

Decentralized Adaptive Fuzzy Control for Large-Scale Nonlinear Systems

非线性大系统 分散自适应模糊控制

黄益绍 著

Nonlinear Systems
Fuzzy Control
Adaptive
Decentralized



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

Decentralized Adaptive
Fuzzy Control for
Large-Scale
Nonlinear Systems

非线性大系统
分散自适应模糊控制

黄益绍 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

非线性大系统分散自适应模糊控制/黄益绍著.

—长沙:中南大学出版社,2015.9

ISBN 978-7-5487-1905-2

I. 非... II. 黄... III. 非线性系统(自动化)-模糊控制

IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 212408 号

非线性大系统分散自适应模糊控制

黄益绍 著

☐责任编辑 谭 平

☐责任印制 易建国

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-88876770 传真:0731-88710482

☐印 装 湖南地图制印有限责任公司

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 10.25 ☐字数 255 千字

☐版 次 2015 年 9 月第 1 版 ☐印次 2015 年 9 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-1905-2

☐定 价 35.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前言

自动控制是研究利用外加的设备或装置,使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数在没有人直接参与的情况下就能自动按照预定的规律运行的技术科学。自动控制理论在 19 世纪的发展经历了三个历史阶段,19 世纪 50 年代以传递函数为基础的经典控制理论,60 年代以状态空间法为基础的现代控制理论,70 年代以大系统与智能控制为主要内容的第三代控制理论。目前,“大系统”尚无一个公认的确切的定义,当前的观点是从下列两种不同角度来描述:其一,为简化计算和实现方便而将一个系统解耦,即分解为相互关联的子系统来研究的系统就称为大系统;其二,如果一个系统的规模大得使通常的控制理论与技术不能成功地应用于这个系统,即不能以适当的时间和计算量来合理解决这个系统的建模、分析、控制、设计和计算等问题,就称之为大系统。这里说的规模大指的是系统的维数高,而非宏观上一个装置的尺寸。显然,这是从系统结构的复杂性来考虑的,故大系统也称为复杂大系统。一般来说,需要采用分散或递阶方式进行控制的系统就称为大系统。

从 20 世纪 70 年代到 90 年代,大系统分散控制与递阶控制已发展得相当成熟,以 Sandell, Davison, Mesarovic, Tamura, Hassan, Singh, Šiljak 与高为炳院士等为代表的众多学者都在大系统控制方面做出了奠基性的工作,并对结果进行了系统性的总结。然而,这些结果主要是建立在线性大系统基础上的,而针对非线性大系统控制技术的研究非常缺乏。在最近二十年以来,有关大系统的研究现状概括为如下几个主要方面:分散控制系统的固定模、(非)完全线性大系统的分散控制、随机大系统的分散控制、时滞大系统的分散控制、离散大系统的分散控制、非线性大系统的分散控制与递阶控制以及混合控制、非线性大系统智能控制、非线性大系统控制理论在工程上的应用等。因为自然界真实的系统既是非线性的,又是不确定的,因此非线性控制的研究,特别是自适应智能控制的研究正受到越来越多的重视,并成为近年来国际上的研究热点。此外,由于子系统之间的信息交换有时在物理上无法实现,并由于缺少与一些单一集中控制器相应的足够计算能力,在这种复杂情况之下分散控制技术可能需要优先使用。本书即着眼于几类典型的不确定非线性大系统的分散自适应模糊控制技术的阐述。

作者通过系统地组合 Lyapunov 函数设计法、反馈线性化方法、分散控制技术和模糊控制技术等,以求在一定程度上促进控制科学的深入,并为一些实际工程问题提供更好的解决方案,这便是作者写作本书的目的之一。此外,当前我国有关非线性大系统控制方面的学术著作与教材相当匮乏,作者希望本书的出版能起到抛砖引玉之效。本书主要取材于作者近几年在国内外公开发表的若干学术论文,书中对所提分散控制算法与现有相关算法作了比较,结果表明提出的分散自适应模糊控制器具有适用性更强、性能更加优越、设计更加合理等优点。另一方面,书中对提出的控制器绝大多数都通过数值仿真验证了它们的有效性,它们能够成功完成既定的控制任务。

本书部分内容在写作过程中,作者曾经得到南京航空航天大学周德群教授及中国地质大学(武汉)吴敏教授、何勇教授等的指导和帮助。同时,还得到中南大学余伶俐博士后的帮助。在本书出版过程中,作者得到中南大学出版社谭平编辑的热情帮助,还得到长沙理工大学硕士生詹焰的协助。在此,我向他们表示衷心感谢!

