

严格反馈系统 预设性能控制

耿宝亮 梁 勇 祁亚辉 韦建明 著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

严格反馈系统预设性能控制

耿宝亮 梁 勇 祁亚辉 韦建明 著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书的研究对象属于非线性控制领域,主要方向为严格反馈非线性系统的预设性能控制。全书包括绪论和1~7章。绪论和第1~5章主要介绍预设性能控制在严格反馈非线性系统中取得的理论成果,属于理论研究部分;第6章以飞行器过载控制模型为例,集中展示对前面提出方法的应用情况,属于工程应用部分;第7章是对严格反馈系统预设性能控制研究工作的总结及其发展方向的展望。

本书可作为高等院校控制科学与工程等与控制相关专业的教师、博士研究生、硕士研究生及科学工作者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

严格反馈系统预设性能控制 / 耿宝亮等著. — 北京 :
北京航空航天大学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-5124-2639-9

I. ①严… II. ①耿… III. ①反馈控制系统—研究
IV. ①TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 016619 号

版权所有,侵权必究。

严格反馈系统预设性能控制

耿宝亮 梁 勇 祁亚辉 韦建明 著

责任编辑 王 实

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京建宏印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:8 字数:170 千字

2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷 印数:1 000 册

ISBN 978-7-5124-2639-9 定价:39.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

耿宝亮：博士，长期从事先进控制理论的研究及应用，具体研究内容涵盖预设性能控制、自适应控制、神经网络等热点控制技术，致力于理论层面的创新研究，并发表多篇论文，其中5篇被EI收录，授权专利1项；独立承担了研究生层次的“自适应控制”、本科层次的“自动控制原理”“无人机概论”等课程的教学任务，指导学员参加全国大学生智能车竞赛并获山东赛区三等奖，获院校级教学成果一等奖1项、二等奖1项。

前 言

自动控制技术已广泛应用于制造业、农业、交通、航空航天和军事等众多领域,极大地提高了社会劳动生产率,改善了人们的劳动环境,丰富和提高了人民的生活水平。

在控制技术需求推动下,控制理论本身也取得了显著进步,线性系统控制理论经过半个多世纪的发展已经形成了一套完整的理论体系。但是,现实世界中严格意义下的线性对象是不存在的,摩擦、饱和、死区、滞环等非线性现象可谓是无处不在,只有在非常理想的假设之下才能将实际系统简化为线性系统进行处理。随着科学技术的发展和对世界认知的逐步深入,研究对象的复杂性日益凸显,线性控制理论处处显得捉襟见肘,控制性能降低、设计过程烦琐、过分依赖于系统已知信息等问题表明,线性控制理论的时代已经过去,充满未知、挑战和期待的非线性领域正等着我们去探索。

经过半个世纪的努力,非线性控制领域可谓硕果累累,近期的代表成果有反馈线性化、神经网络控制、变结构控制、自适应技术、backstepping技术、鲁棒控制等新颖的控制方法,从不同的角度出发,解决了当下困扰控制领域的一系列难点问题。随着计算机技术的发展和实现特定功能的非线性器件的研制成功,部分先进的非线性控制理论已经在实际工程中得到应用,例如利用反馈线性化实现机械臂的跟踪控制和自主飞行器的变结构控制等,均取得了优异的控制效果,非线性控制理论越来越受到人们的重视。

2008年,希腊学者 Bechlioulis 的研究团队提出了预设性能控制的概念,迅速引起广大科研工作者的重视,经过近十年的发展已经成为非线性控制领域的重要分支和研究热点。2010年我们首次接触到预设性能的概念,独特的思维方式迅速激起了我们的兴趣,时至今日,我们仍在从事相关的研究工作,对其倾注了大量的时间和精力。

本书是我们研究的部分成果,对象是一类极具代表性的非线性系统——严格反馈非线性系统。本书的主要内容包括:

(1) 基础理论部分,主要包括范数的定义及性质、动态系统的稳定性

理论、预设性能控制的概念及性质等,重点内容是预设性能的定义以及包含的两个基本环节:性能函数和误差变换;在误差变换部分,给出了一种新的误差变换方法,并设计了合理的误差变换函数,有效解决了初始误差未知的难题。

