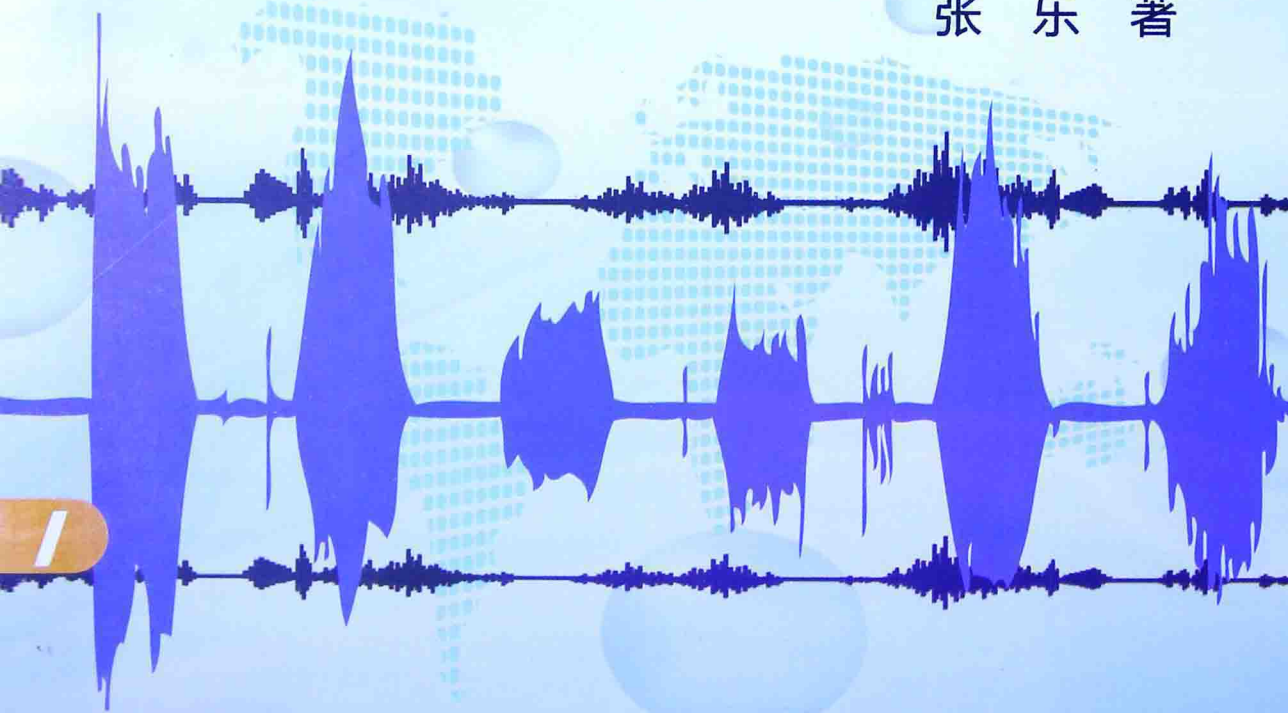


JIYU T-S MOHU MOXING DE JIZHONG MOHUXITONG DE
WENDINGXING FENXI YU LUBANG KEKAO KONGZHI



基于T-S模糊模型的几种模糊系统的 稳定性分析与鲁棒可靠控制

张 乐 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

基于 T-S 模糊模型的几类模糊系统的 稳定性分析与鲁棒可靠控制

张 乐 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 张 乐 2014

图书在版编目 (CIP) 数据

基于 T-S 模糊模型的几类模糊系统的稳定性分析与鲁棒可靠控制 / 张乐著.
—沈阳: 东北大学出版社, 2014. 5
ISBN 978 - 7 - 5517 - 0601 - 8

I. 基… II. ①张… III. ①模糊控制—自动控制系统—稳定分析—研究②鲁棒控制—模糊可靠性—研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 104862 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024 - 83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024 - 83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 228mm

