

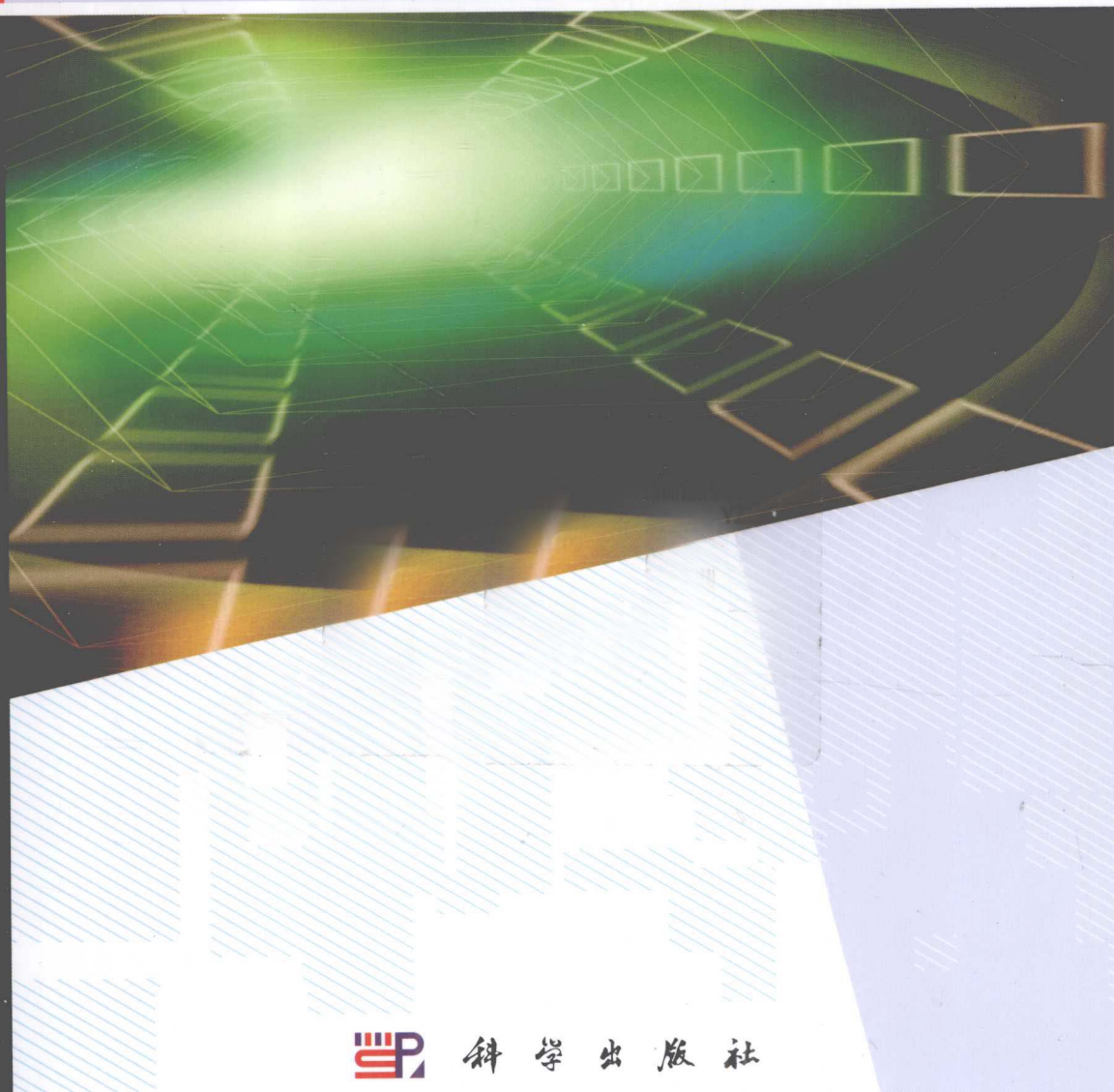


智能

科/学/技/术/著/作/丛/书

多变量系统模糊/神经网络自适应控制

刘国荣 著



科学出版社

智能科学技术著作丛书

多变量系统模糊/神经网络 自适应控制

刘国荣 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍了不确定非线性多变量系统模糊/神经网络自适应控制的基本内容和方法,力图概括国内外最新研究成果。主要内容包括多变量线性系统自适应模糊解耦控制,多变量非线性系统自适应模糊 H_∞ 控制,多变量非线性系统自适应模糊/神经网络解耦控制,多变量非线性系统自适应模糊/神经网络滑模控制,多变量非线性系统 H_2/H_∞ 混合模糊控制,多变量非线性系统在线自适应神经网络控制。

