

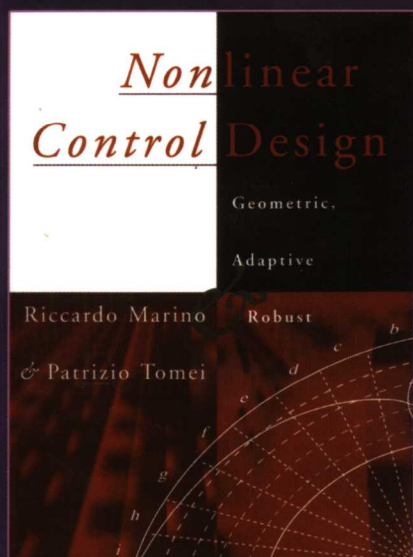
国外计算机科学教材系列

非线性系统设计

—— 微分几何、自适应及鲁棒控制

Nonlinear Control Design

Geometric, Adaptive and Robust



[意] Riccardo Marino 著
Patrizio Tomei

姚郁 贺风华 译
申铁龙 审校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

国外计算机科学教材系列

非线性系统设计

—— 微分几何、自适应及鲁棒控制

Nonlinear Control Design

Geometric, Adaptive and Robust

[意] Riccardo Marino 著
Patrizio Tomei

姚郁 贺风华 译
申铁龙 审校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是非线性控制的3本经典教材之一,从应用角度介绍了非线性反馈控制的微分几何、自适应以及鲁棒设计方法。该书系统地阐述了连续时间有限维不确定系统的非线性反馈控制设计,内容上是自我完备的。本书给出的控制算法可应用于许多重要的实际控制问题,如电机、航天器、机器人以及电力系统控制等。

本书习题丰富,并有12个经典的实例,通过这些应用实例来体现设计方法,适合从事非线性控制研究的工程师和控制工程及相近专业的研究生阅读。

© Pearson Education Limited 1996.

This Translation of *Nonlinear Control Design: Geometric, Adaptive and Robust*, First Edition, ISBN: 0133426351 is published by arrangement with Pearson Education Limited.

All Rights Reserved.

Simplified Chinese edition published by Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2006.

Licensed for sale in mainland territory of the People's Republic of China only, excluding Hong Kong.

本书中文简体字翻译版由 Pearson Education Limited 授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何形式或手段复制或抄袭本书内容。

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)发行与销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2006-0279

图书在版编目(CIP)数据

非线性系统设计——微分几何、自适应及鲁棒控制/(意)马里诺(Marino, R.)等著;姚郁,贺风华译.

北京:电子工业出版社,2006.8

(国外计算机科学教材系列)

书名原文:Nonlinear Control Design: Geometric, Adaptive and Robust

ISBN 7-121-02952-9

I. 非… II. ①马… ②姚… ③贺… III. 非线性系统(自动化)-教材 IV. TP271

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第085407号

责任编辑:马 岚

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:22.25 字数:570千字

印 次:2006年8月第1次印刷

定 价:59.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。

联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。



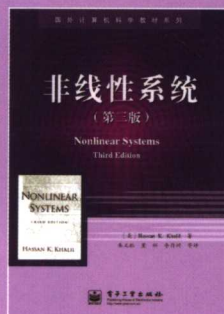
姚郁 1990年获哈尔滨工业大学博士学位，现为哈尔滨工业大学教授、博士生导师。研究方向为非线性控制、飞行器制导与控制、飞行器半实物仿真技术等，讲授“非线性控制”和“鲁棒控制”等研究生课程，承担科研课题多项，曾获国家科技进步二等奖一项，省部级奖10项。



