

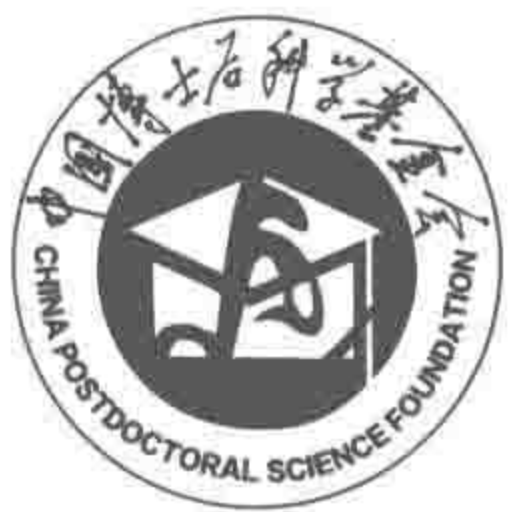
博士后文库
中国博士后科学基金资助出版

模糊系统结构解析及 在线自组织设计

王宁 韩敏 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

模糊系统结构解析及 在线自组织设计

王宁 韩敏 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书面向模糊系统结构解析和在线自组织设计问题,系统介绍了作者在该领域取得的最新研究成果。全书共9章,主要内容包括:最简模糊控制器的结构解析及其闭环模糊控制系统稳定性分析、齐次T-S模糊系统的逼近性能、基于输入空间模糊划分的T-S模糊控制系统的稳定性分析与系统化设计、模糊系统与神经网络的等价性、基于神经网络的在线自组织模糊系统、模糊神经网络在船舶工程领域的应用等。本书从实际问题出发,凝练科学问题,试图从理论分析和算法设计的角度,为工程实践提供可靠有效的解决方案。

本书概念清晰、结构合理、可读性强,不仅适合电气工程及其自动化、控制理论与控制工程、轮机工程、船舶电子电气工程等相关专业的高年级本科生及研究生阅读,也可供相关科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模糊系统结构解析及在线自组织设计 / 王宁, 韩敏著. —北京: 科学出版社, 2017.5

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-052603-8

I. ①模… II. ①王… ②韩… III. ①模糊系统—研究
IV. ①TP11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 085280 号

责任编辑: 王 哲 霍明亮 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 倩 / 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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年5月第一版 开本: 720×1000 1/16

2017年5月第一次印刷 印张: 13 插页: 2

字数: 268 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委(按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

模糊系统是一种将人类经验知识或专家规则转化为数学公式或模型的有效方法，是处理现实世界中不精确性或不确定性信息的有力工具。随着计算机及其相关科学技术的发展，作为一种存在极大发展潜力的先进建模与控制策略，模糊系统理论和应用研究的不断扩展和深入，模糊控制在复杂动态过程和非线性系统中占有越来越重要的地位，为复杂工业过程和非线性系统的建模与控制研究开辟了新的途径，有效地提高了建模精度和控制性能。

然而，正因为其本质上的复杂性，所以早期的许多应用大多采用“黑箱”设计方法，系统设计和性能分析缺乏系统有效的工具和方法，从而阻碍了模糊系统理论更为广泛和深入的研究与应用。自 20 世纪 90 年代以来，模糊系统理论发展迅猛，在一些基本问题的研究上取得了可喜的进步，例如，模糊系统与传统模型之间的解析关系、模糊系统能否逼近任意非线性函数、采用神经网络技术确定隶属函数和严格分析模糊系统的稳定性等。经过十几年的研究和发展，模糊系统的理论体系不断壮大，逐渐成为近年来智能系统领域内最富有成果的研究方法之一。尽管如此，但仍有大量的工作要做，模糊系统理论的研究远未成熟。