本书主要读者为高等学校控制理论与控制工程专业以及相关专业的教师和研究生,亦可供从事自动控制研究的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

多变量系统模糊/神经网络自适应控制/刘国荣著. —北京:科学出版社,2012

(智能科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-033377-3

I. ①多… II. ①刘… III. ①多变量系统-人工神经网络-自适应控制-研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 009172 号

责任编辑:刘宝莉 孙伯元 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达版艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:233 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《智能科学技术著作丛书》序

“智能”是“信息”的精彩结晶,“智能科学技术”是“信息科学技术”的辉煌篇章,“智能化”是“信息化”发展的新动向、新阶段。

“智能科学技术”(intelligence science& technology, IST)是关于“广义智能”的理论方法和应用技术的综合性科学技术领域,其研究对象包括:

- “自然智能”(natural intelligence, NI),包括“人的智能”(human intelligence, HI)及其他“生物智能”(biological intelligence, BI)。

- “人工智能”(artificial intelligence, AI),包括“机器智能”(machine intelligence, MI)与“智能机器”(intelligent machine, IM)。

- “集成智能”(integrated intelligence, II),即“人的智能”与“机器智能”人机互补的集成智能。

- “协同智能”(cooperative intelligence, CI),指“个体智能”相互协调共生的群体协同智能。

- “分布智能”(distributed intelligence, DI),如广域信息网、分散大系统的分布式智能。

“人工智能”学科自 1956 年诞生的,五十余年来,在起伏、曲折的科学征途上不断前进、发展,从狭义人工智能走向广义人工智能,从个体人工智能到群体人工智能,从集中式人工智能到分布式人工智能,在理论方法研究和应用技术开发方面都取得了重大进展。如果说当年“人工智能”学科的诞生是生物科学技术与信息科学技术、系统科学技术的一次成功的结合,那么可以认为,现在“智能科学技术”领域的兴起是在信息化、网络化时代又一次新的多学科交融。

1981 年,“中国人工智能学会”(Chinese Association for Artificial Intelligence, CAAI)正式成立,25 年来,从艰苦创业到成长壮大,从学习跟踪到自主研发,团结我国广大学者,在“人工智能”的研究开发及应用方面取得了显著的进展,促进了“智能科学技术”的发展。在华夏文化与东方哲学影响下,我国智能科学技术的研究、开发及应用,在学术思想与科学方法上,具有综合性、整体性、协调性的特色,在理论方法研究与应用技术开发方面,取得了具有创新性、开拓性的成果。“智能化”已成为当前新技术、新产品的发展方向 and 显著标志。

为了适时总结、交流、宣传我国学者在“智能科学技术”领域的研究开发及应用成果,中国人工智能学会与科学出版社合作编辑出版《智能科学技术著作丛书》。需要强调的是,这套丛书将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大智能科学技术工作者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,《智能科学技术著作丛书》将为繁荣我国智能科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

祝《智能科学技术著作丛书》出版,特赋贺诗一首:

**智能科技领域广
人机集成智能强
群体智能协同好
智能创新更辉煌**

中国人工智能学会荣誉理事长

2005年12月18日

前 言

随着社会经济、科学技术的发展和新型工业化的推进,控制对象变得越来越复杂,人们对控制提出的要求越来越高。很多被控对象具有多变量、非线性、时变性、强耦合、大滞后、分布参数和多种外部干扰等特性,难以建立起精确的数学模型;另外,面对的对象环境愈来愈复杂,存在着许多不确定性。对于这类系统,经典控制理论和现代控制理论显得无能为力,而智能控制理论的发展,为解决这类系统的控制问题开辟了一个新的途径。智能控制包括了模糊控制、神经网络控制和专家系统控制等,它们不依赖或不完全依赖被控对象的数学模型。自 20 世纪 70 年代以来,针对控制对象及其环境、目标和任务的不确定性和复杂性的模糊控制、神经网络控制方法得到了快速发展,取得了许多成果。对于不确定非线性多变量系统的控制,发展较快的有自适应模糊控制、自适应神经网络控制、自适应模糊神经网络控制、自适应模糊滑模控制以及自适应神经网络滑模控制等。