(2) 理论成果部分,按照由浅入深的研究思路,针对最简单的确定严格反馈系统模型,提出了一种新的控制框架,并证明了预设性能在严格反馈系统中的反向传递性定理;针对控制增益为未知常数的不确定严格反馈系统,将自适应技术与反演控制方法相结合,完成了自适应预设性能控制器的设计,并进行了稳定性证明;针对模型控制增益为未知函数的情况,提出了一种自适应神经网络预设性能控制器设计方法,系统中的未知函数利用径向基函数(RBF)神经网络进行逼近,为了避免可能出现的“不可控现象”,提出了一种新的积分型 Lyapunov 函数设计方法,利用径向基函数神经网络(RBFNN)对系统中的未知函数进行逼近;最后讨论了控制方向未知的情况,系统中除函数未知以外,还存在非匹配干扰项,利用 RBF 神经网络对模型中的未知函数进行逼近,利用 Nussbaum 增益法对控制方向未知的情况进行处理,为了避免烦琐的虚拟控制量微分计算,利用跟踪-微分器对其进行逼近,通过引入鲁棒项消除了非匹配干扰项的影响。

(3) 工程应用部分,将预设性能的概念引入导弹过载控制模型中,按照由简单到复杂的研究思路,首先对确定对象进行研究,然后进一步考虑扰动和参数不确定性,最后考虑输入和状态同时受限的情况。针对确定对象,首先对攻角子系统和俯仰角速度子系统进行误差变换,得到新的误差模型,针对变换后的误差模型进行反演控制器设计;针对具有扰动和参数不确定性的系统,利用自适应技术对未知参数进行逼近,通过引入鲁棒项消除扰动的影响;针对输入和状态同时受限的系统,通过构造辅助模型将受限系统转化为非受限系统;然后综合应用自适应技术和鲁棒设计技巧完成控制器的设计;最后完成稳定性证明和仿真验证。

作者按照由浅入深的研究思路,提供了一种适用于预设性能的控制框架,在该框架的基础上综合运用现代控制技术来解决研究中遇到的困难和壁垒,所有的理论都经过了反复的分析和推敲,旨在为感兴趣的读者提供真实可靠的指导和借鉴,相关的研究成果对于国内从事这方面的科

研及博士硕士学位论文工作都具有一定的参考价值。本书的读者对象为高等院校控制科学与工程等与控制相关专业的教师、博士研究生、硕士研究生及科学工作者。

对于本书中引用的他人的成果,我们在文中都进行了认真的标注,并在此对相关作者表示衷心的感谢!

非线性控制的海洋浩渺无边,希望我们的成果能凝成一滴水,融入这无边的海洋,虽微不足道,却也真实可爱。

本书中若存在错误和不妥之处,恳请广大读者不吝指教。

耿宝亮

2017年11月

目 录

绪 论	1
第 1 章 基础知识	10
1.1 范 数	10
1.1.1 向量的范数	10
1.1.2 矩阵的范数	12
1.2 预设性能	13
1.2.1 性能函数	13
1.2.2 误差变换	14
1.3 动态系统的稳定性理论	19
1.3.1 稳定性的定义	19
1.3.2 Lyapunov 稳定性定理	20
第 2 章 确定严格反馈非线性系统预设性能反演控制	22
2.1 系统描述	22
2.2 预设性能反演控制器设计	22
2.3 稳定性分析	25
2.4 预设性能的反向传递性	28
2.5 仿真分析	33
2.6 本章小结	34
第 3 章 控制增益为未知常数的不确定系统预设性能自适应反演控制	35
3.1 系统描述	35
3.2 预设性能自适应反演控制器设计	36
3.3 稳定性分析	39
3.4 仿真分析	41
3.5 本章小结	43
第 4 章 控制增益为未知函数的不确定系统预设性能自适应神经网络反演控制	44
4.1 径向基函数(RBF)神经网络	44
4.2 系统描述	45
4.3 预设性能直接自适应神经网络反演控制器设计及稳定性分析	46

4.3.1	反演控制器设计	46
4.3.2	稳定性分析	53
4.4	预设性能间接自适应神经网络反演控制器设计及稳定性分析	56
4.4.1	反演控制器设计	57
4.4.2	稳定性分析	65
4.5	仿真分析	68
4.6	本章小结	73
第 5 章	控制方向未知的不确定系统预设性能自适应反演控制	74
5.1	Nussbaum 增益法	74
5.2	系统描述	75
5.3	基于 Nussbaum 增益法的预设性能反演控制器设计及稳定性分析	76
5.3.1	反演控制器设计	76
5.3.2	稳定性分析	80
5.4	仿真分析	88
5.5	本章小结	90
第 6 章	满足预设性能的导弹过载控制技术研究	91
6.1	模型描述	91
6.2	不考虑扰动的预设性能过载控制器设计	93
6.3	具有扰动和参数未知的自适应预设性能过载控制器设计	97
6.4	输入和状态同时受限的预设性能过载控制器设计	103
6.5	本章小结	110
第 7 章	总结与展望	111
7.1	主要研究工作	111
7.2	下一步的研究工作	112
参考文献		113