本书在已有研究成果的基础上，面向模糊系统结构解析和在线自组织设计，提出了一些自己的见解，取得了一些有意义的研究成果，在一定程度上丰富和发展了该领域的理论研究。全书共 9 章，主要包括：最简模糊控制器的结构解析及其闭环模糊控制系统稳定性分析、齐次 T-S 模糊系统的逼近性能、基于输入空间模糊划分研究的 T-S 模糊控制系统的稳定性分析与系统化设计方法、模糊系统与神经网络的等价性、基于神经网络的在线自组织模糊系统及其在船舶工程领域的应用等。本书内容主要取材于作者近五年公开发表的 40 余篇学术论文，同时借鉴了国内外同行在相关领域的部分优秀成果。

本书得到了国家自然科学基金(51009017, 51379002)、交通部应用基础研究基金(2012-329-225-060)、辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2013055)、中国博士后科学基金(2012M520629)、大连市高层次人才支持计划(2015R065, 2016RJ10)和中央高校基本科研业务费专项基金(2009QN025, 2011JC002, 3132016314)等科研项目的资助，在此表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请广大读者批评指正。

王 宁

2017 年 3 月

于大连海事大学

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	研究背景和意义	1
1.2	相关领域的研究现状	2
1.2.1	Mamdani 模糊控制器的结构分析	3
1.2.2	Mamdani 模糊控制系统的稳定性分析	6
1.2.3	T-S 模糊系统逼近性能分析	7
1.2.4	T-S 模糊控制系统稳定性分析和系统化设计	9
1.2.5	基于神经网络的在线自组织模糊系统	10
1.3	模糊系统理论中存在的几个主要问题	12
1.3.1	Mamdani 模糊控制系统解析及其稳定性分析	12
1.3.2	T-S 模糊控制系统逼近性能及其稳定性分析	13
1.3.3	在线自组织模糊神经网络	13
1.4	本书主要研究内容	13
第 2 章	模糊系统和神经网络理论基础	16
2.1	模糊系统	16
2.1.1	模糊集	16
2.1.2	模糊规则	17
2.1.3	模糊推理系统的结构与基本原理	19
2.1.4	模糊推理系统的分类	23
2.1.5	输入空间的模糊划分	26
2.1.6	模糊系统是万能逼近器	26
2.2	神经网络	27
2.2.1	神经网络的特性	27
2.2.2	径向基神经网络	29
2.3	基于神经网络的模糊系统	30
2.3.1	模糊系统与神经网络的知识处理	30
2.3.2	模糊系统与神经网络的等价性	30
2.3.3	基于神经网络的自组织模糊系统	31

第 3 章	模糊控制器结构解析	32
3.1	概述	32
3.2	两维最简模糊控制器结构分析	33
3.2.1	广义梯形隶属函数	34
3.2.2	Mamdani 最简模糊控制器	35
3.2.3	输入采用 GTS 隶属函数的模糊控制器结构分析	38
3.2.4	仿真研究	42
3.3	三维最简模糊控制器结构分析	44
3.3.1	基本结构	44
3.3.2	模糊化模块	45
3.3.3	模糊规则与模糊推理	46
3.3.4	解模糊模块	47
3.3.5	结构解析	47
3.4	本章小结	53
第 4 章	齐次模糊系统逼近性能分析	55
4.1	概述	55
4.2	齐次 T-S 模糊系统	56
4.3	输入空间的模糊划分及性质	56
4.4	模糊系统逼近性能分析	58
4.4.1	通用逼近性能	58
4.4.2	一致逼近的充分条件	60
4.4.3	对一次导数的逼近	61
4.5	仿真研究	63
4.5.1	示例一	63
4.5.2	示例二	64
4.6	本章小结	66
第 5 章	模糊控制系统稳定性分析及系统化设计	67
5.1	概述	67
5.2	小增益定理	69
5.2.1	\mathcal{L} 稳定	69
5.2.2	小增益定理	70
5.3	Mamdani 模糊控制系统的稳定性分析及设计	71
5.3.1	两维模糊控制器系统的稳定性分析	71
5.3.2	三维模糊控制器系统的稳定性分析	73
5.3.3	仿真研究	75