本书围绕“模型未知的非线性多变量系统模糊/神经网络自适应控制”这一主题组织内容。按照不同的控制方法,将近十年来在不确定非线性多变量系统控制领域应用智能控制理论中取得的成果进行归纳、分类。主要介绍不确定非线性多变量系统模糊/神经网络自适应控制的基本内容和方法,内容包括多变量非线性系统自适应模糊 H_∞ 控制、多变量非线性系统自适应模糊/神经网络解耦控制、多变量非线性系统自适应模糊/神经网络滑模控制、多变量非线性系统 H_2/H_∞ 混合模糊控制、多变量非线性系统的在线自适应神经网络控制等。本书的内容主要取材于作者在各种期刊和国际会议上公开发表的论文,同时融入国内外学者在该领域取得的优秀研究成果,力求全面、系统地概括国内外最新研究成果,反映发展动态。

书中部分内容引用了国内外专家、学者的研究成果,在此谨向他们致以诚挚的谢意。

本书介绍的研究成果得到了国家自然科学基金(51177040、61174211)、湖南省自然科学基金重点项目(09JJ8006、10JJ8004)和面上项目(01JJY2062、05JJ40093)的资助,在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

目 录

《智能科学技术著作丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 自适应模糊控制	2
1.3 自适应神经网络控制	5
1.4 自适应模糊神经网络控制	6
1.5 自适应模糊/神经网络滑模控制	7
第 2 章 模糊控制与神经网络控制理论基础	8
2.1 模糊逻辑与模糊推理	8
2.1.1 模糊语言变量	8
2.1.2 模糊蕴含关系	8
2.1.3 模糊推理	10
2.1.4 基于控制规则库的模糊推理	11
2.2 模糊逻辑系统	12
2.2.1 模糊逻辑系统的组成	12
2.2.2 模糊逻辑系统的分类	15
2.2.3 常见的模糊逻辑系统	17
2.3 模糊逻辑系统的万能逼近理论	18
2.3.1 高斯型模糊逻辑系统的万能逼近理论	18
2.3.2 广义隶属度型模糊逻辑系统的万能逼近理论	19
2.4 神经网络模型	21
2.4.1 人工神经元模型	21
2.4.2 神经网络结构及特点	22
2.5 前馈神经网络	23
2.5.1 BP 神经网络	23
2.5.2 RBF 神经网络	27
2.5.3 RBF 神经网络与 BP 神经网络的比较	28
2.6 模糊神经网络	28
2.6.1 基于标准模糊逻辑系统的模糊神经网络	29

2.6.2	基于 T-S 模糊逻辑系统的模糊神经网络	31
第 3 章	多变量线性系统自适应模糊解耦控制	34
3.1	单输入单输出系统模型参考自适应模糊控制	34
3.1.1	模型参考自适应模糊控制系统的结构	34
3.1.2	基于 T-S 模糊模型的模糊自适应机构的设计	35
3.1.3	闭环系统稳定性及其性能分析	39
3.1.4	量化因子和输出比例因子的选择	41
3.1.5	无抖动模糊控制器	42
3.1.6	基于无抖动模糊控制器的模型参考自适应模糊控制系统稳定性分析	44
3.2	多输入多输出系统自适应模糊解耦控制	47
3.2.1	模型参考自适应模糊解耦控制	47
3.2.2	仿真	51
第 4 章	多变量非线性系统自适应模糊 H_∞ 控制	54
4.1	反馈线性化基本理论	54
4.2	多输入多输出非线性系统自适应状态反馈模糊 H_∞ 控制	57
4.2.1	问题的描述	57
4.2.2	自适应模糊控制器的设计	58
4.2.3	仿真	64
4.3	多输入多输出非线性系统自适应输出反馈模糊 H_∞ 控制	66
4.3.1	问题的描述	66
4.3.2	自适应模糊控制器的设计	67
4.3.3	仿真	71
第 5 章	多变量非线性系统自适应模糊/神经网络解耦控制	75
5.1	多输入多输出非线性系统间接自适应模糊解耦控制	75
5.1.1	问题的描述	75
5.1.2	设计思想	76
5.1.3	间接自适应模糊解耦控制系统的设计与稳定性分析	77
5.1.4	仿真	83
5.2	多输入多输出非线性系统直接自适应模糊解耦控制	86
5.2.1	设计思想	86
5.2.2	直接自适应模糊解耦控制系统的设计与稳定性分析	87
5.2.3	仿真	93
5.3	基于神经网络干扰观测器的多输入多输出非线性系统解耦控制	96
5.3.1	问题的描述	96
5.3.2	RBF 神经网络干扰观测器与 H_∞ 控制器设计	98