绪 论

1. 背 景

线性系统控制理论经过半个多世纪的发展已经形成了一套完整的理论体系,并成功应用于工业控制、航天控制等众多领域,为科技的进步起到了巨大的推动作用。但是,现实世界中严格意义下的线性对象是不存在的,摩擦、饱和、死区和滞环等非线性现象可谓无处不在,只有在非常严格的假设之下才能将实际系统简化为线性系统进行处理,比较常用的做法是将非线性模型在某一平衡点处进行近似线性化,然后用线性控制理论进行分析和设计。随着科学技术的发展和对世界认知的逐步深入,研究对象的复杂性日益凸显,线性控制理论处处显得捉襟见肘,控制性能降低、设计过程烦琐、过分依赖于系统已知信息等问题表明,线性控制理论的时代已经过去,充满未知、挑战和期待的非线性领域正等着我们去探索。

经过几十年的努力,非线性控制领域可谓硕果累累,按照历史的发展顺序大致可分为古典理论、综合方法、微分几何控制理论和微分代数控制理论。早期的控制方法有相平面法、描述函数法、谐波分析法、波波夫判据和 Lyapunov 方法等,近期的控制方法有反馈线性化、神经网络控制、变结构控制、自适应技术、Backstepping 技术和鲁棒控制等,这些方法从不同的角度解决了当下困扰控制领域的一系列难点问题,并对系统的稳定性进行了分析。随着计算机技术的发展和实现特定功能的非线性器件的研制成功,部分先进的非线性控制理论已经应用到工程实践中,例如利用反馈线性化实现机械臂的跟踪控制、自主飞行器的变结构控制等,均取得了优异的控制效果,非线性控制理论越来越受到人们的重视。

纵观目前非线性系统控制领域的研究工作,不难发现,绝大多数理论成果都将研究的重心放在了满足系统的稳态性能上,而对系统的瞬态性能(包括超调量和收敛速度)则关注较少。然而,在很多实际系统的控制过程中都对稳态性能和瞬态性能提出了很高的要求,而不是仅仅保证系统稳定,例如机械臂的跟踪控制系统,如果在跟踪过程中超调量超出机械臂所能承受的范围,就可能直接造成硬件的损坏,那么所谓的稳定性也就无从谈起了;又如导弹的飞控系统,要求导弹能够以高精度命中目标,如果跟踪误差超调量过大或跟踪速度过慢,那么目标就很有可能逃出导弹的雷达扇面,即使导弹飞行过程再平稳也无法实现战斗任务。因此,对非线性系统的控制性能进行研究具有重要的理论价值和工程实际意义。现阶段有少数学者考虑了非线性系统的控制性能(包括瞬态性能和稳态性能)问题,但是研究对象过于局限,而且对系统的假设也过于苛刻,缺乏系统性和连贯性。总而言之,对非线性系统的控制性能问题的相关研究还处于起步阶段,许多难点问题亟待解决。

2. 非线性控制理论研究现状

顾名思义,非线性系统是指系统中含有一个或多个非线性环节的系统,它与线性系统的不同之处可概括为^[1]:①有限时间逃逸;②多平衡点;③初始条件影响系统的稳定性;④可能存在自激振荡现象;⑤分歧现象;⑥混沌现象。

由于非线性系统在结构、形式等方面是复杂而多变的,很难用一种通用的设计方法来对所有的非线性系统进行研究,这在设计方法上与线性系统有很大的不同,需要针对具体情况进行分析。因此,研究人员只能针对特定结构和形式的非线性系统展开研究,具有很强的针对性。

早期的经典非线性控制方法主要有相平面法、描述函数法、谐波分析法、波波夫判据和 Lyapunov 方法等,主要解决某些形式较简单的非线性系统的控制问题。

相平面法是一种比较直观的作图方法,通过分析不同初始条件下的运动轨迹,经过综合分析后提取出闭环系统的稳定性及其他相关的信息。

描述函数法将非线性系统近似为线性系统,然后应用比较成熟的线性控制理论进行分析和设计。因此,从本质上说它是一种非线性分析方法,而不是设计方法,并且它得到的结果是近似的,有时会忽略某些非线性系统固有的非线性特性。