5.4	T-S 模糊控制系统的稳定性分析及设计	77
5.4.1	T-S 模糊模型	77
5.4.2	输入采用 GFP 的 T-S 模糊系统	78
5.4.3	Lyapunov 稳定性理论	80
5.4.4	释放的闭环模糊系统稳定性条件	80
5.4.5	稳定性条件的保守性比较	83
5.4.6	T-S 模糊控制器的系统化设计	86
5.4.7	船舶力控减摇鳍模糊控制系统的设计	86
5.4.8	仿真研究	89
5.5	本章小结	94
第 6 章	模糊系统与神经网络的等价性	96
6.1	概述	96
6.2	广义椭球基函数神经网络	97
6.3	T-S 模糊系统	99
6.4	GEBF-NN 与 T-S 模糊系统的等价性	100
6.5	仿真研究	103
6.6	本章小结	106
第 7 章	基于椭球基函数神经网络的在线自组织模糊系统	107
7.1	概述	107
7.2	FAOS-PFNN 的结构	109
7.3	FAOS-PFNN 在线学习算法	110
7.3.1	规则产生准则	110
7.3.2	参数调整	114
7.3.3	完整的算法结构	115
7.4	仿真研究	116
7.4.1	Hermite 函数逼近	116
7.4.2	多维非线性函数建模	118
7.4.3	非线性动态系统辨识	121
7.4.4	Mackey-Glass 时间序列预测	123
7.5	本章小结	128
第 8 章	基于广义椭球基函数神经网络的在线自组织模糊系统	129
8.1	概述	129
8.2	GEBF-OSFNN 的结构	130
8.2.1	广义椭球基函数	130
8.2.2	GEBF-OSFNN 的结构	131

8.3	GEBF-OSFNN 学习算法	132
8.3.1	规则生长准则	133
8.3.2	规则修剪准则	134
8.3.3	前件调整	135
8.3.4	权重估计	139
8.3.5	完整的算法结构	139
8.4	仿真研究	140
8.4.1	多维非线性函数建模	140
8.4.2	非线性动态系统辨识	144
8.4.3	Mackey-Glass 时间序列预测	147
8.4.4	真实标杆数据回归	151
8.5	本章小结	152
第 9 章	在线自组织模糊神经网络应用	154
9.1	概述	154
9.2	船舶领域模型辨识	154
9.2.1	船舶领域	154
9.2.2	阻挡区域	156
9.2.3	基于 FAOS-PFNN 的船舶领域模型辨识	158
9.2.4	仿真研究	158
9.2.5	小结	161
9.3	船舶运动模型辨识	161
9.3.1	船舶运动模型	161
9.3.2	由两撇系统到响应型模型	164
9.3.3	基于 GEBF-OSFNN 的整体船舶运动模型	165
9.3.4	基于 GEBF-OSFNN 的响应型船舶运动模型	171
9.3.5	小结	174
9.4	船舶操纵运动控制	174
9.4.1	动态 PID 控制器	174
9.4.2	GEBF-OSFNN 船舶操纵控制系统	175
9.4.3	仿真研究	176
9.4.4	小结	178
9.5	本章小结	179
参考文献		180
编后记		195
彩图		

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

随着科学技术的飞速发展，现代工业过程日趋复杂，过程的严重非线性、多变量、时滞、未建模动态和有界干扰等，使得被控对象的精确数学模型难以建立，即使对一些复杂对象能够建立起数学模型，而这些模型也往往过于复杂，使得系统的分析设计、实施有效的控制变得非常困难。因此，单一的应用传统的控制理论和方法从对象所能获得的信息量相对减少，难以满足复杂控制系统的设计要求。这样，复杂性与精确性就形成了尖锐的矛盾。美国控制专家 Zadeh 教授提出的不相容原理^[1]指出：“随着系统复杂性的增长，我们使其精确化的能力将减小，在达到一定阈值时，复杂性与精确性将相互排斥”。也就是说，一个系统的复杂性与分析它能达到的精度之间服从一个粗略的反比关系。这就意味着，高精度与高复杂性是不兼容的。