5.3.3 仿真	101
第 6 章 多变量非线性系统自适应模糊/神经网络滑模控制	103
6.1 多输入多输出非线性系统自适应模糊滑模控制	103
6.1.1 问题的描述	103
6.1.2 自适应模糊滑模控制器的设计	104
6.1.3 仿真	108
6.2 多输入多输出非线性系统自适应神经网络滑模控制	110
6.2.1 问题的描述	110
6.2.2 自适应神经网络滑模控制器的设计	111
6.2.3 仿真	121
6.3 多输入多输出非线性系统自适应输出反馈神经网络滑模控制	125
6.3.1 问题的描述	125
6.3.2 自适应输出反馈神经网络滑模控制器的设计	127
6.3.3 仿真	130
第 7 章 多变量非线性系统 H_2/H_∞ 混合模糊控制	132
7.1 H_2/H_∞ 混合控制	132
7.2 多输入多输出非线性系统 H_2/H_∞ 模糊状态反馈控制	134
7.2.1 问题的描述	134
7.2.2 H_2/H_∞ 模糊状态反馈控制	137
7.2.3 系统稳定性分析	143
7.3 多输入多输出非线性系统 H_2/H_∞ 模糊输出反馈控制	144
7.3.1 问题的描述	144
7.3.2 H_2/H_∞ 模糊输出反馈控制	146
7.3.3 系统稳定性分析	149
第 8 章 多变量非线性系统的在线自适应神经网络控制	150
8.1 广义模糊神经网络的在线学习	150
8.1.1 广义模糊神经网络的结构	150
8.1.2 广义模糊神经网络的学习算法	152
8.2 多输入多输出非线性系统的 G-FNN 逆模型	159
8.3 多输入多输出非线性系统的自适应模糊神经网络控制	160
8.3.1 自适应模糊神经网络控制器的结构	160
8.3.2 自适应模糊神经网络控制器的收敛性分析	162
8.3.3 自适应模糊神经网络控制系统稳定性分析	163
8.3.4 仿真	164
8.4 RBF 神经网络的在线学习	171

8.4.1	RBF 神经网络的结构	171
8.4.2	GP-RBF 算法	172
8.5	多输入多输出非线性系统自适应 RBF 神经网络控制	176
8.5.1	自适应 RBF 神经网络控制器的结构	176
8.5.2	自适应 RBF 神经网络控制器的收敛性分析	177
8.5.3	自适应 RBF 神经网络控制系统稳定性分析	178
8.5.4	仿真	179
参考文献		183

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

多变量系统是指具有多个输入和多个输出的系统。它广泛地存在于实际生产中,单变量系统是它的一种特殊情况。

多变量系统包括多变量线性系统和多变量非线性系统。对于多变量线性系统,现代控制理论给出了成熟的分析和综合方法,包括线性系统的状态空间法、几何理论、代数理论和多变量频率方法。对于多变量非线性系统,由于其输入与输出之间关系是非线性的,它的分析和综合比线性系统复杂得多,其研究进展缓慢。与线性系统控制理论已相当成熟截然不同,多变量非线性系统的控制远未成熟。

早期对于非线性系统控制的一些成果,如描述函数法、相平面法、李雅普诺夫(Lyapunov)法、波波夫(Popov)法、输入输出稳定法、近似线性化法(即局部线性化法)和滑模变结构控制法等,虽已应用于实际非线性系统的控制,但各有其局限性,都不能处理较复杂一般形式的多变量非线性系统。

利用反馈的方法将非线性系统变换为线性系统,然后再按线性系统理论完成系统综合的方法,称为反馈线性化方法,是非线性系统控制研究方向的一次重要突破。经过二十多年的发展,反馈线性化方法已经成为非线性系统控制理论中一种有效的方法,包括微分几何方法和逆系统方法等。