谐波分析法是在描述函数法基础上进一步发展起来的一种非线性控制方法,它将非线性系统分离成线性部分和非线性部分,针对线性部分分析其频率特性,针对非线性部分则利用描述函数法进行处理。其优点是充分利用了系统的已知信息,与描述函数法相比较对系统特性的分析更加准确,但它仍旧没有摆脱小范围运动分析的局限。

Lyapunov 方法是一种真正意义上的非线性处理方法。早在 17 世纪, Torricelli 就提出了如下观点:如果一个系统在某一点处能量最小,那么该点将成为系统的一个稳定平衡点。这在当时来说,仅仅是一个“想当然”的结论,并没有进行严格的理论证明,也没有给出具体的定义。到了 1892 年, Lyapunov 借助数学工具给出了稳定性的严格定义。Lyapunov 方法具体包括两种方法^[2]:第一种方法采用的是近似线性化的思想,首先对系统的运动方程进行一次近似线性化,通过对线性化后的动态方程进行分析,进而得到原系统在平衡点附近的稳定性。第二种方法则不需要对原系统进行线性化处理,而是直接对原非线性系统的运动方程进行研究,首先构造一个满足径向无界性的 Lyapunov 能量函数,对其进行求导,通过分析一阶导数的定号性来判断该非线性系统的稳定性。这种方法的缺点是,由于非线性系统结构和形式的多样性,使得寻找合适的 Lyapunov 函数具有一定的难度,并没有普遍适应的方法,具有很强的技巧性,因此 Lyapunov 函数的选取本身就是一项非常有难度的工作,对于某些具体的情况,相应地产生了一些比较固定的 Lyapunov 函数选取方法,例如克拉索夫斯基方法、变量梯度方法、鲁尔法等。

非线性系统理论研究的一个重要突破发生在 20 世纪 80 年代初期,微分几何等数学方法的引入使得非线性系统的研究模式摆脱了局部线性化和小范围运动分析等

局限性,从而可以实现对非线性系统控制的大范围分析和综合^[3]。人们广泛采用微分几何理论和方法,提出了很多新的理论,形成了微分几何控制理论的新分支,为非线性系统几何理论奠定了基础。下面我们将对现在比较典型的一些非线性系统控制方法的研究现状进行简要分析。

(1) 反馈线性化

反馈线性化是现代非线性控制理论中发展较早且相对比较成熟的一种设计方法。顾名思义,其基本思想是通过适当的非线性状态反馈和非线性坐标变换,将非线性系统转化为线性系统,进而应用成熟的线性控制理论进行设计,它是非线性控制从分析走向综合的转折点。在反馈线性化理论的发展过程中,微分几何方法出现较早,具体又可分为状态反馈精确线性化和输入输出解耦线性化等方法;还有一种是普通的直接分析方法,例如近年来发展起来的逆系统方法。1978年,Brockett^[4]首先从非线性反馈不变原理的角度出发,针对一类仿射非线性系统进行研究,采用状态反馈及状态变换的方法进行精确线性化。随后 Su^[5]和 Krener^[6]对局部反馈线性化的充分必要条件进行了论述和证明。之后这一结论进一步被 Boothby^[7],Dayawansa^[8]等人推广至全局。接着 Isidori^[9]给出并证明了输入输出线性化的充分必要条件,Marino^[10]给出了最大可反馈线性化子系统的相关结论。再进一步,Isidori^[11]首次提出了零动态的概念,这使微分几何非线性系统控制理论成为独立分支并得以发展。

但是,反馈线性化方法存在的一个很大缺点是要求系统的模型精确已知,这也是限制其应用于一般的非线性系统的最大障碍。对于实际系统我们往往无法建立其精确模型,总是会存在诸多的不确定性,例如参数扰动、结构未知、外界干扰等,这些不确定性的存在会引起控制器的动态品质变化,甚至导致系统不稳定,同时它还可能抵消一些有利的非线性项,因此,反馈线性化这种方法渐渐淡出了人们的视线,但其贡献是巨大的和有目共睹的。