现代电子计算机的应用是解决精确性与复杂性之间矛盾的有效方法，但它并不能像人脑那样进行判断和推理。人脑可以理解由感知器官提供的不精确及不完整的传感信息，如何使计算机能够模拟人脑思维的模糊性特点，使部分自然语言作为算法语言直接进入计算机程序，让计算机完成更复杂的任务，这正是模糊理论产生的直接背景。1965 年，Zadeh 教授发表了开创性论文 *Fuzzy Sets*^[2]，标志着模糊系统理论的诞生。随后，随着模糊系统理论成功应用于控制、信号处理、模式识别、通信等各个领域，越来越多的学者开始研究模糊系统理论，并取得了一系列引人注目的研究成果。其最重大的应用一直集中在控制问题上，模糊控制是模糊理论在控制领域所形成的一门新的控制技术。它具有不依赖被控对象的精确数学模型、设计简单、应用灵活、抗干扰能力强、响应速度快、对参数变化有较强的鲁棒性等特点，不仅可以应用于常规控制系统的设计，而且在经典控制理论和现代控制理论难以应用的场合也能发挥很好的作用。1974 年英国学者 Mamdani 首次将模糊理论应用于热电厂的蒸汽机控制^[3]。随后，1985 年日本学者 Takagi 和 Sugeno 首次提出了一种动态系统的模糊模型辨识方法，称为 Takagi-Sugeno (T-S) 模型^[4]，该模型以系统局部线性化为出发点，具有结构简单、逼近能力强的特点，成为模糊辨识中的常用模型，并为复杂工业过程的建模提供了很好的实现手段。此后，美国、日本、英国、中国等国家的学者先后将模糊控制技术应用于交通控制、机器人、航天、工业生产等领域，取得了显著的成果^[5-9]。时至今日，模糊控制理论已成为智能控制技术的一个重要分支。

尽管模糊控制技术的应用日益广泛,但在理论上还处于不断发展和完善之中。从理论的角度来看,自20世纪90年代至今,模糊控制理论的发展是迅猛的,尽管鲜有突破性的进展,但对于模糊系统与模糊控制中的一些基本问题上的研究已经取得了可喜的进步,如模糊系统的结构解析、模糊系统的逼近性能分析、隶属函数的确定、模糊规则的提取、模糊控制系统稳定性分析等,但大多数研究手段和分析方法仍停留在初级阶段。尽管模糊控制理论的整体图景已经越来越清晰,但与传统控制理论相比,其发展远未成熟。模糊控制器是一种基于人类思维推理语言的控制器,具有本质上的非线性和缺乏统一的系统描述,使得人们不能直接利用现有的控制理论和分析方法进行解析分析和设计。另外,每一种新的技术与方法在体现其优越性能的同时,也必定存在其局限性。应当承认,在对客观对象进行观察和认识时,模糊理论毕竟不如人的认识全面深刻,因而若要达到真正仿人智能的效果,仍然需要其自身在工程应用中不断地朝着自适应、自组织、自学习方向发展。模糊控制理论发展到现阶段,其理论体系明显呈现以下几个热点分支:模糊控制器结构解析研究、模糊系统逼近性能分析、模糊控制系统稳定性分析及其系统化设计、模糊系统在线自组织设计等。

针对以上指出的模糊系统理论中存在的几个热点问题,为进一步推动模糊系统理论在实际过程的建模与控制中的应用,本书在总结该领域现有研究工作的基础上,主要进行了如下一些研究工作:研究了两维和三维最简模糊控制器的解析结构及其闭环控制系统的输入输出(IO)稳定性;作为模糊系统建模的理论基础,分析了一大类齐次T-S模糊系统的逼近性能;通过分析和研究输入变量空间的模糊划分以充分利用模糊规则前件的结构信息,进一步研究了T-S模糊控制系统的稳定性分析与系统化设计方法等方面的问题;结合神经网络的学习能力和自适应特性,提出了一种快速、精确的在线自组织精简模糊神经网络(OSFNNRG),用以实现模糊系统的自动化及自组织设计;鉴于所得在线自组织模糊神经网络的优越性能,本书同时面向船舶工程领域展开相关的应用研究,包括:船舶领域模型辨识、船舶运动模型辨识和船舶操纵运动控制等。