但是,现代控制理论和反馈线性化方法需要建立精确的数学模型(如传递函数、微分方程和状态方程),再根据数学模型和分析结果设计出合适的控制器。在实际应用中,很多被控对象或过程非常复杂,其数学模型随时间和工作环境的改变而改变,其变化规律往往事先未知。很多被控对象具有非线性、强耦合、大滞后、时变性、变结构、多层次、多干扰因素以及各种不确定性,难以建立起精确的数学模型。

为解决上述问题,控制理论工作者采取的方法之一是系统辨识。系统辨识就是在输入输出数据的基础上从一组给定的模型类中确定一个与所测系统等价的模型。现代辨识理论从 20 世纪 60 年代起步,70 年代末期开始算法收敛性、参数估计统计特性理论的研究和在线递推算法的研究,80 年代着力于“黑箱”辨识,直到 90 年代以上分析与技术已经基本成熟。其应用除了系统的设计与控制外,还有系统仿真、系统预测、系统分析与故障诊断以及验证机理模型等方面,已经应用到工

业过程、航空、航天、生物、医学工程、经济、社会、人口、生态环境与水文地质等众多领域。应用结果表明,如果系统是线性的,总可以在现有的模型中找到合适的描述模型;但对于非线性系统,目前还找不到易于处理的统一的数学模型。现有的进展还只是在某些特殊类型的非线性系统的慢时变方面。

理论工作者采取的方法之二是自适应控制。自适应控制有直接和间接两种方式:前者是通过辨识对象本身的数学模型来调整控制器的参数,后者则是估计控制器的参数。自适应控制的广泛研究始于 20 世纪 70 年代,主要有模型参考自适应控制(model reference adaptive control, MRAC)和自校正控制(self tuning control, STC),它们根据输入输出数据,在线地调整控制器参数。其中,MRAC 是在系统中引入参考模型,通过比较实际对象与参考模型的动态响应差别来调整控制器。稳定性曾是推动 MRAC 发展的主要因素。一般参考模型都比较简单,当存在未建模高频特性时,有可能引起系统失稳。20 世纪 80 年代,鲁棒性研究成为自适应控制研究的热点。STC 一边辨识对象的参数,一边利用这些参数调整控制器的参数进行控制。参数估计收敛性分析是 STC 研究中的重要课题。自适应理论仍处于发展阶段,应用例子也与日俱增,但它从一开始就存在如下两个缺点:在理论分析上,要求系统参数变化速率大大低于控制器参数的适配过程,也就是说理论上还只能分析参数慢时变过程;在应用对象上,仅在线性系统的自适应控制上取得了较大进展,对于非线性系统,目前的方法一筹莫展。人们为寻求在非线性和时变的自适应控制理论上的重大突破,曾使用微分几何方法、预测控制算法以及 H_∞ 设计理论等方法,但这些方法原则上还是没有摆脱基于数学模型的定量化思想。另一方面,微分几何方法、 H_∞ 理论等深奥数学工具的引入也使得控制这门技术科学界的大多数人望而却步,应用的范围受到了极大的限制。

智能控制理论的发展,为解决复杂多变量系统的控制问题开辟了一个新的途径。智能控制包括模糊控制、神经网络控制以及专家系统控制等,它们不依赖或不完全依赖被控对象的数学模型。自 20 世纪 70 年代以来,针对控制对象及其环境、目标和任务的不确定性和复杂性的模糊控制、神经网络控制方法得到了快速发展,取得了许多成果。对于复杂多变量系统的控制,发展较快的有自适应模糊控制、自适应神经网络控制、自适应模糊神经网络控制、自适应模糊滑模控制以及自适应神经网络滑模控制等。

1.2 自适应模糊控制

1965 年,美国控制论专家 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。之后又发展模糊系统与模糊控制的基本概念及理论基础。1974 年,英国的 Mamdani 把模糊语言逻辑用于控制并获得成功,标志着模

糊控制的诞生。Mamdani 发展的模糊控制器被以后的研究工作者广泛应用,该控制器一般被称为经典模糊控制器。经典的模糊控制器是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。自 20 世纪 70 年代以来,经典模糊控制在实际生产过程中得到了许多成功的应用。从本质上讲,经典模糊控制将专家或操作人员的语言控制规则转化为自动控制策略。然而,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的。特别是对于那些时变的、非线性的复杂系统,人们的认识还不够,要建立完善的控制规则就更加困难。所以经典模糊控制主要应用于一些不太复杂,控制质量要求也不是太高的系统。对于那些复杂的系统或控制质量要求较高的系统,为了获得良好的控制效果,人们自然想到模糊控制器应向着自适应、自组织和自学习的方向发展,使得模糊控制参数或规则在控制过程中能自动地调整、修改和完善,从而使系统的控制性能不断改善,达到最佳的控制效果。于是,自适应模糊控制也就应运而生了。