(2) 自适应控制

许多动态系统具有未知的常值参数或慢时变参数,例如,机器人操纵机构可能负载未知质量的物体,飞行器的质量及质心位置随时间变化等,自适应控制就是用来解决这类系统的控制问题的。自适应控制的基本思想是利用已知信息在线估计系统中的未知参数,换句话说,自适应控制器就是具有参数在线估计的控制器,不管被控对象是线性还是非线性的,自适应控制器在本质上都是非线性的。自适应控制的研究始于20世纪50年代初期,其工程背景为速度和姿态大范围变化的高性能飞行器自动驾驶仪的研制工作,由于参数变化范围大而导致PID控制器失效,自适应控制方法便在这种情况下应运而生。经过半个多世纪的发展,自适应控制已经发展成为众所周知的控制理论的一个重要分支,含有参数不确定性的线性动态系统的自适应控制已经比较成熟,文献[12-14]对时不变线性系统自适应控制的稳定性分析和鲁棒性问题进行了总结。

近年来,非线性系统的自适应控制引起了控制工作者的兴趣,而且取得了众多的

理论成果。Sastry^[15]解决了线性化系统的自适应控制问题,Teel^[16]针对输入输出线性化系统提出了一种直接自适应控制技术,Nam^[17]针对严格反馈系统提出了一种模型参考自适应控制方法,Taylor^[18]针对含有未建模动态的非线性系统完成了自适应重构控制器设计,Kanellkopoulos^[19]讨论了含有扩展匹配条件的自适应控制器的鲁棒性问题,Pomet^[20]从 Lyapunov 函数的角度讨论了自适应非线性估计问题,Ge^[21]完成了不确定多输入多输出非线性系统的自适应神经网络控制和具有未知增益的时变系统的鲁棒自适应控制,Krstic^[22]利用控制 Lyapunov 函数完成了自适应控制器的稳定性分析,Makoudi^[23]针对具有输入时延的非最小相位系统完成了鲁棒参考模型自适应控制,Mirkin^[24]进一步完成了含有状态时延的多输入多输出系统的输出反馈模型参考自适应控制,Yao^[25]针对具有半严格反馈形式的多输入多输出系统完成了鲁棒自适应控制器设计,Yu^[26]针对一类非线性模型完成了模糊自适应控制器设计,Ye^[27]完成了参数化非线性系统的全局自适应控制。

作为一种有效的控制技术,自适应控制已经成功应用于实际系统的控制中,Ge^[28]完成了含有参数不确定性和未知控制增益的机器人自适应控制,Do^[29]利用自适应技术完成了机器人的全状态跟踪并解决了其稳定问题,Hung^[30]完成了含有参数化不确定性的机器人自适应控制,Luo^[31]以空间飞行器的姿态跟踪为背景完成了最优自适应控制器设计,Tang^[32]完成了多输入多输出系统自适应输入补偿器设计,并应用于飞行器姿态控制中。

尽管自适应控制理论取得了丰硕的成果,但是仍旧具有一定的局限性,它不仅要求系统的机构已知,而且对具有未知干扰的情况显得力不从心,很多情况下的不确定性可能直接导致系统不稳定。

(3) 鲁棒控制

鲁棒控制在设计控制器时不仅考虑数学模型的标称参数,还考虑不确定性对系统性能的最坏影响,使得所设计的控制器在不确定性对系统性能影响最严重时也能够基本满足控制要求。随着非线性系统理论和鲁棒控制理论的发展,线性系统的鲁棒控制方法不断被推广到非线性系统,并取得了一系列研究成果。Isidori^[33]针对一类具有未知干扰的非线性系统完成了鲁棒控制器的设计,并得到了 2-范数意义下半全局稳定的结论;Hashimoto^[34]针对具有非匹配不确定性的非线性系统完成了鲁棒跟踪控制器的设计;Jiang^[35]针对具有不确定性的不完整系统完成了鲁棒指数修正;Chen^[36]针对一类具有动态输出反馈的非线性系统得到了局部稳定的结论;Wang^[37]分别针对不确定完整机械系统和不确定非完整机械系统完成了鲁棒控制器的设计;Qu^[38]针对具有外部未知动态的非线性系统完成了鲁棒控制器的设计,并得到了全局稳定和收敛的结论。

鲁棒控制的优点在于抑制干扰和补偿未建模动态。但是鲁棒控制没有学习能力,在设计时要求不确定性的上界已知,造成了鲁棒控制在原理上的保守性,系统的稳定性是以牺牲控制器的动态性能为代价的。