此外,作为本书理论研究成果在其他相关领域中的应用,以船舶力控减摇鳍控制系统、倒立摆控制系统、质量块-弹簧-阻尼器控制系统、Hermite函数逼近、Mackey-Glass混沌时间序列预测等为研究对象,分别对其模糊系统进行系统化设计,并进行计算机仿真研究。结果表明,所得理论成果具有广泛的潜在应用领域和较高的理论及实际意义。

1.2 相关领域的研究现状

近年来,模糊控制理论与应用已经取得了迅猛发展。在模糊控制的发展初期,大多数学者致力于模糊系统的应用研究,在很多领域上取得了优于传统控制的辉煌

成果^[10]。由于模糊系统本质上的非线性与复杂性,模糊控制的系统分析和理论研究显得较为滞后。甚至,一些学者对模糊控制的理论依据和有效性产生了疑虑^[11]。为坚实模糊控制理论基础,诸多学者试图建立模糊控制理论与传统控制理论之间的关系,并从理论解析的角度,用成熟的经典系统理论从不同的侧面阐明模糊系统的内部结构和工作机理^[12]。研究焦点主要集中在模糊控制器的结构解析^[12,13]、模糊系统的逼近性能分析^[12,14]、模糊控制系统的稳定性分析和系统化设计^[15,16]以及模糊系统的在线自组织设计^[17,18]等方面。模糊系统是一种基于知识或基于规则的系统,它的核心是由 IF-THEN 规则组成的知识库。模糊系统按所用的模糊规则的形式可分为两类: Mamdani 模糊系统^[3,19]和 T-S 模糊系统^[4]。本节将对这两种模糊系统的研究现状作一简要综述。

1.2.1 Mamdani 模糊控制器的结构分析

模糊控制器结构分析已成为近年来模糊控制理论中的一个热点研究方向。尽管模糊系统已被证明是解决许多实际复杂建模和控制问题的一种有效方法,但是,许多模糊系统仍采用“黑箱”方法,这是因为其结构的复杂性已成为传统数学分析的主要障碍,这给它在许多领域的应用带来不实际性和不安全性。在此背景下,基于解析方法的模糊控制器结构分析引起了许多学者的重视,依据成熟的经典控制理论分析模糊控制器的结构,成为发展模糊控制技术的一条重要途径。

影响模糊控制器非线性的主要因素包括:隶属度函数的类型、模糊推理方法和解模糊算法等,众多学者对模糊控制器结构解析的研究工作也大多围绕这几个方面展开。

1. 模糊控制器的继电器模型

1978 年 Kickert 和 Mamdani^[20]最先揭示了一类简单的模糊控制器与多值继电器控制器之间的关系,其输入输出特性具有多值继电器特性,故可看作多值继电器控制器。Ying^[21]采用标准模糊划分的均匀分布的对称三角形输入模糊集、均匀分布的对称输出模糊集、线性控制规则、不同模糊推理方法和重心解模糊算法,构造了一类两输入单输出的 Mamdani 模糊控制器。通过结构解析,证明了这种非线性模糊控制器是一个全局两维多值继电器控制器和一个局部非线性 PI 控制器之和。随着输入模糊集数目 N 的增加,全局两维多值继电器控制器的控制作用将被强化,而局部非线性 PI 控制器的控制作用将减弱。用 $\rho = 1/(N-1) \times 100\%$ 表示: ①全局控制器和局部控制器在整体控制中的作用; ②模糊控制器的非线性度。给出并证明了极限定理: 当 $N \rightarrow \infty$ 时,采用线性控制规则的非线性模糊控制器变为线性 PI 控制器。显然,当 $N = 2$ 时, $\rho = 100\%$,这说明最简形式的模糊控制器是一种非线性 PI 控制器,不含多值继电器控制器;只有当 $N > 3$ 时,模糊控制器与多值继电器控制器之间关系才成立。随后,这些结果被一般化到采用非均匀分布的三角形输入模糊集、不同推理方法、非线性