本书中作者的部分研究内容和出版得到了国家自然科学基金青年项目(61104014)、湖南省教育厅科学研究青年项目(12B004)、长沙理工大学学术著作出版专项经费与中国博士后科学基金项目(20110491270)的支持,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点与错误,殷切希望广大专家学者批评指正。

黄益绍

2015年9月于长沙

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 本书的研究背景	(1)
1.1.1 智能交通系统与车辆跟随控制问题	(1)
1.1.2 搅拌釜反应器与温度控制问题	(2)
1.1.3 机器人学与机器手控制问题	(2)
1.2 本书研究的意义	(3)
1.2.1 理论意义	(3)
1.2.2 实践意义	(4)
1.3 经典自适应控制系统的发展	(5)
1.3.1 模型参考自适应系统与自校正调节器	(5)
1.3.2 间接与直接自适应控制	(5)
1.4 非线性控制研究概况	(6)
1.5 大系统的产生与研究现状	(8)
1.5.1 大系统的产生和控制方法	(8)
1.5.2 大系统研究现状	(9)
1.5.3 大系统理论面临的挑战	(11)
1.6 模糊控制的研究状况	(12)
1.6.1 模糊控制的产生与发展	(12)
1.6.2 自适应模糊控制的研究现状	(13)
1.6.3 模糊控制研究面临的挑战	(16)
1.7 本书的内容与结构	(16)
第二章 模糊控制的理论基础——分散 SPC 模糊系统	(18)
2.1 引言	(18)
2.2 两种模糊系统	(18)
2.3 分散 SPC 模糊系统	(19)
2.3.1 模糊规则库	(19)
2.3.2 单点模糊器	(19)
2.3.3 乘积推理器	(20)
2.3.4 中心平均解模糊器	(20)
2.3.5 分散 SPC 模糊系统——非线性映射	(20)
2.3.6 模糊系统的双重作用	(21)

2.4 本章小结	(21)
第三章 分散间接自适应输出反馈模糊控制	(22)
3.1 引言	(22)
3.2 基于 H_∞ 跟踪与模糊观测器的分散 IAFC	(23)
3.2.1 问题描述	(23)
3.2.2 分散输出反馈设计	(24)
3.2.3 稳定性分析	(27)
3.3 基于线性观测器的分散鲁棒 IAFC	(29)
3.3.1 问题描述	(29)
3.3.2 分散输出反馈设计	(30)
3.3.3 总设计算法与稳定分析	(33)
3.4 控制算法的比较	(35)
3.5 实例仿真与比较	(37)
3.5.1 两种分散 IAFC 算法的仿真	(37)
3.5.2 分散控制算法的仿真比较	(40)
3.6 本章小结	(40)
第四章 分散直接自适应输出反馈模糊控制	(43)
4.1 引言	(43)
4.2 基于 H_∞ 跟踪与线性观测器的分散 DAFC	(44)
4.2.1 问题描述	(44)
4.2.2 分散输出反馈设计	(45)
4.2.3 稳定性分析	(48)
4.3 基于奇异扰动与 HGO 的分散 DAFC	(50)
4.3.1 问题描述	(50)
4.3.2 分散状态反馈设计	(50)
4.3.3 分散输出反馈设计	(53)
4.4 控制方案的比较	(57)
4.5 数值仿真	(59)
4.6 本章小结	(63)
第五章 分散杂合自适应输出反馈模糊控制	(64)
5.1 引言	(64)
5.2 基于状态反馈的分散 HAFC	(65)
5.2.1 问题描述	(65)
5.2.2 分散 HAFC 设计	(66)
5.2.3 稳定性分析	(68)
5.2.4 实例仿真	(69)

5.3 基于观测器的分散 HAFC	(71)
5.3.1 问题描述	(71)
5.3.2 分散 HAFC 设计	(71)
5.3.3 总控制算法和稳定性分析	(74)
5.3.4 实例仿真	(79)
5.4 基于观测器的协作分散 HAFC	(81)
5.4.1 问题描述	(81)
5.4.2 协作分散 HAFC 设计	(82)
5.4.3 稳定性分析	(86)
5.4.4 数值仿真	(88)
5.5 控制方案的比较	(92)
5.6 本章小结	(93)
第六章 分散自适应模糊控制的扩展——MIMO 情形	(94)
6.1 引言	(94)
6.2 分散间接自适应状态反馈设计	(95)
6.2.1 问题描述与 MIMO 模糊系统	(95)
6.2.2 分散 IAFC 设计	(96)
6.2.3 改进的分散 IAFC	(100)
6.3 分散杂合自适应输出反馈设计	(103)
6.3.1 问题描述	(103)
6.3.2 分散 HAFC 设计	(103)
6.3.3 改进的分散 HAFC	(109)
6.4 强关联大系统分散 IAFC 设计	(111)
6.4.1 问题描述	(111)
6.4.2 分散 IAFC 设计与稳定性分析	(112)
6.4.3 改进的分散 IAFC 与稳定性分析	(115)
6.5 控制方案的比较	(119)
6.6 数值仿真	(120)
6.7 本章小结	(126)
第七章 分散自适应模糊控制算法在工程上的应用	(127)
7.1 引言	(127)
7.2 分散控制算法在 AHS 中的应用	(127)
7.2.1 现有车辆跟随控制器研究的现状及其局限性	(127)
7.2.2 改进的车辆纵向跟随控制器	(128)
7.3 分散控制算法在 CSTR 中的应用	(131)
7.3.1 现有温度控制器研究的现状及其局限性	(131)
7.3.2 改进的温度控制器	(132)

