控制方法。

(1) 学习控制。学习控制采用模式识别技术获得控制回路当前的状态,然后根据回路状态、储存的历史信息和经验知识做出控制决定。由于学习控制受储存的知识限制,因而它至今还没有得到广泛的应用。

(2) 专家系统。专家系统将专家系统的理论与技术同控制理论方法与技术相结合,在未知环境下,仿效专家的智能,实现对系统的控制。专家控制系统使用一个知识库来做出控制决定,知识库由专家的经验知识、在线获得的系统信息和推理机组成。专家系统适用于生产计划、调度和故障诊断等决策问题,但不适用于解决连续控制问题。

(3) 模糊控制。与学习控制和专家系统不同,模糊控制以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础,模拟人的近似推理和决策过程。目前,在工业上投入运行的模糊控制器大都由一组模糊规则组成,通过一定的模糊推理机制确定控制作用。大量的工程实践表明,模糊控制主要适用于那些具有非线性和其建模复杂系统的控制。与采用精确数学模型的控制方法相比,模糊控制在处理不精确、控制具有高度不确定性的复杂系统时具有突出的优越性。虽然模糊控制已得到了广泛的应用,但模糊控制理论研究远未达到完善和成熟的地步,对于自适应模糊控制的稳定性、鲁棒性和全局性缺乏有效的数学分析手段。因此,在未来的研究工作中,有必要继续深入研究模糊控制和辨识的基本理论问题。

(4) 神经网络控制。神经网络控制是一种使用人工神经网络的控制方法。以非线性、大规模并行处理为主要特征的神经网络以生物神经网络为模拟基础,试图模拟人的形象思维以及学习和获取知识的能力。它具有学习、记忆、联想、容错、并行处理等多种能力,已在控制领域得到广泛的应用。目前提出的基于神经网络的控制方案有多种,主要包括:神经网络系统辨识、神经网络监督与评价学习控制、神经网络非线性控制、神经网络自适应控制等。

(5) 混合控制方法。专家系统、模糊逻辑、神经网络、遗传算法及其他技术的结合或混合、交叉结合为智能控制的设计方法提供了丰富的手段。混合控制方法有:模糊专家控制、神经网络专家控制、模糊神经网络专家控制等。

1.2 模糊控制的起源及发展

模糊控制(Fuzzy Control)是近代控制理论中建立在模糊集合上的一种基于语言规则与模糊推理的控制理论,它是智能控制的一个重要分支。

20 世纪中叶以来,在科学技术与工业生产的发展过程中,自动控制理论与技术的发展发挥了巨大的作用,并取得了令人满意的控制效果,是现代高新技术的重要手段之一。

成熟的数学处理不了许多实际问题。追溯到公元前,古代的中国人和希腊人就有了“随机数”的概念。为了能处理一些不正常的和不规则的问题,来自于现代技术和工业强烈的要求,产生了新的数学,其中包括模糊数学。

1965 年,美国加利福尼亚大学扎德(L. A. Zadeh)在一篇论文中首先提出模糊集合的概念。1973 年,扎德又进一步研究了模糊语言处理,给出了模糊推理的理论基础。1974 年,玛达尼(E. H. Mamdani)制造出用于锅炉和蒸汽机的第一个模糊控制器。1975 年,丹麦首先在工业上建立了模糊控制水泥窑。

在日本,Seiji Yasunobu 和 Soji Miyamoto 对模糊系统有着极大的兴趣。1985 年,他们提供了仿真,证明在仙台地铁采用模糊控制的优越性,他们的建议被采用了。1987 年,仙台地铁开始运行,采用模糊系统控制列车的加速、刹车及停靠站。

1987 年的另一个事件促进了人们对模糊系统的研究。那年在东京,在一个模糊研究成员的国际会议期间,Takeshi Yamakawa 通过一个简单的专用模糊逻辑芯片在倒立摆实验中的应用,证明了模糊控制的应用。倒立摆是个经典控制问题,通过车辆来回移动使得铰链上面的摆杆保持垂直位置。

这个示范给观察者留下了深刻的印象,稍后 Yamakawa 又做了个实验,他将一个盛水

的酒瓶或者一个活老鼠放在摆杆的顶端,系统仍能保持稳定。Yamakawa 最后组建了他自己的模糊系统研究实验室,在该领域中开发他的专利。在如此的示范之后,日本人沉迷于模糊系统,在工业和民用方面开发模糊系统。在 1988 年,他们建立了国际模糊工程实验室,协调 48 家模糊研究机构。从此,模糊理论的浪潮迅速蔓延到各个领域。到 20 世纪 90 年代初,模糊产品大量出现,可以说实践是模糊系统和控制理论发展的动力。