控制规则的多输入多输出模糊控制器，证明了该模糊控制器的结构是一个全局多维多值继电器控制器和一个局部非线性 PI 控制器之和^[22]。Chen 等^[23,24]通过采用各种模糊推理方法对模糊控制器的结构进行了研究，发现模糊控制器的继电器模型与 T-范数的选取无关，而依赖于被控过程的位置输出。这与 Ying^[25,26]证明的只要采用线性控制规则就可建立模糊控制器与多值继电器控制器的这种关系是一致的。文献[27]也得到了一个重要结果。

显然，根据模糊控制器的继电器模型，可用经典控制理论中的描述函数的方法来分析和设计模糊控制系统，并确保其稳定性。

2. 模糊控制器的插值器模型

李洪兴在文献[28]中指出，对于一个模糊控制问题，如果人们总结出控制规则，那么对输入、输出论域便作了模糊划分，也就得到了基元组；其中基元组的峰点便构成了输入输出数据对。换言之，总结控制规则与寻找数据对是“等价”的。因此，基于规则的模糊控制器本质上是一种插值器。在输入、输出论域被正规模糊划分的前提下，选取重心解模糊方法，李洪兴证明了常用的单输入单输出(SISO)和两输入单输出(TISO)模糊控制器模型如 Mamdani 型、Mizumoto 型、Takagi-Sugeno 型和 Sugeno 型等均可归结为某种插值函数，它是对响应函数的逼近，相当于离散响应函数的拟合，而作为表示模糊推理前件的模糊集合恰为插值基函数。也就是说，模糊规则的提取与被拟合数据对的获得是一回事。同时，还指出即使使用其他解模糊算法，模糊控制器仍然可归结为不同形式的插值器^[29,30]。

随后，又揭示了对输入论域正规模糊划分的多输入多输出(MIMO)模糊控制器本质上是多元分片插值函数，而输出模糊集在插值中只出现峰点，与其形状关系不大，这对模糊控制器的分析设计是重要的^[31]。

在此基础上，一些学者^[32-36]研究了采用不同输入、输出模糊集的模糊控制器的插值机理，得到了更为精确的模糊控制器与插值器之间的关系，并分别给出了逼近误差估计和具有插值特性的充要条件。这为模糊控制器的结构分析和设计提供了新的研究方向和理论依据。

3. 模糊控制器的非线性 PID 模型

线性离散 PID 控制器的表达式可写为

$$u(n) = K_p \left\{ e(n) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{n-1} e(i) + \frac{T_d}{T} [e(n) - e(n-1)] \right\} \quad (1.1)$$

一些研究者发现，许多模糊控制器的解析结构表达式与式(1.1)具有相同的形式，只是模糊控制器的各增益随输入信号的变化而变化。因此，模糊控制器可以看做一种增益随输入信号时变的非线性 PID 控制器^[12]。