7.4 分散控制算法在机器人控制中的应用	(136)
7.4.1 现有机器人分散控制研究的现状及其局限性	(136)
7.4.2 改进的机器人分散控制器	(137)
7.4.3 两足行走机器人改进的分散控制器	(138)
7.5 CSTR 温度和机器人的集中控制器	(141)
7.6 本章小结	(141)
参考文献	(142)

第一章 绪 论

1.1 本书的研究背景

1.1.1 智能交通系统与车辆跟随控制问题

当前,交通运输是国民经济的大动脉,但是对高速公路使用需求的增加却存在一些瓶颈,比如资金、土地等稀缺资源的有限性使得路面不能随意扩展,公路建设造价太昂贵了经济上会承受不起,采取限制某些枢纽干道的交通流量或呼吁错开上下班时间的做法又会给人们的生活与工作带来极大不便。这样看来,解决公路拥塞和交通安全问题需要另辟蹊径。美国在 20 世纪 90 年代初提出的智能交通系统(intelligent transportation systems, ITS)为世界各国解决当前和未来交通问题提供了最佳的解决方案。ITS 是人工智能、自动控制、计算机、信息与通信以及电子传感器等高科技技术的集成系统,它由 6 个相互关联的子系统构成^[1-5],其中先进车辆控制系统(advanced vehicle control systems, AVCS)是其重要组成部分之一。AVCS 能够提升驾驶员的驾车能力,全部或部分减轻其驾驶负担,其最终发展是自动公路系统(automated highway systems, AHS)。

AHS 的车道与车辆都装备有传感器、计算机和通信等特别装置,AHS 的车辆在其车道上能够自动行驶^[6]。AHS 把进入高速公路的车辆组成车队(vehicle platoons),车辆间设定固定的间距,车辆入队后通过在车体上安装的控制器根据领头车辆和前面车辆的状态信息产生控制命令,实现车辆自动跟随行驶。车辆跟随控制分为纵向控制和侧向控制。纵向控制器使车辆维持一个既定的速度,用于控制车辆单独行驶(即作巡行驾驶)、紧跟随其前车辆并保持一个安全距离或执行其他速度与跟踪任务;侧向控制器用来使机车拐弯,改变车道或执行其他额外驾驶任务。当前,国外已有很多学者针对 AHS 提出了一些控制器或观测器的设计方法以及一些相关的操作技术,如车辆纵向跟随控制器^[7-10]、侧向跟随控制器^[11]、纵向与侧向跟随组合控制器^[12]、车道改变控制方案^[13-15]、疏通车道阻塞的微型车辆的控制器^[16]、确保车辆不与领头车辆碰撞的组合控制器^[17]、车辆自适应巡行控制器^[18]、公路系统中的车流控制方案^[19-21]、应急车辆操作与控制方案^[22]、基于多车辆协作的运动控制器^[23]与诊断车辆是否保持在车道内的 Luenberger 状态观测器^[24]以及估计车辆侧向速度的非线性观测器^[25]。此外,文献[26]提出了一种用于监测纵向与侧向控制器中所有传感器和执行器的全故障诊断系统,文献[27]提出了一种在发生车辆碰撞时可以提高额外安全保障的备用缓冲器,文献[28]提出了基于多主体的协同驾驶技术,文献[29]提出了给车辆分类成队的策略(关于可列的车队稳定的概念见文献[30]),而文献[31]则讨论了交通网络的集成建模方法。

我国早在 20 世纪 70 年代就将电子技术与信息技术应用于交通运输领域,但直到 90 年

代中后期才由学术界引入 ITS 的概念。在 1997 年 7 月召开“中欧 ITS 研讨会”以后,确定了 ITS 将作为中国科技发展以及高新技术产业发展战略的重要组成部分,并于 2000 年成立了全国 ITS 发展协调指导小组,提出了中国 ITS 的发展体系和战略框架。由此可见,我国 ITS 的最终发展目标是实现“车—路—人”的高度一体化,以最大限度提高运输效率与安全性,而 AHS 是实现这一目标的具体体现。我国智能交通发展重点要向两个方面发展:一方面要“以人为本”,注重向应用实际发展,以服务为目的,如开发国家高速公路联网不停车收费和服务系统,研发远洋船舶及货物运输在线监控系统等等;另一方面向智能交通技术开发的前沿发展,以自主创新为龙头,以实现产业化为目的。