模糊控制理论和应用技术发展 30 多年来,虽然历史很短,但发展速度之快,成果之多和世人之重视却是少有的。特别是 1987 年,基于模糊控制的仙台地铁开通以后,各种家电的模糊产品相继研制成功并进入市场,如洗衣机、照相机、摄像机、复印机、吸尘器、电冰箱、微波炉、电饭锅、空调器、电视机、淋浴器等,这些家电产品在节约资源、方便使用及使用效果方面富有“人性味”。同时,各种各样的模糊控制系统也被研制成功,例如,各种熔炉、电气炉、水泥生成炉的控制系统,核能发电供水系统,汽车控制系统,电梯升降机控制系统,机器人控制系统以及活跃于航空、宇宙、通信领域里的专家系统。这些模糊控制系统的应用取得了明显的效益,并且受到了人们普遍的重视。

在美国和欧洲也完成了一些模糊逻辑控制系统的研究工作,而且开发出了一些采用模糊逻辑控制器的产品。近年来,有关模糊逻辑控制技术以及模糊控制理论得到了大量的研究,这就意味着它已变成一个很得力的工具,应用日益广泛。

模糊控制发展如此迅速,其原因何在?随着科学技术的迅猛发展,对自动控制系统的控制精度、响应速度、系统稳定性和适应能力的要求越来越高,对大多数复杂的被控对象,采用传统的控制方法往往难以收到满意的控制效果。而模糊控制综合了专家的经验,具有不依赖被控对象的精确数学模型,设计简单,便于应用,抗干扰能力强,响应速度快,易于控制和掌握,对系统参数的变化有较强的鲁棒性等特点,在经典控制理论和现代控制理论难以应用的场合发挥了很大的作用,已经成为智能控制的主要分支。

传统控制器的设计都建立在被控对象的精确数学模型基础上,但是,在许多情况下,被控对象(或生产过程)的精确数学模型很难建立。例如,有些对象难以用一般的物理和化学方面的规律来描述;有的影响因素很多,而且相互之间又有交叉耦合,使其模型十分复杂。在这些模型方程中,含有众多的参数需要估计,求解这些参数却往往缺少足够的信息量与信息特征;简化后的数学模型不能准确地说明原来的系统,以至于没有实用价值;还有一些生产过程缺乏适当的测试手段,或者测试装置不能进入被测试区域,致使无法建立过程的数学模型。而且,随着科学技术的迅猛发展,目前研究的控制系统更多地涉及多变量、非线性、时变的大系统,建立数学模型是非常困难的,或者是根本不可能的,系统的复杂性与控制技术的精确性形成了尖锐的矛盾。于是,传统的控制理论和技术面临着新的控制要求的挑战。要想精确地描述复杂现象和系统的任何现实的物理状态,事实上是办不到的。虽然常规自适应控制技术可以解决一些问题,但范围依然有限。上述情况迫使人们在控制系统的精确性与有意义之间寻求某种平衡和折中,而使问题的描述具有实际意义。

另一方面,人们注意到,对于很多复杂的生产过程,即使不知道该过程的数学模型,有经验的操作人员也能够根据长期的实践观察和操作经验进行有效的控制,而采用传统的自动控制方法效果并不理想。人的经验参与控制过程的成功,激发了人们对控制原理的深入研究。这种原理是以能包含人类思维的控制方案为基础的,它反映了人类经验参与控制过程的知识,以及可以达到的控制目的能够利用某种形式表达出来,同时还很容易被实

现。这样的控制系统既避免了那种精密、反复、有错误倾向的模型建造过程，又避免了精密地估计模型方程中各种参数的过程。在多变量、非线性、时变的大系统中，人们可以采用简单灵活的控制方式，于是就产生了一个问题：能否把人的操作经验总结为若干条控制规则，并设计一个装置去执行这些规则，从而对系统进行有效的控制？模糊控制理论与技术由此而生，这就是模糊控制产生的背景。

模糊控制最重要的特征是反映人们的经验以及人们的常识推理规则，而这些经验与常识推理规则是通过语言来表达的。比如说“温度太高，温度上升的速度也很快，则大幅度降温控制”。对于用语言表达的这种经验，必须给出一种描述的方式，而且这种经验是多种多样的。比如，还可以有经验规则“温度稍低，升温的速度很快，则稍微降温控制”。模糊控制规则综合考虑众多的控制策略，是一种常识推理规则。