贺风华 2004年获哈尔滨工业大学导航制导与控制学科博士学位，后留校任教，研究方向非线性控制、混合控制等。



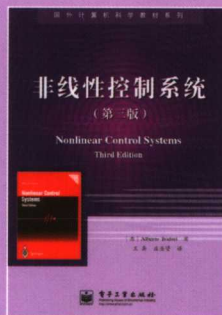
申铁龙 东北重型机械学院（现燕山大学）自动控制系七七届毕业生，于1992年3月获日本上智大学工学博士学位，后一直任教于上智大学，现为该大学理工学部准教授，并兼任哈尔滨工业大学、燕山大学境外博导及武汉大学特聘教授等，共出版《 H_∞ 控制理论及应用》（清华大学出版社，1995）等八部中外文专著。



书号: 7-121-01142-5
定价: 69.00 元

非线性系统的研究近年来受到越来越广泛的关注,国外许多工科院校已将“非线性系统”作为相关专业研究生的学位课程。本书是美国密歇根州立大学电气与计算机工程专业的研究生教材,全书内容按照数学知识的由浅入深分成了四个部分。基本分析部分介绍了非线性系统的基本概念和

基本分析方法;反馈系统分析部分介绍了输入-输出稳定性、无源性和反馈系统的频域分析;现代分析部分介绍了现代稳定性分析的基本概念、扰动系统的稳定性、扰动理论和平均化以及奇异扰动理论;非线性反馈控制部分介绍了反馈线性化,并给出了几种非线性设计工具,如滑模控制、Lyapunov 再设计、Backstepping 设计法、基于无源性的控制和高增益观测器等。此外本书附录还汇集了一些书中用到的数学知识,包括基本数学知识的复习、压缩映射和一些较为复杂的定理证明。



书号: 7-121-01198-0
定价: 65.00 元

这是一本在国际上颇具影响力的自动控制领域专著,主要阐述应用微分几何理论设计非线性控制系统的方法。本书是作者结合 20 多年来的主要成果及教学经验历时十多年完成的。前三章介绍了非线性系统的基本理论及其相关的近世代数和几何基础理论;第 4 章和第 5 章分别叙述了单输入单输出及多

输入多输出非线性系统的精确线性化方法;第 6 章和第 7 章进一步深入讨论了多输入多输出非线性系统的输入输出解耦问题;第 8 章陈述了输出跟踪和输出调节问题;第 9 章针对较弱的条件探讨了半全局线性化问题。附录 A 概述了所涉及到的拓扑学及微分拓扑学的相关理论;附录 B 概述了中心流形理论及奇异扰动理论。前三章和附录介绍了本书的基础知识,其他各章则阐述了各种设计方法。

出版说明

21世纪初的5至10年是我国国民经济和社会发展的关键时期,也是信息产业快速发展的关键时期。在我国加入WTO后的今天,培养一支适应国际化竞争的一流IT人才队伍是我国高等教育的重要任务之一。信息科学和技术方面人才的优劣与多寡,是我国面对国际竞争时成败的关键因素。

当前,正值我国高等教育特别是信息科学领域的教育调整、变革的重大时期,为使我国教育体制与国际化接轨,有条件的高等院校正在为某些信息学科和技术课程使用国外优秀教材和优秀原版教材,以使我国在计算机教学上尽快赶上国际先进水平。

电子工业出版社秉承多年来引进国外优秀图书的经验,翻译出版了“国外计算机科学教材系列”丛书,这套教材覆盖学科范围广、领域宽、层次多,既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。这些教材涉及的学科方向包括网络与通信、操作系统、计算机组织与结构、算法与数据结构、数据库与信息处理、编程语言、图形图像与多媒体、软件工程等。同时,我们也适当引进了一些优秀英文原版教材,本着翻译版本和英文原版并重的原则,对重点图书既提供英文原版又提供相应的翻译版本。

在图书选题上,我们大都选择国外著名出版公司出版的高校教材,如Pearson Education培生教育出版集团、麦格劳-希尔教育出版集团、麻省理工学院出版社、剑桥大学出版社等。撰写教材的许多作者都是蜚声世界的教授、学者,如道格拉斯·科默(Douglas E. Comer)、威廉·斯托林斯(William Stallings)、哈维·戴特尔(Harvey M. Deitel)、尤利斯·布莱克(Uyless Black)等。