自适应模糊控制是自适应控制与模糊控制相结合的产物。自适应模糊控制器的研究最早是由 Procyk 和 Mamdani 于 1979 年提出的,称作语言自组织模糊控制器。从此,自适应模糊控制理论得到了快速发展,提出了多种类型的自适应模糊控制器。

1. 一般自适应模糊控制器

早期提出的自适应模糊控制器主要有自组织模糊控制器、自校正模糊控制器和模型参考自适应模糊控制器三种。

自组织模糊控制器最早由 Procyk 和 Mamdani 提出。之后,许多科研工作者提出了各种改进和完善的方法。它能自动地对模糊控制规则进行修正、改进和完善,以不断提高控制系统的性能。如 Maeda 等提出了一种规则调节方法。他用超调量、上升时间和振幅值的最小优良度来做模糊性能指标,根据输入模糊变量的值,修改控制规则的后件。Song 等提出了一个模糊动态学习控制器。该控制器能自动调整它的控制规则,并能自动产生新的模糊控制规则。Kim 等提出使用多规则库控制器,将对象参数的变化范围进行分割,不同范围对应不同的规则库,采用不同的控制参数,利用系统辨识器观测参数变化,进行规则库的切换。自组织模糊控制器存在三个不足:规则修正后,原来的控制规则完全消失;计算工作量大,计算费时;对于多输入多输出系统,关系矩阵太大,计算机难以存储。

自校正模糊控制器根据辨识器辨识的内容,可以分为两类:一类是辨识被控对象的数学模型或其主要参数,然后调整模糊控制器参数,使控制回路保持最佳的品质,这类控制方法适用于在线实时控制,但一般要求有良好的辨识结果;另外一类是辨识控制回路的性能指标,如超调量、响应时间和振幅等,然后调整模糊控制器,使控制回路性能指标达到最优,或达到预定的要求。这类自适应控制方法比较简

单,计算量较少。但需要周期性地观察控制回路的性能指标,因此调整时间较长。

自校正模糊控制器主要有控制规则自调整模糊控制器和量化因子(比例因子)自调整模糊控制器。Rong 和 Wang 提出了解析描述的模糊控制规则 $U = -\langle \alpha E + (1 - \alpha)EC \rangle$, 为研究自适应模糊控制提供了新途径。在此基础上, Wu 和 Wang 等进一步研究,提出了规则自调整模糊控制器(rule self-regulating fuzzy controller, RSFC),通过调节调整因子 α ,改变对误差和误差变化率的加权程度,从而调节模糊控制规则。这种方法简单方便,易于实现。Maeda 等给出了模糊性能指标 FP 的一种定义,定义它为系统超调量、上升时间和振幅的最小优良度,用来评价系统控制品质。系统根据 FP 来实时修改控制规则的后件和量化因子。量化因子自调整模糊控制器研究的较多,主要的一种方法是根据专家的知识 and 经验,建立量化因子(比例因子)调整规则表。

模型参考自适应模糊控制(model reference adaptive fuzzy control, MRAFC)是由线性控制理论中的模型参考自适应控制发展而来的。在 MRAFC 系统中包含一个模型。该模型用来实时描述过程的动态或表示一种理想的动态,这个模型称为参考模型。将被控过程输出与参考模型输出进行比较。模糊自适应机构根据比较所得的偏差大小来调节控制器参数,使系统的输出等于参考模型的输出。这种系统由于采用模糊集合理论设计自适应机构,不需要对被控对象建立精确的数学模型。

早期的自适应模糊控制器被称为一般自适应模糊控制器。相对经典模糊控制器来说,一般自适应模糊控制器向前迈进了一大步。但它还存在许多不完善的地方,缺乏系统的设计方法,设计过程带有试凑(trial and error)的味道,自适应模糊控制系统的稳定性未给出证明。