1.1.2 搅拌釜反应器与温度控制问题

在工业生产中,经常需要用容器来进行各种各样的化学反应。连续搅拌釜反应器(continuously stirred tank reactor, CSTR)是工业生产过程中一种重要的生化反应压力容器,其作用是合成各类树脂,比如电脑主板基板、喷绘写真等材料都是在反应釜中合成后再加工而成的。CSTR 是比较危险的反应器,内部介质会发生剧烈反应。CSTR 有时也简称为反应釜、反应器、分解锅、聚合釜等,由釜体、釜盖、夹套、搅拌器、传动装置、轴封装置、支承等组成,一般用碳锰钢、不锈钢、锆、镍基(哈氏、蒙乃尔、因康镍)合金及其他复合材料制作而成。CSTR 广泛应用于石油、化工、橡胶、农药、染料、医药、食品,用来完成硫化、硝化、氢化、烃化、聚合、缩合等工艺过程。根据反应釜的制造结构可分为开式平盖式反应釜、开式对焊法兰式反应釜和闭式反应釜三大类,每一种结构都有其适用范围和优缺点。根据反应釜的密封型式不同可分为填料密封、机械密封和磁力密封。

CSTR 工作时,需要经过搅拌、加热和冷却。搅拌形式一般有锚式、桨式、涡轮式、推进式或框式等,加热方式有电加热、热水加热、导热油循环加热、远红外加热、外(内)盘管加热等,冷却方式为夹套冷却和釜内盘管冷却,搅拌桨叶的形式等。工业生产中为了使 CSTR 较好地在其内的生化反应,不但需要控制好进料器与反应釜中化学物质的含量和温度,而且必须处理因进料速度波动、搅拌噪声和搅拌不当以及对硫体催化裂化(fluid catalyzed cracking)和介质大块聚合(mass polymerization)等的反应机理因认识不甚清楚而带来的许多不确定。此外,由于生化反应是一个极其复杂的非线性过程,状态变量往往难以测量,平衡点不唯一不稳定,因此控制 CSTR 的反应温度会面临巨大的挑战。近十年以来,国内外已有一些学者提出了不少有关 CSTR 温度的控制技术,如温度鲁棒稳定法^[32, 33]、扰动解耦法^[34, 35]、PID 容错控制法^[36]、温度 H_∞ 跟踪法^[37] 以及利用环戊二烯生产环戊醇的滑动模控制法等^[38]。

1.1.3 机器人学与机器手控制问题

任何一个国家的工业化与信息化发展离不开机器人的广泛使用。根据国际标准化组织(ISO)对机器人的定义^[39],“机器人是一种自动的、位置可控的、具有编程能力的多功能机器手,这种机器手具有几个轴,能够借助于可编程序操作来处理各种材料、零件、工具和专用装置,以执行各种任务”。机器手的圆柱(转动)关节与棱柱(移动)关节统称为单自由度(degrees of freedom, DOF)柱关节。从 20 世纪 60 年代开始至今,机器人技术在欧美、日本等发达国家已获得了巨大的发展与广阔的应用,如工业制造中的焊接、装配、搬运装卸、铸造与材料加工、原子能电站的维护以及对人体有害物质的化学处理等更是离不开机器人。

与此相应,有关机器人学的一些成果也层出不穷,如对机器人的动力学分析^[39-42]、柔性机器人时滞神经网络的辨识^[43]、机器人运动规划的变结构控制^[44-46]、PID 控制^[47]、自适应模糊控制^[48]、机器人神经模糊控制^[49]、机器人定位^[50-52]、不完整机器人系统运动鲁棒控制^[53, 54]和机器人输出反馈设计^[55, 56]等。随着机器人技术的发展及生产实践的需求,人们对机器人的需求不再限于单个机器人了,研究人员对由多个机器人组成的系统越发感兴趣。更重要的是,正如现实生活中许多工作需要多人合作才能完成一样,当利用机器人完成给定工作时,很多工作也需要多个机器人的配合才能完成。多机器人技术的研究主要涉及任务规划^[57]、队形保持^[58, 59]、危险环境勘察^[60, 61]与众多的协作搬运物体控制方案^[62-73]等。此外,单个机器人手的分散自适应控制方法^[74-80]和递解控制策略^[81]、关联机器人手分散神经网络控制方案^[82, 83]以及协作机器人手的分散控制技术^[84-88]。自 20 世纪 90 年代以来,随着微电子和计算机技术的发展以及机器人研究的不断深入,机器人性能大幅度提高,成本日益下降,使机器人产业蓬勃兴起,机器人技术也越来越受到各国政府的关注,得到对其研发的大力支持。