印 张: 8.75

字 数: 162 千字

出版时间: 2014 年 5 月第 1 版

印刷时间: 2014 年 5 月第 1 次印刷

组稿编辑: 张德喜

责任编辑: 刘 莹

封面设计: 刘江旻

责任校对: 辛 思

责任出版: 唐敏志

ISBN 978 - 7 - 5517 - 0601 - 8

定 价: 25.00 元

前

言

自动化是人类文明进步和现代化的标志。自动化不仅可以部分或全部代替人的体力或脑力劳动,而且可以完成人类依靠自身的体力和脑力劳动无法直接完成的任务。应用自动化技术可以大大提高人类的生产效率和产品质量,减轻劳动强度、降低原材料和能源消耗,创造前所未有的社会效益和经济效益。模糊控制实质上是一种非线性控制,从属于智能控制的范畴。模糊控制的一大特点是既具有系统化的理论,又有着大量实际应用背景。近 20 多年来,模糊控制无论是从理论上还是从技术上都有了长足的进步,成为自动化技术领域中的一个非常活跃而又硕果累累的分支。模糊控制理论研究包括解决模糊控制中关于稳定性和鲁棒性分析、系统的设计方法、控制系统性能的提高等核心问题。同时,若切换系统的子系统为模糊系统,则称为切换模糊系统。它是一种更为复杂的混杂系统。这类系统更能准确地刻画实际系统中模糊特性、连续动态和离散动态的相互作用及运动行为。对于切换模糊系统的研究,拓宽了模糊系统的研究范围。本书针对目前应用广泛的基于 T-S 模型的模糊系统,利用鲁棒控制理论、容错控制理论、 H_∞ 控制等理论,采用 Lyapunov 函数方法、线性矩阵不等式(LMI)技术,结合作者几年来的研究与教学成果和体会,深入研究了 T-S 模糊系统的鲁棒稳定性和可靠控制问题,系统地阐述了模糊控制中的主要概念、典型问题、热点问题、分析方法、控制理论与控制技术以及发展趋势。

全书共分 7 章。第 1 章论述模糊控制的研究背景及发展概况,模糊控制系统稳定性理论及可靠控制研究背景、研究方法,切换模糊系

统研究现状等。第 2 章研究了一类不确定 T-S 动态模糊系统的鲁棒非脆弱控制问题。给出不确定 T-S 动态模糊系统模型, 利用 Lyapunov 函数方法, 进行了连续不确定动态模糊系统的鲁棒非脆弱控制器设计, 得到了基于 LMIs 的不确定动态模糊系统的全局渐近稳定性条件。第 3 章研究了离散不确定时滞模糊系统的容错控制问题。针对非线性离散系统, 构造 T-S 模型, 引入参数不确定项和时滞项, 使得模糊模型能够更精确地逼近原系统。利用 Lyapunov 方法, 证明了所设计的模糊控制器能够使闭环 T-S 模糊系统对于执行器故障和传感器故障的情况具有完整性和鲁棒性。当不确定项具有范数有界时, 利用求解 LMIs 的方法, 得出了闭环模糊系统在执行器故障和传感器故障时具有完整性的充分条件。第 4 章讨论了一类不确定切换模糊系统的模型, 模型中的每个子系统均为不确定模糊系统, 研究了切换模糊系统状态反馈 H_∞ 鲁棒控制问题。基于 LMIs 和 H_∞ 控制理论, 利用多 Lyapunov 函数方法, 设计了状态反馈控制器与切换策略, 使闭环切换模糊系统在切换策略下具有 H_∞ 性能指标 γ 。第 5 章针对切换不确定模糊系统的模型, 研究了鲁棒可靠控制问题。对于系统的外部干扰具有未知上界的情况, 当执行器“严重失效”即未失效执行器部分不能镇定原系统时, 使用切换技术和多 Lyapunov 函数方法, 构造出模糊鲁棒自适应可靠控制器, 使得相应的闭环系统对于所有可能的不确定性和所有允许的执行器失效一致最终有界。同时, 设计了可以实现闭环系统一致最终有界的切换律。第 6 章尝试将鲁棒可靠控制与跟踪问题相结合, 研究了不确定切换模糊系统的鲁棒可靠跟踪问题。通过使用切换技术和多 Lyapunov 函数方法, 构造了鲁棒模糊自适应可靠控制器。通过设计切换律, 对于具有未知上界的干扰, 保证跟踪误差一致渐近趋于零。第 7 章针对一类状态不能直接测得的不确定切换模糊系统, 同样考虑执行器发生“严重失效”情况, 利用依赖观测器状态的多 Lyapunov 函数方法, 研究鲁棒可靠控制问题, 设计模型的模糊鲁棒控制器, 并给出相应的使系统渐近稳定的切换策略。