为确保教材的选题质量和翻译质量,我们约请了清华大学、北京大学、北京航空航天大学、复旦大学、上海交通大学、南京大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、西安交通大学、国防科学技术大学、解放军理工大学等著名高校的教授和骨干教师参与了本系列教材的选题、翻译和审校工作。他们中既有讲授同类教材的骨干教师、博士,也有积累了几十年教学经验的老教授和博士生导师。

在该系列教材的选题、翻译和编辑加工过程中,为提高教材质量,我们做了大量细致的工作,包括对所选教材进行全面论证;选择编辑时力求达到专业对口;对排版、印制质量进行严格把关。对于英文教材中出现的错误,我们通过与作者联络和网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订。

此外,我们还将与国外著名出版公司合作,提供一些教材的教学支持资料,希望能为授课老师提供帮助。今后,我们将继续加强与各高校教师的密切联系,为广大师生引进更多的国外优秀教材和参考书,为我国计算机科学教学体系与国际教学体系的接轨做出努力。

电子工业出版社

译者序

控制理论作为一门独立的学科应该说仍然是一个比较年轻的研究领域。粗略地讲，控制理论的根本就是对于那些用微分方程来描述其动态的系统，分析其解的动态品质，并通过采用施加外部激励或改变系统内部结构的办法，使得其解按照期望的轨迹运动，从而实现了对微分方程背后的实际工程系统的控制目的。从这个意义上来讲，控制理论的基石正是由上世纪50年代和60年代迅速发展和完善起来的线性控制理论奠定的。线性系统理论对于分析系统的稳定性、可控可观性以及优化控制等问题给出了近乎完美的理论框架。但是，它要求描述系统的微分方程局限在线性且结构及参数精确的条件下。因此，求索突破这种局限的途径就成为之后控制理论发展历程中的主题。而在此后近30多年的求索过程中，“自适应控制”和“鲁棒控制”就成为两个主要的关键词。前者主要是通过选择具有适应能力的补偿器来实现参数不精确已知的系统的控制目的；后者则是通过构造具有包容能力的补偿器来实现对结构或参数未知的系统的控制目的。然而，大多数此类系统的分析或设计问题已经很难在线性系统理论的框架上得到圆满解决。因此，研究由非线性微分方程描述的更为广泛的动态系统就成为控制理论发展过程中不得不经历的挑战。事实上，对于控制理论来讲，上世纪最后10年就成了“非线性系统”的年代。

其实，相对于控制理论来说，非线性微分方程理论在数学领域中并不是“年轻的”学问。比如，非线性微分方程解的稳定性条件问世已经是100多年前的事情了。但是，在“非线性系统”的年代之前，若要利用这一条件分析或设计非线性系统，大多数情况下只能是凭借“运气”，即通过试探、拼凑的办法来找到满足这一条件的李亚普诺夫函数。直至上世纪80年代后期，以意大利学者罗马大学的Isidori教授等为代表的非线性控制理论先驱者们，将微分几何引入控制理论，给非线性系统理论带来了飞跃性发展。我们可以说，现代非线性系统理论的主要贡献在于它给出了解析非线性系统内部结构的基本工具，利用这个工具可以在一般意义下刻画非线性系统的可控性、可观性以及可镇定性等一系列问题。譬如，对于前述的稳定性问题，我们可以不再怀着侥幸的心理去试探性地摸索求解，而是按照系统的内部结构“顺理成章”地构造解。当然，以微分几何为基础的非线性系统理论也同样具有局限性，它要求系统的微分方程能够用连续光滑函数来描述的，而很多系统的微分方程不得不用非光滑甚至是非连续的函数来描述。这是控制理论所面临的新挑战。为了迎接这个挑战，了解非线性控制理论近十几年的发展成果无疑是控制理论研究者的必经之路。