在我国,机器人研究与应用是在 20 世纪 70 年代末发展起来的。机器人研究先后列入国家“七五”、“八五”科技发展计划及“863”计划等。经过二十多年的发展,取得了显著的成果,其中一些成果已接近或达到国际先进水平,但与发达国家相比,我国在机器人技术整体研究水平和产品、应用工程的实用开发方面还存在不少的差距,机器人技术的研究并不活跃。机器人技术集机械、电子、材料、计算机、传感器、控制等多门学科于一体,是国家高科技实力和发展水平的重要标志。如果说在电子信息技术革命以前,汽车是一个国家机械制造业综合水准的代表,那么我们可以说机器人则是衡量一个国家现代机电制造技术的样品。“机器人学是现代机电制造技术的基础学科^[40]”,这是一个被工业发达国家已经验证了的事实。

1.2 本书研究的意义

1.2.1 理论意义

随着科学技术的不断发展,人们对实际生产过程的分析要求日益精密,各种较为精确的分析和科学实验的结果表明,任何一个实际的物理系统本质上都是非线性的,且其动态行为有时还呈现出不确定性。因此,所谓线性只是对非线性的一种简化或近似,或者说是非线性的一种特例。无论是现在还是将来,非线性控制理论毫无疑问都是控制科学的主旋律。本书针对不确定非线性大系统提出的分散自适应模糊控制设计是经典自适应控制理论、非线性控制技术、大系统分散控制方法与模糊控制技术等的综合,能够进一步丰富和发展控制科学的诸多领域,揭示彼此之间的内在联系与规律,并在它们之间架起了桥梁。

众所周知,控制系统是否具有好的鲁棒性(包括稳定鲁棒性和品质鲁棒性)是其最终能否成功应用于工程实践的关键。本书提出的分散间接自适应模糊控制(indirect adaptive fuzzy control, IAFC)能够融合被控对象知识,而提出的分散直接自适应模糊控制(direct adaptive fuzzy control, DAFC)能够融合控制知识,这些都能够提高控制系统的鲁棒性。尤其,本书提出的分散杂合自适应模糊控制(hybrid adaptive fuzzy control, HAFC)算法使得现有的 IAFC 与 DAFC 两种基本的设计方法在同一个非线性大系统框架下统一起来,设计的控制器能融合上

述两种模糊信息,克服了无论 IAFC 还是 DAFC 均不能同时融合两种模糊知识的缺陷,这就大大增强了控制系统的稳定性、收敛性与鲁棒性。

1.2.2 实践意义

1. 为解决 ITS 车辆的纵向跟随控制问题提供新的技术和方法

本书无论针对单输入单输出(single-input-single-output, SISO)非线性大系统提出的分散控制算法,还是针对多输入多输出(multiple-input-multiple-output, MIMO)非线性大系统提出的分散控制算法都具有一般性,即被控对象包括了众多的实际非线性大系统,每个算法都能够用来设计 AHS 车辆的纵向跟随分散自适应模糊控制器。该控制器设计方案独特优点是把每一辆车作为一个子系统,车队或车流作为一个大系统,充分考虑了车辆之间的信息传递特征,且不需要知道系统复杂的动态方程,提出的分散输出反馈控制算法还允许系统状态变量也不可量测,这在工程上具有更加重要的应用价值。

2. 为解决 CSTR 的温度控制问题提供新的技术和方法

本书提出的所有分散控制算法都适合设计 CSTR 的温度与介质含量控制器。虽然 CSTR 内物质的过程动态其实是一类 MIMO 的非线性动态过程,但是依据这类系统的特点,只需运用本书针对 SISO 非线性大系统提出的分散控制算法即可。当前,人们对硫体催化裂化和介质大块聚合的复杂机理的认识仍不甚清楚,因此建模误差在所难免,这就要求控制设计必须需具有很强的鲁棒性,能够抑制建模误差和外界扰动。本书提出的分散自适应控制器不需知道物质过程动态准确的数学模型,也不需要状态变量可测,并考虑了建模误差与外界扰动的影响,因此更加适合做 CSTR 的温度控制器。控制好化学过程的温度,是生产合格工业制成品、杜绝工业次品的前提,是提高先进生产率的一个关键环节,也是保障车间工作人员人身安全的必要措施。

3. 为解决机器人控制问题提供一些新的技术和方法

本书针对 MIMO 非线性大系统提出的分散模糊控制算法的特殊情形(即不考虑单个机器人手之间的关联)能够用来设计具有多个关节的单机器人集中控制器。另一方面,针对 SISO 强关联非线性大系统提出的协作分散 HAFC 算法能够用来设计单机器人或关联多机器人(即考虑了每个机器人手之间的关联)的分散控制器,能够允许机器人手之间互相传递信息。这些算法可以解决数学模型不确定且机器人系统状态变量不可量测的分散控制设计问题。