2. 稳定自适应模糊控制器

与传统控制理论相比,模糊控制有两大不可比拟的优点:第一,模糊控制可以系统地利用人的语言信息,有效且便捷地实现人的控制策略;第二,模糊控制可以不需要被控对象的数学模型而实现较好的控制。这是因为被控对象的动态特性已隐含在模糊控制器输入、输出模糊集及模糊规则中。模糊控制因为具有这两大优点,备受人们欢迎。未知非线性系统的控制一直是控制领域中的一个难题。对于复杂的未知非线性系统的控制,传统控制理论显得有点无能为力。模糊控制的引入,使得这一研究领域立即变得活跃起来,获得了许多研究成果。

20 世纪 90 年代初, Wang 等证明了模糊控制器是万能非线性逼近器(universal nonlinear approximator),即模糊控制器可以对定义在致密集下的任何一种连续非线性方程实现在任意精度下的函数逼近。该证明为模糊技术的普遍性应用奠定了重要的理论基础。1993 年, Wang 首次提出了稳定自适应模糊控制方法。他

基于 Lyapunov 函数,给出了模糊系统中参数的自适应率,并严格证明了控制系统的稳定性。导出的闭环控制系统全局稳定,在最小逼近误差平方可积的条件下,系统跟踪误差渐近收敛到零。Wang 的这一工作使自适应模糊控制理论的研究有了突破性进展。在这一工作推动下,关于模糊控制系统的稳定性、鲁棒性及控制性能方面的研究引起了人们的广泛关注,稳定自适应模糊控制理论的研究获得了快速发展。Wang 提出的稳定自适应模糊控制方法,为用模糊逻辑系统研究未知非线性系统的控制问题开辟了新的途径。

近十多年来,人们在非线性系统稳定自适应模糊控制方面取得了许多进步,出现了多种形式的控制方法,如自适应模糊 H_∞ 跟踪控制方法、基于观测器的自适应模糊控制方法以及自适应模糊滑模控制方法等。

自适应模糊 H_∞ 跟踪控制方法是将 H_∞ 控制理论与稳定自适应模糊控制方法、反馈线性化方法结合起来,形成的一种模糊 H_∞ 跟踪设计方法。该方法确保闭环系统渐近稳定,通过适当选择加权因子,可使模糊逼近误差和外部干扰对系统跟踪误差的影响衰减到任意小的水平,稳态跟踪误差为零。

基于观测器的自适应模糊控制方法是用高增益观测器来估计系统状态,实现输出反馈控制,它为状态不可测系统提供了一种自适应模糊控制方法。

自适应模糊滑模控制是自适应模糊控制与滑模变结构控制相结合形成的一种稳定自适应模糊控制方法,它综合了模糊系统的逼近能力和滑模控制鲁棒性强的特点,为复杂的模型未知非线性系统的控制提供了一种有效的控制方法。

1.3 自适应神经网络控制

1943 年,心理学家 McCulloch 和数学家 Pitts 合作,提出了神经元的数学模型——MP 模型,开创了人工神经网络理论研究的时代。1949 年,Hebb 提出改变神经元连接强度的 Hebb 规则,至今仍在各种神经网络模型中起着重要作用。1957 年,Rosenblatt 首次引入感知器概念,试图模拟动物和人脑的感知和学习能力。1962 年,Widrow 提出了自适应线性元,它是连续取值的线性网络,主要用于自适应系统。从此,这一研究在历史上曾一度陷入谷底,进入 20 世纪 80 年代后,随着神经网络研究热潮的再度兴起,神经网络控制也取得了一些重大进展。

多层前馈神经网络能够以任意精度逼近任意连续非线性映射,而反馈神经网络可以逼近任意的连续动态系统。神经网络具有学习能力和逼近任意非线性映射的能力,弥补了常规方法的局限性,为解决未知非线性系统的建模和控制问题提供了新的思路,因此吸引了国内外众多的学者和工程技术人员从事神经网络控制的研究,并取得了丰硕成果,提出了许多成功的理论和方法,使神经网络控制逐步成为智能控制的一个重要分支。神经网络控制将控制系统看成是输入到输出的一个

映射,利用神经网络的学习能力和自适应能力实现系统的映射特性,无需精确的数学模型,可完成对系统的建模和控制。它使得建模和控制的概念更加一般化。

神经网络在控制中的应用主要有神经网络监督控制、神经网络直接逆控制、自适应神经网络控制、神经网络内模控制、神经网络预测控制以及神经网络自适应评判控制等。利用神经网络设计控制器最大的优点是不需要被控对象精确的数学模型,但是单纯采用反馈控制却难以保证闭环系统的稳定性和鲁棒性。为了克服这一弱点,Sanner 提出了基于 Lyapunov 稳定性理论的自适应神经网络控制方法,采用 Lyapunov 稳定性理论获得网络权值自适应律。此后,Lyapunov 稳定性理论被广泛应用于自适应神经网络控制。