本书在编著过程中，得到了国家自然科学基金、辽宁省教育厅高等学校自然科学基金、辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划基金、辽宁省重点实验室开放基金的资助；还得到了东北大学出版社编辑的大力帮助；研究生吴金男做了大量的资料收集、整理工作。同时，在编写过程中，参阅了大量的专家文献和同类专著，在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，书中的疏漏之处在所难免，殷切敬请专家和读者不吝赐教并与作者联系，作者的邮箱是 snowise@126.com。

作 者

2014 年 2 月 19 日

目

录

第 1 章	绪 论	1
1.1	模糊控制的研究背景及发展概况	1
1.1.1	模糊控制的发展概况	2
1.1.2	模糊控制理论研究动向	6
1.2	模糊控制系统稳定性理论	9
1.2.1	非线性系统的稳定性理论	10
1.2.2	基于 T-S 模糊模型的稳定性分析	11
1.3	模糊系统的容错控制	14
1.3.1	容错控制发展概况	14
1.3.2	模糊系统的可靠控制	16
1.4	切换模糊控制系统	17
1.4.1	切换系统概述	17
1.4.2	切换模糊控制系统	21
1.5	本书研究的主要工作	22
第 2 章	不确定模糊系统的鲁棒非脆弱控制及稳定性	25
2.1	引 言	25
2.2	不确定模糊系统的模型描述	26
2.3	基于非脆弱特性的 DPDC 控制器设计	27
2.4	非脆弱控制稳定性条件	28
2.5	仿真结果	32
2.6	结 论	35
第 3 章	离散不确定时滞模糊系统的容错控制	36
3.1	引 言	36
3.2	离散不确定时滞模糊系统的容错控制	37
3.2.1	系统模型	37
3.2.2	离散不确定时滞模糊系统的容错控制器设计	38

3.2.3	仿真算例	43
3.3	离散不确定模糊系统的时滞容错控制	45
3.3.1	系统模型	45
3.3.2	离散不确定模糊系统的时滞容错控制器设计	46
3.3.3	仿真算例	50
3.4	离散不确定模糊系统的模糊观测器设计	54
3.4.1	系统模型	54
3.4.2	模糊容错控制	56
3.4.3	仿真算例	60
3.5	结 论	64
第 4 章	切换模糊系统的鲁棒 H_∞ 控制	65
4.1	引 言	65
4.2	问题描述及预备知识	67
4.3	切换模糊系统的鲁棒 H_∞ 控制器设计	68
4.4	仿真算例	73
4.5	结 论	76
第 5 章	不确定切换模糊系统的鲁棒自适应可靠控制	77
5.1	引 言	77
5.2	问题描述和预备知识	78
5.3	鲁棒自适应可靠控制器设计	80
5.4	仿真算例	83
5.5	结 论	86
第 6 章	不确定切换模糊系统的自适应鲁棒可靠跟踪控制	87
6.1	引 言	87
6.2	问题描述和预备知识	88
6.3	可靠控制器和切换律设计方案	90
6.4	仿真算例	95
6.5	结 论	97
第 7 章	基于观测器切换的切换模糊系统的鲁棒可靠控制	98
7.1	基于观测器切换的不确定切换模糊系统鲁棒可靠控制	98
7.1.1	引 言	98

7.1.2 不确定切换模糊系统模型描述	98
7.1.3 主要结果	101
7.1.4 仿真结果	104
7.2 基于观测器切换的不确定时滞切换模糊系统鲁棒可靠控制	106
7.2.1 不确定时滞切换模糊系统模型描述	106
7.2.2 主要结果	108
7.2.3 仿真结果	112
7.3 本章结论	115