(4) 反演控制

20 世纪 90 年代初, Kanellakopoulos^[39] 提出了一种称为反演(Backstepping)的逐步递推控制方法。该方法在逐步递推的设计过程中引入虚拟控制量的概念, 基于 Lyapunov 稳定性理论给出了整个系统控制器的设计方法。对于严格反馈非线性系统来说, 如果系统中的非线性已知且没有外部扰动, 那么反演控制器可以得到全局稳定或渐近收敛的结论; 然而, 当反演控制器应用于不确定系统时, 其潜能才真正被挖掘出来, 例如它在处理非匹配不确定项时的独特优势, 自适应反演能够在参数未知的情况下得到很强的稳定性结论, 而鲁棒自适应反演则能够处理模型中存在不确定项和外部干扰的情况。

然而, 随着系统阶次的增加, 虚拟控制量导数的计算过程越来越复杂, 进而造成“维数灾难”, 为了解决这一问题, Madani^[40] 和 Stotsky^[41] 利用滑模滤波器来计算虚拟控制量导数; Yip^[42] 利用线性滤波器来生成微分信号; Sharma^[43] 和 Shin^[44] 将虚拟控制量的微分视为未知函数, 然后利用神经网络对其进行逼近; Farrell^[45] 提出了一种命令滤波器反演设计方法, 有效避免了烦琐的数学计算, 而且通过严格理论分析证明了该方法的有效性。

(5) 神经网络

神经网络的出现为含有未知函数的非线性系统的控制提供了一条新的途径, 在过去二十几年的时间里, 神经网络控制领域取得了丰硕的研究成果。神经网络由于其优异的逼近特性而被用于对未知函数进行逼近, Narendra^[46] 利用神经网络完成了一类动态系统的辨识和控制, Jin^[47] 和 Chen^[48] 利用多层神经网络完成了一类非线性系统的自适应控制器设计。上述方法均要求对神经网络进行离线训练, 为了克服这一缺点, 结合 Lyapunov 稳定理论, Polycarpou^[49], Sanner^[50], Yesidirek^[51], Spooner^[52], Ge^[53], Fabri^[54], Zhang^[55] 等对自适应神经网络控制进行了研究, 并得到了相应的稳定结论。

(6) 预设性能控制

预设性能控制是希腊学者 Bechlioulis 等^[56] 提出的一种新的控制器设计方式。所谓预设性能是指在保证跟踪误差收敛到一个预先设定的任意小的区域的同时, 保证收敛速度及超调量满足预先设定的条件。对于系统的控制性能问题, Miller^[57] 早在 1991 年就针对一类线性系统设计了具有非减动态增益的分段常值切换方法, 保证跟踪误差在规定时间内收敛到预定的值。Ryan^[58] 针对一类非线性系统讨论了控制性能问题, 控制目标为: ①跟踪误差收敛到一个半径为设定常值的区域内; ②系统动态曲线在一个预先设定的性能通道内运行, 这与预设性能控制的目标非常相似, 但缺点是对控制器参数的选择有非常苛刻的要求。文献[56]针对一类具有干扰的单输入单输出反馈线性化系统完成了预设性能自适应控制器设计。文献[59]进一步将对象推广到了多输入多输出反馈线性化系统, 变换后的误差最终一致有界且闭环系统内所有信号有界。文献[60]针对一类仿射多输入多输出非线性系统, 采用控制 Lya-

apunov 函数、自适应技术完成了预设性能状态反馈控制器设计,并成功解决了在函数估计过程中可能出现的系统不可控问题。文献[61]针对具有未知非线性函数的串级系统完成了部分状态反馈控制器设计,保证系统跟踪误差满足预设性能的同时,还具有设计方法简单且仅需系统部分信息的优点。文献[62]针对一类仅输出可测的非仿射非线性系统,完成了输出反馈控制器设计,保证系统的稳态和瞬态性能满足预设设定的要求,系统中的不确定项利用神经网络进行逼近,控制器设计采用了切换函数的形式,但其连续性是可以保证的。神经网络只有在特定的紧集内才能保证其逼近性能,但这个紧集的选择过程是复杂的,目前只有通过反复的试验才能确定,针对这一问题,文献[63]在预设性能控制的基础上构建了一种新的方法,避免了复杂的神经网络紧集选择过程。文献[64]解决了一类带有死区的非线性系统的预设性能控制问题,将死区表示为时变函数的形式,利用 Nussbaum 函数解决了控制增益未知的问题,并提出了一种新的高阶神经网络对未知非线性进行逼近。文献[65]对具有严格反馈形式的非线性系统的预设性能控制问题进行了讨论,在一定假设的基础上初步解决了该类系统的控制性能问题,但上述所有方法均有不严谨和不合理之处,具体可总结为:①缺乏严格的稳定性分析;②子系统的初始误差无法保证处于预先设定的区域;③设计过程中用到了未知参数的猜测值,而这个猜测值本身是难以得到的;④控制量不光滑。