介绍上述的非线性控制系统理论成果的书至今已有数部出版。最经典的莫过于Isidori本人的专著*Nonlinear Control Systems*。稍后，美国学者Khalil教授编写了更为通俗易懂的*Nonlinear Systems*。电子工业出版社已分别出版了这两本书的中译本，书名为《非线性控制系统》和《非线性系统（第三版）》。但是，正如本书的副标题所示，本书是第一部以微分几何、自适应和鲁棒为关键词的非线性控制理论专著。第一作者Marino教授于1982年在美国圣路易斯的华盛顿大学获得博士学位，而当时Isidori教授也正在罗马大学、华盛顿大学向年轻的学者们宣讲他的

以微分几何为基础的非线性理论。此后, Marino 回到罗马大学 Tor Vergada 校(又称罗马第二大学)并一直在非线性控制理论的研究前沿,发表了许多引人注目的研究成果,成为人们在谈及非线性系统鲁棒控制和自适应控制时必然涉及的关键人物。1995 年出版的这本专著正是他和他常年的合作者 Tomei 在非线性系统研究处于高峰期的总结。这本书结构严谨,并在内容编排上做到了自我完备(self-contained)。这对于想通过本书进入该领域的初学者是非常难得的。另外,这本书的另一个特点就是理论与实际结合的重视。目前,由于控制理论的过于数学化倾向,经常可以听到控制理论究竟是科学(Science)还是工程技术(Engineering)的议论。在这本专著中,我们可以在非常数学化的科学叙述的字里行间,发现很多不同的工程背景非常自然地蕴含在其中。全书共给出 75 个例题,介绍了电机、机器人、电力系统、宇航等 12 个不同背景的工程实例。

我和 Marino 结识于一次国际会议,正是在这本专著出版的那一年。后来,作为日本学术振兴学会 JSPS FELLOW,我邀请他到我所在的日本东京上智大学做了为期两个月的合作研究,之后我也访问过他所在的大学。他严谨的治学态度和时间观念、斯文的谈吐举止,甚至他在他那间宽大古老的书房里熟练地弹奏钢琴时的身影,都使我觉得他是一位不太像意大利人的意大利绅士。不过,我也见识过他意大利式的潇洒,车禁之前的凌晨,他驾驶着那辆心爱的菲亚特在古罗马铺满石头的胡同里穿梭时的样子,依然是当年罗马仔的神态。谈及中国,他似乎总是觉得丝绸之路的起点应该和他热爱的古罗马是一个样子。当他得知我们要将他的这本书译成中文出版时,他非常高兴,尽管后来未能实现,但他曾为了从出版商那里买回本书的版权以便无偿转让给中国的出版社忙碌过。去年年底在西班牙的 Sevilla,我们再次相见,我请他为即将发行的中文版写一个序。他问写什么,我提议说,10 年过去了,你可以从今天的角度评论一下你自己的书。他思索了片刻,摇了摇头说,“这太难了”。我理解他的意思,这是一个方兴未艾的领域,但是作为作者,他希望读者能够站在和他们当年同样的起跑线上去读这本书。

这本书的中译版能够得以出版,首先应该感谢译者哈尔滨工业大学航天学院的姚郁教授。他通过多年的控制理论与应用的研究实践,深深体会到了基础理论研究的重要。去年春天和他谈及这本专著时,他当即表明要将其翻译出版,以便更多的青年学者从这部经典著作里汲取养分。时隔一年,他和他的助手贺风华博士在课题组马克茂老师以及学生王宇航、付绍文、刘红玉的协助下顺利地拿出了译稿,并由我对全书进行了审校。欢迎读者来邮件探讨书中内容并批评指正,联系方式: hefenghua@hit.edu.cn。