发展机器人控制技术既是推进我国经济结构战略性调整、以信息化提升我国制造与自动化技术水平、加快实现国家工业化的迫切需要,也是瞄准国际前沿、力求超越、提高综合国力、增强国际地位的迫切需要。先进机器人技术不仅是国家工业关键装备的重要支撑技术,也是国家空间计划、国防装备以及与社会安全紧密相关的反恐防爆装备的核心技术之一,同时还是国家发展高技术服务业(如助老助残机器人、家庭服务机器人)等新经济增长点的关键技术。通过研发机器人控制技术,可以提升我国科技竞争力,改善人民生活水平。与单个机器人相比,多机器人系统具有更好的时间与空间分布性,彼此传感器之间的信息可以有效互补,具有更高的数据冗余度、良好的鲁棒性和更低的经济成本以及较强的整体性能与容错能力,尤其能够完成许多单个机器人无法完成的任务。

1.3 经典自适应控制系统的发展

1.3.1 模型参考自适应系统与自校正调节器

模型参考自适应控制(model reference adaptive control, MRAC)系统最早在1958年由美国麻省理工学院的Whitaker及其同事提出,也称MIT规则,主要用局部参数优化法或性能指标极小化进行设计,但是保证不了系统的稳定性。为了解决MRAC系统的稳定性问题,1965年Butchar等人,1966年英国Parks,1968年Philipson提出了用Lyapunov稳定性理论设计MRAC系统的方法。法国Laudau于1969年提出与Lyapunov稳定性理论平行的另一类用来设计MRAC系统的稳定性理论,即Popov超稳定性理论,他把设计过程分为四步进行。自校正调节器(self-tuning regulator, STR)最早在1973年由Astrom等人提出。随后,1976年英国学者Clarke进一步提出广义最小方差自校正控制器(self-tuning controller, STC),1979年Wellstead等人提出了零极点配置STR,1980年Astrom等人提出了零极点配置STC。自适应控制设计的格式化也引起了极少数学者的兴趣。1980年和1981年,Egardt和Landau分别给出了离散时间MRAC与SRC的统一格式。1982年,Laudau又给出了MRAC与随机STR的组合形式^[89]。但是,这些方案只适应于最小相位系统。

模型参考自适应控制与自校正控制的角度不同,在MRAC中更新参数是为了使被控对象与参考模型之间的跟踪误差最小,而在STC中更新参数是为了使得输入输出之间数据的拟合误差最小。但是,二者也有密切联系,从理论上可以放在一个统一的框架下,因为这两类系统都有一个用于控制的内回路和一个用于估计参数的外回路。其次,设计MCAC的理论基础为局部参数优化法,Lyapunov稳定性理论与Popov超稳定性理论;设计STC的理论基础为系统辨识和随机最优控制理论。再次,这两种方法分析与实施差别大,MRAC灵活性差,但是容易保证稳定性与收敛性,而STC则相反。最后,MRAC一般用于连续时间系统,而STC通常用于离散系统。但是,近年来离散时间系统的MRAC方法与连续时间系统的STC也获得了发展。

1.3.2 间接与直接自适应控制

根据MRAC对未知被控对象调节方式的不同,自适应控制也可分为间接自适应控制(indirect adaptive control, IAC)与直接自适应控制(direct adaptive control, DAC)两种基本形式^[90],它们在1976年由Narendra与Valavani在一起发表的论文提出。IAC的基本思想是用未知的被控对象的输入输出数据来估计被控对象的参数,并用这些参数估计值产生一个反馈控制函数去调节控制器的参数;DAC不同,在产生反馈控制信号之前没有明显的被控对象的辨识。所以二者主要不同在于:IAC需要被控对象模型进行在线辨识并用隐式方式去产生控制律;DAC需要一个显式的具有理想特性的参考模型。此外,IAC是用辨识误差,而DAC则用控制或跟踪误差去修改调节器参数。鉴于IAC与DAC结构各有优劣,1989年Duarte等人提出了一种组合了IAC与DAC的杂合自适应控制(hybrid adaptive control, HAC)方案^[91]。在他们设计的杂合自适应律中,辨识误差与控制误差通过闭环估计误差连接起来,大量仿真结果表明这种组合自适应控制器具有更好的性能。1992年,Narendra等人进一步发展了HAC

设计,提出了组合 IAC、DAC 与变结构控制(variable structure control, VSC)的一种 HAC 方案^[92]。仿真表明, VSC 的颤动缺陷被有效克服了。然而必须指出的是,上述两种 HAC 算法都只适用于线性系统。