Ying 等^[37]最先证明了采用两个线性输入模糊集、四条模糊规则、Zadeh 模糊逻辑 AND 和 OR 算子及线性(非线性)解模糊算法的最简模糊控制器是线性(非线性)PI 控制器,其比例增益和积分增益随控制器的输入变化而变。随后,将该结果推广到采用任意梯形输入模糊集、线性控制规则、不同推理方法的最简 Mamdani 模糊控制器,证明了采用不同的推理方法(如 Mamdani 最小、Larsen 乘积、直积和有界乘积等)的该类模糊控制器是不同类型的非线性 PI 控制器,同时指出模糊控制器不适合采用有界乘积推理方法^[38]。在稳定性分析方面,证明了在平衡点处这种模糊 PI 控制器与相应的线性 PI 控制器有相同的局部稳定性。随后的研究^[39,40]将这一结果推广至采用其他推理方法、非线性控制规则、任意梯形输入隶属函数等设计参数的二维模糊控制器。张乃尧等^[41-44]研究了采用不同输入隶属函数和不同模糊推理算法的各种典型模糊控制器的解析表达式,在此基础上给出了模糊控制器的 PID 模型。李洪兴等^[32,45]论证了模糊控制器与 PID 控制器之间的关系,证明了一类二维模糊控制器是具有 P 与 D(或 P 与 I)交互影响的分片 PD(或 PI)调节器;一类三维模糊控制器是一个具有 P、I、D 之间交互影响的分片 PID 调节器,并给出了该类模糊控制器的差分格式。近年来,其他一些学者也对此进行了深入的研究,并取得了一些有意义的结果^[46,47]。Haj-Ali 等^[48]指出,若采用任意输入模糊集建立三维模糊控制器的 PID 模型是相当困难的,甚至是不可能的。文献[48]证明了隶属函数满足一定条件时,采用 Zadeh 模糊逻辑 AND 和乘积 AND 操作的三维最简模糊控制器是变增益非线性 PID 控制器,但这仅仅是一个充分条件。文献[49]采用 Zadeh 模糊逻辑 AND 操作和任意输入模糊集研究了三维模糊控制器的输入变量空间划分问题,给出了子空间分界面为平面的充要条件。最近, Mohan 等^[50-54]在此研究方向上做了大量的工作,并取得了一些显著的成果。他们采用乘积 AND 操作与不同的模糊推理算法进行组合,构造了 13 种三维模糊控制器 PID 模型,并将所得到的解析结构进行比较得出结论:只有采用代数积三角模、有界和协三角模和 Mamdani 最小推理方法的模糊控制器是有用的。然而, Zadeh 模糊逻辑 AND 操作在工程应用中更为普遍,而且运算更为简单。

以上所取得的模糊控制器与非线性 PID 控制器之间的关系,一方面揭示了模糊控制器在非线性和时变和纯滞后等系统中的应用比线性 PID 控制器优越的机理,另一方面也提供了它们之间的增益关系,这更有利于模糊控制系统的系统化设计和稳定性分析。

4. 模糊控制器的其他研究模型

在工作原理上,模糊控制器类似于滑模变结构控制器。一些学者利用滑模变结构控制理论将模糊控制器表示成一类变结构控制器,滑模用于确定模糊控制规则中的最优参数值^[55-57]。与通常的滑模控制相比,模糊控制具有更强的鲁棒性,且模糊

控制器的变结构特性有助于人们设计鲁棒稳定的模糊控制器。此外,一些学者注意到,当模糊控制规则的数目增加到足够大时,对被控过程的影响很小甚至没有影响,从而产生了模糊控制器的极限结构理论^[58-60]。该理论说明了模糊控制器的模糊集和模糊规则的数目并非越多越有效,故在实际设计时,要根据具体问题合适地选择模糊集和规则的数目。

1.2.2 Mamdani 模糊控制系统的稳定性分析

稳定性分析是各类控制器的一个基本问题,对于工业过程控制而言,稳定可靠是首要的目标。对于任何一个控制系统,稳定性是必须首先解决的问题。对于 Mamdani 模糊控制系统,这一点相对比较复杂,因为模糊控制理论尚没有建立一套完整的理论体系,而且模糊逻辑本身难以表达传统意义下的稳定性,再加上模糊控制是基于规则的非线性控制方法,非线性系统的分析和设计本身就比线性系统理论复杂得多,因此模糊系统稳定性分析方法远没有传统的基于精确数学模型的稳定性分析方法那样成熟。目前基于经典控制理论的 Mamdani 模糊控制系统稳定性分析方法主要有以下几种。

1. 描述函数方法

描述函数方法可用于预测极限环的存在、频率、幅度和稳定性。文献[20]通过建立模糊控制器与多值继电控制器的关系,将描述函数方法用于分析模糊控制系统的稳定性。另外,指数输入的描述函数技术也能用于调查模糊控制系统的暂态响应^[61]。虽然描述函数方法能用于 SISO 和 MISO 模糊控制器以及某些非线性对象模型,但不能用于三输入及以上的模糊控制器。由于这种方法一般都用于非线性系统中确定周期振荡的存在性,所以只是一种近似方法。