当然，由于对系统缺乏了解，一开始控制效果可能并不好，但经过若干次探索后终归能实现预期的理想控制。这说明传统控制理论必须向前发展，而人工智能、模糊控制就是在这种背景下产生并发展起来的。也就是说，控制问题在经历了人工控制、经典控制理论和现代控制理论阶段之后，由于它们面临着一系列无法解决的问题，因而要重新研究人工控制行为的特点，以便从人工控制中得到新的启发。

传统控制理论主要解决线性系统的控制问题，而对于那些很难提出数学方程但人们却有丰富控制经验的实际课题，模糊控制技术发挥了奇特的优势。特别是近几年来，模糊控制技术取得了迅速发展。可以预料，在传统控制的难题中，有一批难题可以应用模糊控制技术或者用传统控制技术与模糊控制技术相结合的方法来加以解决。

扎德教授提出的模糊集合论，其核心是对复杂的系统或过程建立一种语言分析的数学模式，使自然语言能直接转化为计算机所能接受的算法语言。模糊集合理论的诞生为处理客观世界中存在的一类模糊性问题提供了有力的工具，同时，也适应了自适应科学发展的迫切需要。

以模仿人类人工控制特点而提出的模糊控制虽然带有一定的主观性和模糊性，但往往简单易行，而且行之有效。模糊控制的任务正是要用计算机来模拟这种人的思维和决策方式，对复杂的生产过程进行控制和操作。

从以上背景可以看出，模糊控制有以下特点：

(1) 模糊工程的计算方法虽然是运用模糊集合理论进行的模糊算法，但最后得到的控制规律是确定性的、定量的条件语句。

(2) 不需要根据机理与分析建立被控对象的数学模型。对于某些系统，要建立数学模型是很困难的，甚至是不可能的。

(3) 与传统的控制方法相比，模糊控制系统依赖于行为规则库。由于用自然语言表达的规则更接近于人的思维方法和推理习惯，因此，便于现场操作人员的理解和使用，便于人机对话，以得到更有效的控制规律。

(4) 模糊控制与计算机密切相关。从控制角度看，它实际上是一个由很多条件语句组成的软件控制器。目前，模糊控制还是应用二值逻辑的计算机来实现的，模糊规律经过运算，最后还是进行确定性的控制。模糊推理硬件的研制与模糊计算机的开发，使得计算机将像人脑那样随心所欲地处理模棱两可的信息，协助人们决策和进行信息处理。

1.3 模糊控制理论的研究及应用

1. 模糊控制理论的研究与进展

正如上面所叙述的那样,20世纪70年代初,扎德在模糊映射、模糊推理和模糊控制原理等方面进行了一系列研究工作,特别是提出和完善了模糊知识表示、语义变量、模糊规则(IF-THEN)及模糊图等概念,开创了模糊控制新历程,也为模糊建模和模糊控制的发展奠定了理论基础。模糊控制理论的研究大致有以下几方面。

(1) 自学习、自适应模糊控制理论的研究。模糊控制的实质是将相关领域的专家知识和熟练操作人员的经验,转换成模糊化后的语言规则,通过模糊推理与模糊决策,实现对复杂系统的控制。然而,一个复杂受控系统往往具有非线性、大时滞、不确定性和时变性,单纯依靠基于人为信息的有限多条模糊规则,很难完善地描述和适应复杂受控对象的多变性。如何在控制过程中自动地修改、调整和完善模糊控制规则,来提高模糊系统的控制性能,逐步达到良好的控制效果,成为自学习、自适应模糊控制理论研究的主要内容。

(2) 模糊推理策略的研究。模糊推理策略对模糊控制器的设计和模糊控制系统的性能起着重要作用。目前所采用的模糊推理策略有四种:由相应作者名命名的 Mamdani 推理、Tsukamoto 推理、Larsen 推理和 Takagi 推理。这些推理策略的共同点是,其模糊性都取决于模糊规则的前提条件和结论部分的语言描述;不同点是模糊模型与(或)推理合成算子的选择。

(3) 模糊模型辨识的研究。模糊控制理论研究中,模糊模型的辨识研究具有非常重要的意义。所谓模糊模型,就是指描述受控系统性能的一组模糊规则,尽管它可以有多种表示形式,但都属于非线性模型,易于用来表达非线性时变系统。模糊模型的辨识在控制、规划、决策、统计和分析等领域中得到广泛应用。模糊模型辨识方法有: Hirota 和 Pedrycz 提出的采用参考模糊集的概念进行模糊辨识; Pedrycz 提出的用概率统计方法来确定模糊系统关系矩阵的模糊辨识;由日本学者 Takagi 和 Sugeno 提出的一种动态系统的模糊模型辨识方法,被称为 T-S 模型。T-S 模型基于系统局域线性化,模糊规则结论用线性多项式表示,用来拟合受控对象的非线性特性,具有逼近能力强和结构简单等特点,目前在模糊辨识中被广为采用,成为复杂受控系统建模的有效方法。