参考文献	116
------------	-----

第1章 绪 论

随着模糊数学和计算机技术的研究与发展,模糊控制理论和方法被广泛地应用于自然科学和社会科学的各个领域,取得了令人瞩目的成就。但是,由于模糊系统本质上的非线性和特殊的描述方法,使得人们难以利用现有的控制理论分析方法对模糊控制系统进行分析和设计,模糊控制理论仍未形成较为完善的理论体系,还有许多理论问题有待于进一步解决,如缺乏统一的系统描述和难以进行稳定性分析等。近年来,模糊控制学者对此进行了不懈的努力,出现了一些新动向。写作本书的目的在于跟踪目前的发展,利用最新的研究成果,如线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequality, LMI)技术、容错控制理论、鲁棒稳定理论和切换模糊系统控制理论等,研究模糊控制系统的系统描述、稳定性和鲁棒稳定性分析以及控制器设计等问题。

1.1

模糊控制的研究背景及发展概况

自动控制理论历经经典控制理论、现代控制理论两个发展阶段,现在已进入智能控制理论发展时期。目前,虽然对智能控制的界定尚未形成统一的认识,但人们都不怀疑模糊控制是智能控制理论的重要组成部分。与模糊控制相区别,将经典控制理论、现代控制理论统称为传统控制理论。

传统控制理论在工业生产、军事科学、空间技术和航空航天等许多领域已经取得了成功的应用。例如,极小值原理可以用来解决某些最优控制问题;利用卡尔曼滤波器可以对具有有色噪声的系统进行状态估计;预测控制理论可以对大滞后过程进行有效的控制。在这些领域的应用中,控制器的设计都是建立在被控对象精确数学模型的基础之上。一般说来,过程描述越精确,控制效果越好。然而,实际工业过程往往极其复杂,具有高度的非线性、时变、强耦合、时滞等特征,很难用传统的数学方法为其建立精确的数学模型^[1]。诸如在系统工程、经济

学、心理学、医学、生物学等领域中，经常会遇到无法建立精确数学模型的问题，要对这些不具有数学模型的被控对象进行控制，经典控制理论或现代控制理论往往显得无能为力。另外，随着计算机技术的飞速发展，包含将人类思维这样复杂的操作由计算机代替的领域日益增加，这是经典控制理论、现代控制理论无法胜任的，必须寻求新的控制理论。富有经验的操作人员可以不从精确的数学表达式去了解受控对象，而是运用人所特有的观察、推理和学习能力，实现有效的控制。尽管操作人员事先并未去推导建立系统的数学模型，更没有去关心系统究竟是一阶的、二阶的或者高阶的，甚至未进行任何数学处理，仅凭自己几次探索所积累的经验，就实现了比一台常规仪表，甚至比一台采用 PID 算法的微机化仪表更为理想的调节效果。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和发展起来的。

1.1.1 模糊控制的发展概况

1965 年，美国加利福尼亚大学的 Zadeh 教授发表了题为“Fuzzy Sets”的开创性论文，将集合论的要素与隶属函数有机地结合起来，提出了模糊集合理论^[1]。模糊集合的引入，可将人的判断、思维过程用比较简单的数学形式表达出来，从而使对复杂系统作出合乎实际的、符合人类思维方式的处理成为可能，为早期模糊控制器的形成奠定了基础。

1974 年，英国的 Mamdani 首先成功地将 Fuzzy 模糊集理论应用于锅炉和蒸汽机的控制中^[2]，取得了优于常规调节器的控制品质，标志着模糊控制的诞生。1979 年，英国的 Procyk 和 Mamdani 研究了一种自组织的模糊控制器，它在控制过程中不断修改和调整控制规则，使控制系统的性能不断完善^[3]。自组织模糊控制器的问世，标志着模糊控制器智能化程度进一步向高级阶段发展。1983 年，日本学者 Sugeno 和 Murakani 将一种基于语言真值推理的模糊逻辑控制器应用于汽车速度自动控制，并取得成功^[4-6]。此后，模糊控制在化工、机械、冶金、食品生产等多个领域中得到使用。

1984 年，美国推出模糊推理决策支持系统；1985—1986 年，日本进入了模糊控制实用化时期。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。