自适应神经网络控制是自适应逆控制与神经网络控制相结合形成的。自适应逆控制用非线性对象传递函数的逆作为控制器驱动对象,因为对象是未知的,这就要先辨识出对象的逆,并用某一种自适应算法调节控制器参数使得对象输出与指令输入之差的方差最小,使非线性对象输出跟随上指令输入。目前,逆系统方法已在一般形式的非线性系统上建立起比较完整的设计理论。这是由于逆系统方法可以以一般形式的非线性系统作为研究对象,对对象的要求是其可逆即可,因而具有普遍的研究意义;同时,它不需要引入微分几何等抽象的数学理论,从而为应用提供了一定的方便。然而,逆系统方法要求精确的模型解析式,而大多数工业过程往往呈现很强的非线性行为且难以用解析式描述,这给控制专家们应用逆系统方法进行系统综合设计带来极大的不便。即使建立起非线性数学模型,利用这些复杂的非线性模型也极难求出逆模型的解析解。因此,依靠精确解析模型的逆系统方法在实际应用中存在很大的障碍,它的推广也受到很大的限制。如何克服逆系统方法对精确模型解析式的依赖性,成为加快逆系统方法走向实用的关键。

随着神经网络理论的发展,人们应用神经网络技术,提出了一种有效地解决上述问题的方法。那就是应用神经网络来学习系统的逆模型,应用 Lyapunov 稳定性理论获得网络权值的自适应律,确保闭环系统稳定。这样就形成了自适应神经网络控制。

1.4 自适应模糊神经网络控制

模糊系统具有容易理解的表达能力,能方便地利用人类的语言信息;而神经网络则有极强的自适应学习能力,能够以任意精度逼近任意连续非线性映射。如果将两者有机结合,可有效发挥各自优势且弥补彼此的不足。1987 年,KosKo 率先将模糊理论与神经网络有机结合进行了较为系统的研究。随后,模糊神经网络的理论与应用获得了快速发展。将模糊技术与神经网络技术结合,极大地拓宽了神经网络处理信息的范围和能力,使其不仅能处理精确的信息,还能处理模糊信息和

其他不精确的信息;使得模糊规则的自动提取及模糊隶属函数的自动生成等问题得以解决,使模糊系统成为一种自适应系统。

模糊神经网络在控制中的应用主要有自适应模糊神经网络控制。这种控制方法成为近几年来研究不确定非线性系统控制问题的一种重要方法。它不依赖于被控对象精确的数学模型,可实现模糊神经网络结构和初始参数的在线确定,能根据被控对象参数的变化自适应调节控制规则和隶属函数参数。

1.5 自适应模糊/神经网络滑模控制

滑模控制(sliding mode control, SMC)是一种能用来实现线性和非线性系统鲁棒控制的方法。由于滑模控制系统中的滑动模态对系统参数摄动及外部干扰具有不变性,即它和系统的摄动性与外界干扰无关,这种理想的鲁棒性受到世界范围的极大关注并得到了迅速发展。滑模控制最主要的特点是控制信号不连续,在状态空间中一个或多个平面间不断地切换。在实际应用中,单纯采用滑模控制存在抖振问题,这是由滑模带内的高频切换引起的。高频抖振可能会激活系统的未建模动态特性,使得系统不稳定。滑模控制存在的不足,促使其与神经网络控制、模糊控制相结合,以使系统在保持对参数摄动和外部干扰强鲁棒性的同时,尽量消除抖振的发生。

自适应模糊滑模控制综合了自适应模糊系统的逼近能力和滑模控制鲁棒性强的特点,为复杂的模型未知非线性系统控制提供了一种有效的控制方法。它以经典的滑模控制设计为分析基础,根据滑模控制原理并利用模糊系统的逼近能力设计控制器,基于 Lyapunov 稳定性理论设计自适应律。通过引入模糊逻辑系统,避免了抖振现象。

自适应神经网络滑模控制把神经网络对模型的完全不依赖性和滑模控制的鲁棒性结合在一起,成为解决参数不确定或时变参数系统控制问题的一种新型控制方法。