(4) 模糊系统稳定性的研究。稳定性分析对于任何一类控制系统都是十分重要的性能指标和研究课题,模糊控制系统也不例外。由于模糊控制器是一种基于规则的“语言型”控制器,难以用数学式子来描述,因此对它的各种性能分析也相当困难。早期对模糊系统的稳定性理论研究,主要都是针对开环模糊控制系统模型进行稳定性分析的。此后有了针对单变量闭环模糊控制系统的稳定性分析方法,并给出了系统稳定条件。目前有很多关于模糊控制系统稳定性的理论研究,取得了 many 研究成果,但至今还没有一种统一和完善的模糊系统稳定性分析方法。

2. 模糊控制与其他先进控制理论的结合

20 世纪中后期发展起来的各类先进控制理论,如神经网络、遗传算法等引起国内外大学者的关注和研究兴趣,他们将这些控制理论与模糊控制结合起来,作为一类模糊控制

的新理论方向进行研究。

1) 模糊预测控制

模糊预测控制是指把各种预测控制的典型算法与模糊控制理论相结合,构成一种以模糊控制为主体的集成控制策略。若以预测控制为主体,则被称为预测模糊控制,以示其主、辅关系。模糊预测控制利用模糊控制和预测控制各自的特点,以达到互补的目的。国内外学者近几年的主要研究成果如下:

(1) 模糊控制和预测控制的集成。例如设计一种预测模糊专家控制器,通过建立对象的预测模型获得超前预测误差来调整模糊控制规则。

(2) 基于模糊模型的预测控制。这类模糊预测控制是在预测控制总体结构下,用模糊模型作为预测模型。

(3) 基于优化目标的模糊预测控制。一个以优化为目标的控制系统,首先考虑的是系统控制性能的改善。从决策角度出发处理复杂问题,希望得到满意的控制效果,从而使其更符合复杂工业生成过程的要求,这是模糊预测控制的又一个新的研究方向。

(4) 模糊内模控制。内部模型控制(Internal Model Control, IMC, 简称内模控制)是20世纪80年代发展起来的一种得到成功应用的预测控制算法。内模控制向智能化内模控制方向发展,其途径是将模糊逻辑理论和内模控制技术相结合的模糊内模控制方法(FIMC)。其核心问题是如何建立被控对象的模糊内部模型:一是通过模糊辨识的方法建立被控对象的内部模型(辨识方法有模糊语言辨识、模糊关系辨识和动态模糊模型辨识等),基本上都是离线辨识;二是针对复杂生成过程建立定性的模糊内部模型,如基于模型的模糊定性控制方法,以适应非线性、时变、大时滞被控对象的要求。此外,在传统预测控制算法的基础上,提出了一种不要求被控对象精确数学模型的模糊模型控制器。

2) 模糊神经网络控制

模糊系统和神经网络在信息处理过程中均表现出很强的容错能力。但是它们各自都具有鲜明的特点:模糊系统擅长处理定性的知识,能使人们的熟练操作经验和专家知识以规则的形式存于模糊系统中,用来解决那些具有不确定性、模糊性的复杂系统控制问题,但它缺乏自学习能力,模糊规则和隶属度函数的确定依赖于专家知识与熟练操作人员的经验;而神经网络具有较强的自学习能力,可以直接从系统的输入、输出数据中学习得到其网络结构模型,但神经网络学习完成后,其由权值所描述的系统模型很难被人们直观理解,不能加入对象的先验知识,也不能作必要的修改。

目前把包含有神经网络和模糊控制功能的系统统称为模糊神经系统(或神经模糊系统),它既有模糊系统所具有的透明的语言结构,又有分布式记忆与并行处理的特点,具有能逼近任意非线性函数以及自学习等功能。这方面的研究通常有:

(1) 在模糊控制系统框架下,利用神经网络的学习功能来进行模糊化、模糊推理与解模糊等自调整过程,获得优化了的模糊规则与隶属度函数,实现具有自学习功能的模糊控制器。

(2) 模糊神经网络在复杂系统模型辨识和控制系统中的应用。

(3) 用模糊逻辑增强神经网络的功能。目前这方面的研究成果还较少,主要是研究如何利用模糊逻辑提高神经网络的学习速度。