所谓模糊控制，既不是指被控对象是模糊的，也不是指控制器是不确定的，它是指在表示知识、概念上的模糊性。虽然模糊控制算法是通过模糊语言描述

的,但它所完成的却是一项完全确定的工作。由于模糊控制利用了模糊集合的思想,具有本质上的非线性和智能性,显示了许多特殊的优良品质。

在近几十年中,国内外许多学者以极大的热情投入到这一领域的研究中,取得了一系列重要的理论和应用研究成果,模糊控制理论成为模糊系统理论最广泛的、最成熟的应用分支,并逐渐成为智能控制理论的重要分支,见表 1.1^[7]。

表 1.1 模糊控制理论的发展

时 间	发生事件
1965 年	模糊集合的提出(Zadeh)
1972 年	模糊测度,模糊积分提出(营野)
1973 年	语言的处理(模糊推论)的提出(Zadeh)
1974 年	模糊控制的提出(Mamdani)
1975 年	日美科学协作研讨会召开(美国)
1976 年	模糊关系方程的解法(Sanchez)
1978 年	国际杂志 Fuzzy Sets and Systems 创刊(North Holland)
1980 年	模糊控制实用化(F. L. Smidth 社)
1984 年	国际模糊系统学会(IFSA)设立;模糊推理用 IC 试作(山川)
1985 年	国际模糊系统会第一届召开;模糊推理 VL-SI 集成块开发;日本开始模糊控制应用
1986 年	实用模糊控制器的商品化
1987 年	国际模糊系统学会第二届会议召开;模糊控制的仙台地铁开通;模糊计算机开发
1988 年	关于模糊系统应用的国际会议召开
1989 年	“国际模糊工学研究所”设立;日本模糊学会成立;第三届国际模糊系统学会召开
1990 年	“模糊系统研究所”设立(日本);关于模糊逻辑与神经网络的国际会议;关于模糊集合与系统的中日共同会议(北京);模糊家电制品的应用相继上市
1991 年	国际模糊系统学会第四届会议召开;国际模糊系统学会第五届会议召开(韩国)
1992 年	Fuzzy-IEEE 会议召开(美国)
1993 年	IEEE Trans. on Fuzzy System 创刊;环太平洋模糊系统会议(新加坡)
1994 年	IEEE 模糊系统、神经网络和进化计算三个年会合并举行;计算智能会议的召开;各种模糊芯片、模糊控制器的开发和上市
1995 年	第四届 Fuzzy-IEEE 年会召开(日本的横滨);模糊软、硬件的开发;国内模糊控制技术产品开发热;模糊控制技术标准化
1996 年	第五届 Fuzzy-IEEE 年会召开;研制开发自适应模糊系统与因素神经网络理论的研究
1997 年	美国电网的模糊神经元网络控制系统的开发
1999 年	第九届 Fuzzy-IEEE 年会召开(韩国的汉城)
2001 年	第十届 Fuzzy-IEEE 年会召开(澳大利亚的墨尔本)