无论是线性时不变系统还是非线性时变系统,它们与自适应机构所构成的自适应控制系统都是非线性时变系统,分析起来一般非常困难。自适应控制系统的理论问题主要集中在稳定性、收敛性、鲁棒性与性能指标等几个方面,它的收敛性研究一直是控制领域的理论难题,至今仍有一些理论问题尚待解决。近来许多学者在自适应控制系统的稳定性、收敛性与设计方法上又做了大量有益工作,其中有美国的 Narendra, Morse, 澳大利亚的 Goodwin 等。我国中科院陈瀚馥院士、郭雷院士与黄琳院士在稳定性与收敛性方面,冯纯伯院士在鲁棒性方面和程代展教授等在微分几何方面也做了大量很有价值的工作。2007 年,美国学者 Hoagg 等人就一类相对阶未知但有界的最小相位线性时变系统提出了一种参数单调的 DAC。总的说来,针对线性系统的自适应控制的一些新的结果目前已不多见了。经典自适应控制技术经历了提出—形成—完善的发展过程,至今已有 60 年的历史,目前已在许多实际问题中得到广泛应用,如机器人操纵、飞行器与火箭控制、化学过程、电力系统、船舶驾驶与生物工程等。

当前,线性系统自适应控制已经有了比较系统化的理论与方法。此外,在线性系统的控制设计中,如果系统并非全状态可测,则输出反馈或基于观测器的控制技术必须采用。输出反馈在物理上容易实现,但在功能上远不如状态反馈。不过,动态输出反馈与带观测器的状态反馈可以互相转换。观测器状态反馈线性控制系统的设计满足分离性原理,即状态反馈控制律的综合与观测器的综合可以独立进行。

1.4 非线性控制研究概况

自 20 世纪 70 年代来,以意大利学者 Isidori 等为代表发展起来的微分几何(包括微分代数)方法^[93-95]为非线性系统的控制理论找到了一个合适的工具,从而极大地促进了非线性控制理论的发展,实现了非线性控制从理论到应用的一次飞跃。几何方法的最大优点是将对微分流形的子流形的研究转换为对切空间的子分布的研究^[96],如将“能达性子流形”与“能控性李代数”对应起来。用纤维丛的语言来说,切丛同胚于欧氏空间,研究切丛比研究状态空间本身方便得多。因此,几何方法对非线性系统的结构分析、分解与控制设计带来了极大方便。线性化、解耦、零动态、零动力系统与反馈镇定等都是几何方法的直接应用。最近十多年,几何方法虽然逐渐进入了萧条期,突破性的工作已经很少见了,但是如下一些研究热点仍或多或少可以看作是几何方法的直接或间接应用:

1. 非线性间断控制(discontinuous control)

间断控制的突出特点是控制器设计具有良好的鲁棒性,被控系统能够有效衰减外界扰动影响。1991 年美国学者 Slotine 等人^[97],2007 年加拿大学者 Pan 等人^[98]都在滑模或间断控制方面做了不少工作。

2. 非线性 H_∞ 控制

非线性 H_∞ 控制是解决非线性系统鲁棒控制最系统化的方法之一,相关的理论研究主要有可靠控制、控制器的参数化、几乎处处扰动解耦、非标准非线性 H_∞ 控制以及 Hamilton-

Jacobi-Issacs(HJI)方程的求解^[99]。2004年旅居加拿大的中国Liu等人^[34]以及2006年我国台湾的Chen等人^[100]就MIMO非线性系统基于反馈线性化方法都提出了几乎处处扰动解耦的 H_∞ 跟踪设计。

3. 反步(backstepping)控制

当被控系统具有严反馈(strict-feedback)形式或级联(cascaded)形式时,控制设计可以采用反步技术。反步技术是交叉选择Lyapunov函数和反馈控制的递归过程,它先将整个非线性系统的控制问题分解为一系列低阶(甚至是标量)子系统的控制问题,然后利用后者存在的额外自由度在一个较为宽松的条件下求解系统的稳定问题和鲁棒控制问题。当前,反步设计已形成了比较规范的步骤,但是常常需要采用完全的状态反馈。1999年与2004年,Liu等人分别研究了MIMO非线性的 H_∞ 控制^[34]与鲁棒稳定^[101]问题。

4. 半全局镇定(semi-global stabilization)

在这方面的控制设计大多基于反馈线性化方法,并采用动态输出反馈方式。旅居美国的中国Wei等人^[102]以及美国的Yang等人^[103]分别在2001年与2006年解决了几类MIMO非仿射非线性系统的半全局镇定问题。

5. 观测器设计

自适应观测器与高增益观测器(high gain observer, HOG)的设计是具有挑战性的理论问题。意大利的Marino等人在自适应观测器方面^[104],美国Hassan与其学生Atassi等人在基于奇异扰动技术(singular perturbation technique)的高增益观测器方面^[105-108],都进行了系统性的深入研究,并取得了丰硕的成果。在非线性控制设计中,如果系统并非全状态可测,则控制器设计可运用分离原理分两步进行:第一步,设计满足控制目的的全局状态反馈控制器;第二步,设计足够快的高增益观测器来恢复在状态反馈下的性能。这种恢复可以运用奇异扰动系统的渐进分析方法来说明。2002年,韩国的Lee等人基于输入输出线性化与奇异扰动技术处理了一类MIMO非最小相位非线性系统的控制问题^[109]。