预设性能也应用到了部分实际系统中,从很大程度上改善了系统的控制性能。文献[66]应用预设性能控制解决了具有参数不确定性的机械臂模型的力/位置跟踪控制问题,并与传统方法进行了对比,使系统的动态性能和稳态性能都得到了很大程度的提高。文献[67]进一步考虑机械臂模型中存在有界扰动的情况,利用鲁棒设计技巧保证了闭环系统的控制性能。文献[68]针对机械臂模型提出了一种不依赖于模型结构和参数的预设性能控制器设计方法,既不需要机械臂的动态模型信息,又不需要力变模型信息,取得了比较理想的控制效果。文献[69]将预设性能的概念与 PID 控制相结合,完成了机器人关节的速度和位置控制,在保证速度和位置误差趋向于零的同时,超调量和收敛速度也满足预先设定的要求。文献[70]将理论成果应用于机械臂的力和位置跟踪过程中,均达到了预期的控制目标。另外,利用预设性能控制解决机械臂的实际控制问题还取得了其他成果,这里不再一一展开。文献[71]针对飞行器的姿态控制模型设计了满足预设性能的自适应神经网络动态逆控制器设计,在现有成果的基础上进一步提高了系统的响应速度且减小了超调量,具有十分重要的工程实际意义。

3. 典型非线性系统控制方法研究现状

(1) 严格反馈非线性系统控制方法的研究现状

严格反馈系统一般具有以下形式:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= f_i(x_1, \dots, x_i) + g_i(x_1, \dots, x_i)x_{i+1}, \quad 1 \leq i \leq n-1 \\ \dot{x}_n &= f_n(\mathbf{x}) + g_n(\mathbf{x})u \end{aligned}$$

式中, $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbf{R}^n$, $u \in \mathbf{R}$, 分别为状态和输入变量; $f_i(\cdot)$, $g_i(\cdot)$ 为光滑函数。Backstepping 设计方法的提出是非线性系统控制理论发展的一个里程碑, 它不要求系统的不确定性满足匹配条件或增广匹配条件, 也不要求非线性特性满足增长性约束条件, 仅要求系统的非线性特性能保证非线性系统可转化为参数纯反馈的形式。

对于确定的严格反馈非线性系统, 利用传统的反演控制器便可得到全局渐近稳定的结论, 近年来科研工作者将研究的重心转向了含有不确定性的严格反馈非线性系统, 并取得了一系列研究成果。Yao^[25] 将自适应技术与反演控制方法相结合, 解决了具有参数不确定性的严格反馈非线性系统的控制问题; Wang^[72], Zhang^[73], Polycarpou^[74] 利用神经网络对系统中的未知非线性函数进行估计, 解决了含有未知函数的严格反馈非线性系统的控制问题; Ge^[75], Gong^[76], Pan^[77] 进一步考虑了系统中含有干扰的情况; Ge^[78] 将反演控制推广到了离散严格反馈非线性系统的控制中; Yang^[79], Wang^[80], Tong^[81], Huo^[82] 利用模糊逼近器对系统中的未知非线性进行估计, 在设计过程上比神经网络估计器更简洁; Chen^[83], Wang^[84], Yoo^[85] 对系统中含有时滞的情况进行了讨论。以上设计方法均是在反演的大框架下进行的, 且只能满足半全局稳定。Park^[86] 针对一类不确定严格反馈非线性系统, 提出了一种能够保证全局稳定的自适应模糊控制器设计方法, 采用与反演不同的设计思路, 省去了烦琐的虚拟控制量及其导数的计算过程, 设计过程更加简单, 但该方法过分依赖于模糊控制器的逼近性能, 因此难以在实际系统中得到应用。

(2) 控制增益未知非线性系统控制方法的研究现状

控制增益未知包括控制增益为未知常数、控制增益为未知函数以及控制方向未知三种情况。对于前两种情况, 相关文献提出了对应的控制策略, 主要利用自适应技术和逼近网络对未知控制增益进行逼近。而对于控制方向未知的情况, 处理的难度更大, 上面提到的方法则不再适用, 不仅仅是控制效果不佳, 甚至可能会导致系统不稳定。控制方向未知系统的控制问题一直是控制领域的难题。