2. Lyapunov 方法

Langari 和 Tomizuka^[62]提出了利用 Lyapunov 直接法来确定一类 Mamdani 模糊控制系统全局稳定性的充分条件,以增强其稳定运行范围,并提出了鲁棒性指标。它可以用来评价和重新设计给定的模糊控制系统。但所设计的模糊控制器是非自适应的,其结果也过分依赖于大量的条件,因而,严重地限制了模糊控制器设计的灵活性。

3. 相平面方法

Braae 和 Rutherford^[63]提出了在“语言相平面”里处理闭环系统的语言轨迹。他们的主要思想是,调整比例映射(scale mapping)来近似地产生期望轨迹的行为。这种“近似”或“逼近”策略,在某种程度上是启发式的和主观的。我国学者顾树生和平力^[64]应用相平面法和稳定区间法设计了模糊控制系统,并对它们进行了稳定性

分析。但这类方法仅适用于二维和三维模糊控制器的设计。Huang 和 Lin^[65]以及 Palm^[66,67]都提出把滑动模态和模糊控制相结合来设计模糊控制器。首先,用滑模控制的思想为被控对象建立滑动面(sliding surface),然后构造 Lyapunov 函数以确保系统稳定,也就是通过模糊推理的方法来获得控制,以满足到达条件。利用滑动模态的到达条件将系统降阶为二维系统,从而可以在相平面中设计模糊滑动模态控制器。整个系统的稳定性由到达条件来保证。张天平等^[68-70]讨论了一类不确定动态系统的输出反馈模糊变结构控制方法。

4. 圆稳定性判据方法

圆判据可用于分析和再设计一个模糊控制系统。使用扇区有界非线性的概念,一般化的奈奎斯特(圆)稳定性判据可用于分析 SISO 和 MIMO 模糊系统的稳定性^[71],并且扩展圆判据可用于推导一类简单模糊 PI 控制系统稳定性的充分条件^[61]。由于圆判据要求比较严格, Furutani 提出一种移动的波波夫判据,用于分析模糊控制系统的稳定性。当此判据中参数 θ 设为零时,该判据与圆判据一致^[72]。此外,文献[73]还研究了采样模糊控制系统的绝对稳定性圆判据。

5. 小增益理论方法

输入输出(IO)稳定性理论为研究模糊控制系统的稳定性提供了另一条有效的途径。按照该理论:若输入函数 $x(t)$ 有界,系统的输出函数 $y(t)$ 也有界,则称系统是输入输出稳定的^[74]。IO 稳定性理论主要有两个基本定理:小增益定理和钝性定理。其中,小增益理论是非线性控制理论中用于连续和离散系统 IO 稳定性研究的一个非常有效的工具。基于 Mamdani 模糊控制器的解析结构,结合被控对象和模糊控制器的非线性本质,一些学者采用小增益理论,建立了采用 Mamdani 模糊 PI^[75,76]、PD^[77]、PID^[54,78]控制器的模糊控制系统的有界输入有界输出(BIBO)稳定性的充分条件,证明了用非线性模糊 PI 控制器替代常规 PI 控制器,不影响平衡点处的稳定性。因为这些稳定性的结果基于模糊控制器的结构,所以比那些模糊控制器解析结构未知的稳定性结果更具不保守性。

1.2.3 T-S 模糊系统逼近性能分析

自从 T-S 模糊模型^[4]提出以来,特别是 20 世纪 90 年代至今,模糊控制系统的研究热点已转移到 T-S 模糊系统。但随之而来的理论问题之一,模糊系统能否实现任意的非线性连续控制规律和控制模型,即模糊系统能否以任意的逼近精度一致逼近定义在闭区域上的任意连续函数,尚未完全解决。而且该理论研究是模糊控制系统的模型辨识、控制和实际应用的重要理论基础。模糊系统之所以能够广泛应用于各种复杂的工业过程控制,一个最重要的原因就在于它能够逼近任意的非线性模型