申铁龙
2006 年初夏于东京

前 言

本书主要介绍非线性反馈控制的微分几何、自适应以及鲁棒设计方法,目的是作为研究生或高年级本科生课程的教材,或供工程技术人员和应用数学家参考。本书介绍了很多应用实例,从电机到航天器或飞行器控制,从机器人控制到电力系统控制,均给出了详细的说明,这些一定会给工程师以启发,并且也会令数学家感兴趣。在此我们假定读者对于简单的控制系统具有设计能力或至少能够理解,并且具有微分方程、稳定性理论、线性代数和多变量函数等方面的基本知识。本书采用微分几何的符号和概念,以一种与坐标系无关的方式来描述所得到的结果,这对于研究非线性系统非常重要。书中用到的微分几何和稳定性理论的基本符号、术语和结果归纳在两个附录中。

本书介绍了连续时间有限维不确定系统的非线性反馈控制,内容上是自我完备的(self contained)。本书的重点不在于分析,而是集中在状态反馈和输出反馈设计上。一般系统都会受到不确定性的影响,如未知定常参数干扰和时变干扰。当不存在未知参数和干扰时,微分几何方法用来刻画所讨论的一类非线性系统,并用来建立非线性设计方法。这些方法提供了对于不确定性系统设计鲁棒和自适应算法的构架。当反馈控制能够保证含有未知定常参数但无干扰系统的渐近输出跟踪时,则称这种反馈控制为自适应的。存在未知时变干扰的情况下,当控制仍能够保证镇定系统和干扰任意衰减时,则称这种控制为鲁棒的。

就现阶段非线性控制的研究而言,这本专著汇集了全局设计方法,在内容上是连贯的,内容包括基本的微分几何算法,包括反馈线性化、观测器以及全局输出反馈指数跟踪控制;针对几类非线性系统,通过对由线性系统得出的一些基本状态和输出反馈自适应算法(包括自适应观测器)进行再设计,给出了一套自适应控制理论;还包括通过状态反馈实现干扰衰减的鲁棒控制,而针对最坏情形的鲁棒镇定算法,则是对以前的线性系统研究结果进行推广而得到的。所有结论均严格地源于微分几何条件,这些条件保证了能够全局变换为特定的标准型。书中给出的大部分控制算法都是20世纪80年代以后建立的。在20世纪80年代初,线性系统自适应控制算法的稳定性得到了证明,并且有关鲁棒控制的研究也开始出现。同一时期,应用微分几何工具,极点配置和系统观测器设计方法也被推广到了非线性系统中,而微分几何则是在20世纪70年代研究能控性和能观性时被引入到非线性系统中。非线性系统的自适应控制是1986年问世的。进入20世纪90年代以后,给出了几类非线性系统的输出反馈算法(自适应算法、鲁棒算法和几何算法)。低价而高效的数字信号处理器的普及,以及机器人、电机驱动、飞行器和航天器等涉及非线性动态特性的系统对高性能的需求,推动了非线性控制的研究。1985年以来,出版了几本关于已知参数非线性控制系统分析和设计以及具有未知参数线性系统的自适应控制的书籍。本书给出了近年来非线性不确定系统反馈控制设计的成果,书中所包含的大量资料从未以书籍形式出版过。虽然大多数重要应用都涉及到多变量模型,但本书仅讨论单输入单输出(SISO)系统。只要完全掌握了SISO系统的结果,就可以将这些结果推广应用到MIMO系统中。但是,SISO系统的结论并不能直接地完全推广到MIMO情形,在某些情况下甚至是不