模糊控制系统由被控制过程和模糊控制器构成,模糊控制器由模糊化、模糊推理和去模糊化三部分组成,三者均建立在知识库(控制率和隶属函数)基础上。

模糊控制的基本原理如图 1.1 所示。当被控过程与知识库在动态过程中进行联系时，模糊控制系统可实现自组织、自适应调整知识库，从而改善控制系统品质，优化控制率。

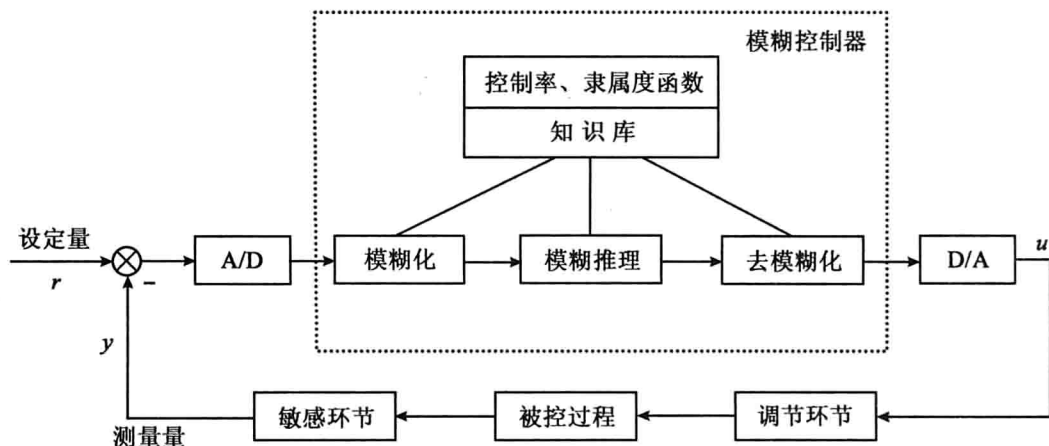


图 1.1 模糊控制系统原理框图

模糊控制器设计过程为：

- ① 将操作者的操作经验归纳成定性的一组 if-then 形式的模糊规则，或称模糊模型；
- ② 对系统的输出偏差、偏差的变化和控制量进行模糊化；
- ③ 应用模糊推理方法，通过模糊算法，由模糊偏差和偏差的变化量，经控制规则计算出模糊控制量。

根据获取模糊控制规则的方法可知，目前模糊控制器共分为两大类：基于经验推理的 Mamdani 模糊控制器和基于模型的 T-S 模糊控制器。

（1）基于经验推理的 Mamdani 模糊控制器

早期的模糊控制方法大多是直接利用人的经验知识来设计模糊控制器，再根据实际效果来调试修正。Mamdani 模糊控制器主要包括：

- ① 基本 Mamdani 模糊控制器。人的手动控制策略是通过操作者的学习、试验和长期经验积累而形成的，它可通过人的自然语言加以叙述。例如，可借助下述定性的、不精确的及模糊的条件语句来表达：如果汽车速度慢，则施加给油门较大的力；如果汽车速度适中，则施加给油门正常大小的力；如果汽车速度快，则施加给油门较小的力。它属于一种语言控制。在模糊控制中，模糊控制器的作用在于通过电子计算机，根据由精确量转化来的模糊输入信息，按照总结手动控

制策略取得的语言控制规则进行模糊推理,给出模糊输出判决,并再将其转化为精确量,作为反馈送到被控对象(或过程)。这反映人们在对被控过程进行控制中,不断将观察到的过程输出精确量转化为模糊量,经过人脑的思维与逻辑推理取得模糊判断后,再将判断的模糊量转化为精确量,去实现手动控制的整个过程。模糊控制器体现了模糊集合理论、语言变量及模糊推理在不具有数学模型而控制策略只有以语言形式定性描述的复杂被控过程中的有效应用。

② 自适应、自组织和自学习模糊控制。基本模糊控制的关键是要确定一套行之有效的控制策略,但是在一些复杂的过程中,有时很难精确完整地总结出控制策略。因此,人们在基本模糊控制器的基础上,发展出具有自调整、自适应能力的控制器。

1979年,Procyk和Mamdani发表了《语言自组织控制器》的研究论文^[3],首次实现了模糊控制规则的自动修改,为自适应模糊控制的研究奠定了基础。由于文献[3]提出的自组织模糊控制器结构复杂、计算量大,许多学者对此进行了改进和简化。1982年,龙升照和汪培庄提出了解析描述的模糊控制规则自调整方法^[8]。

(2) 基于模型的 T-S 模糊控制

对于无法或很难建立对象数学模型的复杂控制问题,传统的控制方法无能为力,而Mamdani模糊控制器却可以提供简单有效的解决方案,充分显示了模糊控制的优越性。但是由于缺乏对象的数学模型,无法对控制系统的稳定性和性能指标进行理论研究,也无法进行仿真实验,控制器的设计只能依靠专家的经验进行个案处理。近年来提出的另一类模糊控制方法是先建立对象的数学模型,根据数学模型对控制器的稳定性和性能指标等进行理论分析与仿真实验,再设计模糊控制器。

近几年,基于模型方法逐渐占优势,而T-S模糊系统是最常用的模糊模型,并在理论和实际应用领域取得了较大进展。Takagi和Sugeno在1985年提出了基于模型的模糊控制系统^[9],控制规则前件依然是模糊量,后件是输入的线性组合。后来的研究表明,很多控制问题都可以归结为T-S模糊系统^[10-13]。T-S模糊模型基于输入空间的模糊划分,可以看作分段线性划分的扩展,可以表示成^[14]

if-then 型

$$R_i: \text{if } \xi_1 \text{ is } M_{i1} \text{ and } \xi_2 \text{ is } M_{i2}, \dots, \xi_n \text{ is } M_{in}, \text{ then} \\ s\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t) \quad (i = 1, 2, \dots, r). \quad (1.1)$$