6. 控制器奇异性问题

设计MIMO非线性控制系统时常常需要处理或规避可能的控制器奇异性问题。当前,不少学者基于高频增益(high-frequency gain, HFG)矩阵因式分解的方法,通过假设控制增益矩阵 $G(x)$ 具有非零顺序主子式来规避控制器的奇异性,即假定 $G(x) = S(x)DT(x)$,式中 x 是系统状态向量, $S(x)$ 是一个对称正定矩阵, D 是一个对角矩阵,而 $T(x)$ 是一个上三角单位1矩阵。近年来,巴西的Costa等人^[110](2003),我国的Zhou等人^[111](2008)与美国的Chen等人^[112](2008)都在此方面做过一些有益的工作。

7. 非线性控制算法的应用

非线性系统是对现实的物理模型的真实或接近真实的描述,其理论上的研究具有广阔的应用前景。例如,2004年Liu等人和2005年Chen等人考虑了两类MIMO非线性系统几乎处处或近似扰动解耦的反步控制问题,并研究了其在CSTR化学过程中的应用^[34, 35];2007年,英国Peng等人把非线性输出频率响应函数(nonlinear output frequency response function, NOFRF)的概念扩展到一类用多输入伏尔拉特级数(Volterra series)描述的非线性系统,提出了一种从输入频率域确定输出频率域的算法并将其应用于能量转换现象^[113]。迄今,非线性系统的各种分析与设计技术大多离不开微分几何这一基本工具。

总的说来,非线性系统自适应控制至今几乎没有一般的理论体系。显然,非线性系统自

适应控制的深入发展受制于非线性理论与方法的发展。随着非线性微分几何理论的发展以及有效的计算方法容易得到,非线性系统的自适应控制理论越发清晰起来。当前,对于几类重要的非线性控制系统,自适应控制现在已发展得比较成功,但是它们通常需要满足如下几个条件^[97]:①系统的全状态是可测的;②非线性被控对象可以参数线性化;③若参数是已知的,则可以通过控制输入稳定地抵消非线性项,即系统不存在隐藏的不稳定模态或动态。例如,下面一类典型的 n 阶相伴形式非线性系统就可以设计自适应控制器达到全局稳定:

$$y^{(n)} + \sum_{i=1}^n p_i f_i(x, t) = bu \quad (1.1)$$

其中, $x = [y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}]^T$ 是状态向量, $f_i(x, t)$ 是关于状态与时间的已知非线性函数, 参数 p_i 与控制增益 b 是不确定的常数, 状态 x 可以量测且 b 的符号已知。

1.5 大系统的产生与研究现状

1.5.1 大系统的产生和控制方法

随着科学技术的发展,在工业生产和社会生活中面临的控制与管理系统的规模越来越大。为了解决用通常控制理论研究这些系统时所面临的“维数灾难”(curse of dimensionality)问题,从 20 世纪 60 年代中期起,人们开始了对“大规模系统”(简称大系统)的研究。“大系统”这个概念是带有主观性的概念。人们可以提出这样的问题:怎样大的系统才算是大系统呢?目前对“大系统”尚无一个公认的确切的定义,但当前有代表性的看法有下列两种:

大系统含义 1: 为简化计算和实现方便而将一个系统解耦,即分解为相互关联的子系统来进行研究的系统就称为大系统^[114]。

大系统含义 2: 如果一个系统的规模大得使通常的控制理论与技术不能成功地应用于这个系统,即不能以适当的时间和计算量来合理解决这个系统的建模、分析和控制等问题,就称之为大系统^[115]。这里说的规模大指的是系统的维数高,而非宏观上看一个装置的尺寸。显然,这个定义是从系统结构的复杂性来考虑的,故大系统也称为复杂大系统。

上述观点其实是从两个不同角度定义了大系统。一般说来,需要采用分散或递阶方式进行控制的系统就称为大系统^[114, 116](美国 Mahmoud, 1977; 中国高为炳, 1994)。从“大系统”这一名称可直观看出,大系统通常具有较高的维数。具体地说,大系统一般具有如下几个公认的基本特征:

- (1) 模型维数高,即系统的分析与设计以及仿真需要过多的计算时间和存储空间;
- (2) 包含若干相互关联的子系统,即系统常常自然形成一个递阶结构,或系统由处于不同地理位置的多个子系统构成;
- (3) 含有“分散”计算功能,即大系统常常是由一个以上的控制器或决策者进行控制;
- (4) 常可用不精确的“集结”模型表示,即基于系统的本质特性(如稳定性)保持不变,用一组“较粗略的”状态变量来描述系统模型;
- (5) 多目标性,即控制器可以像一个“队列”处于“战斗”状态那样成批进行操作,具有多个目标;
- (6) 可次优控制,即大系统可用次优控制或拟最优控制的方法达到令人满意的最优化,