能推广的, 输出反馈 SISO 的一些问题尚未得到解决。本书的目的之一就是提供一个可以阐明新研究问题的框架。

本书分为两部分: 第一部分(状态反馈设计)包括第2章至第4章, 第二部分(观测器和输出反馈设计)包括第5章(观测器)至第7章。第1章是引言, 通过一些简单实例对现有设计方法给出了简略的综述。在这一章的结尾, 描述了本书将要讨论的12个实际控制问题。第2章研究单输入系统的状态反馈几何控制方法, 包括反馈线性化和部分反馈线性化。第3章建立了鲁棒和自适应状态反馈线性化算法。第4章引入了单输出受控变量, 并描述了输出跟踪问题。这一章的前半部分主要针对不含有不确定性的SISO系统进行状态反馈设计, 讨论了零动态、跟踪动态、最小相位系统和输入-输出反馈线性化问题; 后半部分主要研究自适应输入-输出线性化、干扰解耦和干扰衰减问题。第5章研究自适应和非自适应非线性观测器的设计问题。第6章研究输出反馈线性化、镇定和指数跟踪问题。第7章研究鲁棒和自适应输出反馈设计问题。本书通过很多例子(70多个)和实际应用(20多个)阐明了所得到的理论, 并给出了许多习题(120多个)。两个附录收录了本书所用到的微分几何和稳定性理论的基础知识。参考文献包括了所参考的全部资料以及对于相关主题需要进一步阅读的文献资料, 但这些并不完全。本书所涵盖的内容提供了足以供选择的主题, 可满足不同课程内容的需要。第2章、第6章、第4章的前半部分和第5章介绍了不含不确定性系统的非线性几何控制设计方法(包括状态反馈、观测器和输出反馈)。在Illinois大学Urbana-Champaign分校和罗马大学Tor Vergata校(又称罗马第二大学), 第一作者曾将这部分内容作为30学时的研究生课程讲授过。从第3章至第5章以及第7章中, 可以分出一个自适应和鲁棒控制导论的课程。这部分内容包括模型参考自适应控制设计、自适应和鲁棒反馈线性化控制、自适应观测器以及针对已知相对阶的最小相位系统的自适应和鲁棒输出反馈算法。

本书总结了集体研究的成果, 这些成果是我们有幸和同仁们在专业会议、研讨会以及合作研究项目中通过交流思想和方法得到的。本书中提到的很多结果源于我们的几篇论文的合著者, 他们是: W. Boothby, D. Elliott, J. Levine, I. Kanellakopoulos, P. Kokotovic, S. Nicosia, S. Peresada, W. Respondek, A. vander Schaft, D. Taylor以及他们的合著者。我们向他们致谢, 特别要感谢Petar Kokotovic倾注的热情和在合作研究工作中给予的知识, 感谢Salvatore Nicosia引导我们进入控制理论领域, 他于1981年在罗马大学Tor Vergata校建立了控制研究组, 感谢Alberto Isidori在我们攻读研究生期间, 为我们开启了非线性控制领域之门, 多年来, 他一直是卓越的典范。

Riccardo Marino 和 Patrizio Tomei
于意大利罗马

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 非线性反馈控制	1
1.2 从传统方法到现代非线性控制	2
1.3 状态反馈线性化	5
1.4 逆系统与零动态	7
1.5 不确定性系统的状态反馈	8
1.6 非线性观测器	10
1.7 输出反馈	13
1.8 不确定性系统的输出反馈	14
1.9 本书章节安排	17
1.10 实际控制问题	18
1.11 习题	24

第一部分 状态反馈设计

第 2 章 反馈线性化	28
2.1 线性系统的极点配置	28
2.2 反馈线性化	33
2.3 坐标变换线性化	44
2.4 部分反馈线性化	49
2.5 三角型系统的镇定	57
2.6 全局反馈线性化	62
2.7 多输入系统的推广	64
2.8 实例	68
2.9 结论	73
2.10 习题	74
第 3 章 自适应反馈线性化	80
3.1 匹配和三角型条件	80
3.2 鲁棒镇定	85
3.3 自校正调节器	90
3.4 自适应反馈线性化	97
3.5 多输入系统的推广	107
3.6 实例	108
3.7 结论	115
3.8 习题	116
第 4 章 输出跟踪	122
4.1 逆系统与跟踪动态	122
4.2 输入-输出反馈线性化	132