1983 年, Nussbaum^[87] 首次研究了控制方向未知线性系统的稳定问题。他设计了一种 Nussbaum 型增益并将其与自适应控制技术相结合完成了控制器的设计, 并证明了闭环系统的稳定性。Mudgett^[88] 和 Martensson^[89] 将 Nussbaum 增益法做了进一步的推广, 解决了控制方向未知的一般线性系统的控制问题。Lozano^[90] 则对控制方向未知的线性系统提出了一种模型参考自适应控制方法, 并将其推广到控制方向未知的一阶非线性系统。Kaloust^[91] 对一类控制方向未知的二阶非线性系统的控制问题进行了研究, 综合应用 Lyapunov 稳定性理论和鲁棒设计技巧, 通过对未知控制方向进行在线辨识, 从另一种角度出发, 解决了控制方向未知系统的控制问题。Ye^[92] 将 Nussbaum 增益法与 Backstepping 技术相结合, 解决了控制方向未知的严格反馈非线性系统的控制问题。Ge^[93] 结合鲁棒设计方法进一步将其推广到具有未知时变参数和未知干扰的情况。Jiang^[94] 则在零动态输入到状态稳定的假设下, 研究了具有未知控制方向的非线性系统的输出反馈控制问题。

(3) 输入受限系统控制方法的研究现状

输入受限现象普遍存在于实际的物理系统中,它会影响系统的性能,降低准确性甚至导致系统不稳定,给控制器设计带来了巨大的挑战。针对具有参数不确定性且输入受限的系统,已经有几种方法对其控制问题进行了讨论,例如抗饱和方法、小增益控制和线性反馈矫正等。Monopili^[95]针对输入受限的参数不确定线性系统提出了一种基于自适应技术的基本控制框架,但缺乏稳定性证明。在接下来的一段时间内这方面的研究也取得了不少成果。文献[96]针对连续系统进行了研究,文献[97]对输入受限的离散对象的控制问题进行了讨论,文献[98]对间接控制方法进行了讨论,但上述方法均要求开环系统本身是稳定的,只有Feng对上述限制进行了一定程度的放宽,允许有多个极点在原点处,Karason将这一条件进一步放宽,对开环系统的性能不做任何限制,仅对控制参数的上界做了一定的假设,最终得到了局部稳定的结论。

对于输入受限的非线性系统的控制问题的研究也取得了丰硕成果,Chen, Hu, Gao, Zhong对带有输入饱和的非线性控制系统进行了分析和设计;Polycarpou以飞行器姿态控制系统为研究对象,考虑参数不确定性、集合自适应和反演控制技术,完成了控制器设计,并得到了局部稳定的结论;Farrel进一步将这一结论推广到了幅值、速度和带宽同时受限的情况;Gao, Chen考虑了受限系统中存在非线性不确定性的情况;Gayaka解决了带有输入受限和扰动的链式系统的控制问题,并得到了全局稳定的结论;Lavretsky提出了一种 μ 修正方法,为解决输入受限问题提供了一条新的途径。

综上所述,非线性控制理论在科研工作者的不懈努力下已经结出了累累硕果,尤其是在系统稳态性能方面几乎涵盖了所有形式的非线性系统,但在控制性能(包括稳态和瞬态性能)方面的研究还比较匮乏,仅限于几类形式较特殊的系统,还远远没有形成体系。针对严格反馈非线性系统的预设性能控制问题,据作者所知,目前仅有3篇文献对其进行了讨论,仍有很多问题没有解决。本书以几类具有不确定性的严格反馈非线性系统为研究对象,提出了一系列的新方法、新思路,解决了现有方法中存在的难题,并系统地解决了严格反馈非线性系统的预设性能控制问题。

4. 本书的内容安排

本书对不确定严格反馈非线性系统的预设性能控制问题进行了研究,主要内容结构安排如下:

绪论部分论述了本书的研究背景及意义,并对国内外非线性理论的发展历程及热点方法进行了综合分析,主要包括反馈线性化、自适应控制、鲁棒控制、神经网络、反演和预设性能控制等,并找出了其优势和不足;对现阶段的典型研究对象进行了深入剖析,包括严格反馈非线性系统、控制方法未知的非线性系统和输入受限系统,并对其中的难点问题进行了总结。

第1章扼要介绍阅读本书所需的一些数学方面和控制理论方面的基础知识,主