输入输出型

$$s\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^r w_i(\xi) [\mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t)]. \quad (1.2)$$

其中,

$$w_i(\xi) = \frac{\prod_{j=1}^n M_{ij}(\xi_j)}{\sum_{i=1}^r \prod_{j=1}^n M_{ij}(\xi_j)},$$

$$0 \leq w_i(\xi) \leq 1, \quad \sum_{i=1}^r w_i(\xi) = 1.$$

$\xi = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \cdots \quad \xi_n]$ 为前件变量, 可以是状态或输入、输出变量。 $M_{i1}, M_{i2}, \dots, M_{in}$ 为模糊变量, r 为模糊规则数。

$$s\mathbf{x}(t) = \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t), & \text{连续系统;} \\ \mathbf{x}(t+1), & \text{离散系统.} \end{cases} \quad (1.3)$$

T-S 模糊模型建模方法的本质在于: 一个整体非线性的动力学模型可以看成许多个局部线性模型的模糊逼近^[15]。

基于 T-S 模糊模型的模糊控制器的设计, 即考虑对于每一个子系统首先设计一个局部的线性状态反馈。例如, 可以采用极点配置的设计方法, 或线性二次型最优控制的设计方法, 来设计局部状态反馈控制器。控制器的模糊规则具有与式 (1.1) 相同的模糊规则前件, 这种控制器通常又被称作 PDC (Parallel Distributed Compensations) 模糊控制器^[16-17]。

if-then 型

$$\begin{aligned} R_i: & \text{ if } \xi_1 \text{ is } M_{i1} \text{ and } \xi_2 \text{ is } M_{i2}, \dots, \xi_n \text{ is } M_{in}, \text{ then} \\ & \mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_i \mathbf{x}(t) \quad (i = 1, 2, \dots, r). \end{aligned} \quad (1.4)$$

输入输出型

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{i=1}^r w_i(\xi) \mathbf{K}_i \mathbf{x}(t). \quad (1.5)$$

T-S 模糊模型的提出, 为模糊系统稳定性分析提供了系统化框架, 以后的模糊系统的稳定性分析主要是针对 T-S 模糊系统进行的, 稳定性定义和条件都是在 Lyapunov 意义稳定性框架中的。也就是说, 本书针对模糊系统的研究, 均是建立在 T-S 模糊模型的基础上进行的。

1.1.2 模糊控制理论研究动向

如果将 1974 年 Mamdani 首次将模糊集合理论应用于蒸汽机控制作为起点,

迄今为止,模糊控制理论的研究有四十多年的历史。近年来,随着计算机技术的迅速发展和应用,围绕模糊控制的稳定性分析、建模与辨识(获取规则和建立在模型基础上的控制的问题)、系统设计方法、系统性能改进等基本问题,国内外学者进行了深入的研究,使模糊控制理论的研究和应用得到了极大的发展,出现了一些新的动向,主要表现为如下。

① 运用非线性理论和鲁棒控制理论进行稳定性分析与可靠控制系统设计。由于模糊系统的非线性和智能性,控制器设计从根本上说不可能得到解析解,但可以通过模糊系统模型的非线性逼近,通过数值方式求解。基于模型的系统分析和设计可以实现较理想的模糊控制。

② 运用自适应、神经网络、遗传算法、变结构及其相互的交叉结合,进行高性能模糊控制器的设计研究,从而改变早期基于人类专家知识的规则获取方式,进行规则的自组织学习、控制系统性能的优化等,使模糊控制系统朝着集成智能化方向发展。

③ 研究对象从单变量系统扩展到多变量系统,形成许多解耦模糊控制方法。

④ 应用领域从工业过程扩展到许多复杂的非线性系统,许多新的思想和研究成果正较快地应用于工程实际。

下面从模糊控制理论的几个基本问题简述上述新动向,其中模糊控制系统稳定性分析和鲁棒可靠控制系统设计是中心问题,一直是模糊控制理论的热点和难点课题。

① 稳定性和鲁棒性。研究方法有:描述函数分析法、相平面法、语言关系模型分析法、Lyapunov 稳定性理论、超稳定理论、Popov 判据、圆判据、模糊穴-穴映射、数值稳定性分析方法,以及最近出现的鲁棒控制理论分析方法和 LMI 凸优化方法等。其中,语言关系矩阵、穴-穴映射及以 Lyapunov 为代表的非线性理论的方法最为活跃,显示出较大的潜力。存在的问题是这些方法大都针对某种模型或模糊系统,难以形成完善的理论体系。

② 建模与辨识。模糊控制理论形成以后,重要的问题之一是模糊规则的获取。然而,对于复杂大型的系统来说,早期基于人类专家获取规则的方法,要保证规则的一致性和完整性是很困难的。为实现理想的模糊控制,扩大模糊控制的应用范围,必须建立以辨识模型为基础的系统的分析和设计方法,模糊系统的建模和辨识就成为主要的研究内容之一。

模糊辨识是根据给定系统的输入输出数据对,找出一个模糊系统去近似该系统。一般来说,模糊系统模型比线性系统模型更能描述一个给定系统和人类操作

者的直观想法,正因为如此,模糊系统的辨识比传统的线性模型辨识方法难度大。同常规辨识一样,模糊辨识包括结构辨识和参数辨识两部分。

在结构辨识中,要划分模糊输入输出空间,这相当于常规辨识中系统阶数的辨识,用到的主要方法有:模糊网格法(Fuzzy Grid)、自适应模糊网格法(Adaptive Fuzzy Grid)、模糊中心聚类法(Fuzzy C-means Cluster)、模糊树搜索法等。对参数辨识问题,常用的方法有最小二乘法、正交估计、回归最小二乘模糊神经网络、均值最小二乘法和遗传算法等。

从理论上讲,模糊系统的辨识是一个难点课题,还存在不少的问题,如模糊辨识算法的抗干扰问题、模糊模型的验证问题和可辨识性问题等,还有许多工作需要进行深入的研究。

③ 设计方法的研究。近年来,主要侧重于常规模糊控制系统,对模糊规则的优化、在线学习及修正,修正因子的在线学习,隶属函数的选取和调节等,应用了多种思想。主要有:模糊自适应、模糊神经网络、PID 参数的模糊在线自整定、自适应神经元学习、二次型性能指标、单纯形法、专家自学习法、多步预报自学习、增强式学习算法、遗传算法(GA)及 BP 神经网络、预测及多变量解耦等^[18,19]。其中,模糊自适应、模糊神经网络、遗传算法、自适应神经元学习等方面的研究,反映了人们利用自适应、神经网络和遗传算法等思想,使模糊控制器具有自适应及智能化的倾向。由于神经网络具有万能逼近学习能力,达到了模糊控制众多参数的优化和在线自学习的目标,并且由于模糊系统本质上是非线性的,使得有很强非线性处理能力的神经网络、遗传算法和自适应思想的研究成为自然。这些研究为模糊控制技术的进一步拓展提供了广阔的空间。因此,这方面的研究是一个热点,值得注意和重视。

而对 T-S 模糊系统,控制器的设计可以利用现有的控制理论,理论性较强,是目前研究的另一个热点。另外,控制器的设计可以利用根轨迹、极点配置^[20-22]、最优二次调节器、自适应控制^[23]、LMI^[20-24]、二次稳定和 H_∞ 控制理论^[25,26] 等方法。

总之,常规模糊控制器的设计方法研究,有向高度自适应自动系统发展的迹象,即自动产生隶属函数及模糊规则,并对它们进行在线修正。而这些方法基本上都是对常规的模糊控制系统进行的改进,并且神经网络和遗传算法等方法的实时性及收敛性与实际应用还存在一定的差距。对 T-S 模糊系统,从原理上讲,其控制器设计可以利用现有的线性控制理论的方法,并可方便地进行稳定性判定。由于 T-S 系统具有较好的系统描述能力,因而具有较好的发展前景。