4.3	干扰解耦	138
4.4	干扰抑制	142
4.5	具有暂态性能指标的自适应跟踪	149
4.6	多变量系统的推广	155
4.7	实例	158
4.8	结论	165
4.9	习题	165

第二部分 观测器和输出反馈设计

第5章	自适应观测器	172
5.1	线性系统的观测器	172
5.2	具有线性误差动态的观测器	177
5.3	自适应观测器	187
5.4	多变量系统的推广	195
5.5	实例	200
5.6	结论	205
5.7	习题	205
第6章	镇定与指数跟踪	209
6.1	静态输出反馈线性化	209
6.2	动态输出反馈线性化	213
6.3	输出反馈镇定	218
6.4	输出反馈指数跟踪	230
6.5	实例	234
6.6	结论	238
6.7	习题	238
第7章	鲁棒调节与自适应跟踪	241
7.1	结构几何条件	241
7.2	鲁棒镇定	244
7.3	自校正定点调节器	255
7.4	自适应跟踪	264
7.5	实例	282
7.6	结论	290
7.7	习题	290
附录A	微分几何基础	294
附录B	稳定性理论基础	306
文献说明		321
参考文献		325
索引		339

第 1 章 绪 论

1.1 非线性反馈控制

本书研究具有未知定常参数或时变干扰的非线性系统的反馈控制设计问题。所考虑的非线性控制系统(**nonlinear control system**)由如下有限维确定性常微分方程描述:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, \theta(t), u(t)), & x(0) &= x_0 \\ y &= h(x, \theta(t))\end{aligned}$$

其中 $x \in \mathbb{R}^n$ 为状态(**state**), x_0 为初始条件, $u(t) : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^m$ 为控制(**control**)输入, $\theta(t) : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^p$ 为干扰(**disturbance**)输入, $y \in \mathbb{R}^s$ 为输出(**output**)向量。当 $m = s = 1$ 时, 称该系统为单输入单输出(**single input single output**)系统; 当 $m > 1$ (多输入)或 $s > 1$ (多输出)时, 称该系统为多变量(**multivariable**)系统。控制由设计者给出, 而干扰可能完全未知或由已知模型, 即外部系统(**exosystem**)

$$\dot{\theta} = \nu(\theta, t), \quad \theta(0) = \theta_0$$

产生, 其中 θ_0 为未知初始条件。当对于任意的 θ 以及 $t \geq 0$ 有 $\nu(\theta, t) = 0$ 时, 上述模型给出的干扰变为未知参数(**unknown parameter**), 即为与时间无关的常数, 其值等于一个未知的初始条件($\dot{\theta} = 0, \theta(0) = \theta_0$)。输出变量 y 是被控制量; 若要求输出变量跟踪一个参考信号(**reference signal**) $y_r(t)$, 则称之为跟踪问题(**tracking problem**)。而当参考信号 y_r 是常数时, 我们称之为定点调节(**set point regulation**)问题。

本书的目的是设计反馈控制算法, 利用被测量变量的反馈来解决跟踪问题。这里考虑了两种情形: 设状态 x 是可量测的, 设计状态反馈控制(**state feedback control**)(见第一部分的第 2 章、第 3 章和第 4 章); 或者假设仅输出 y 是可量测的, 设计输出反馈控制(**output feedback control**)(见第二部分的第 6 章和第 7 章)。该控制可能是基于状态观测器(**observer**)实现的(见第二部分的第 5 章), 也可能不是。 r 阶动态输出反馈(**dynamic output feedback**)控制算法是由如下常微分方程描述的一个非线性系统:

$$\begin{aligned}\dot{w} &= \mu(w, y, y_r, t), & w(0) &= w_0, & w &\in \mathbb{R}^r \\ u &= u(w, y, y_r, t)\end{aligned}$$

当 y 由 x 取代时, 即

$$\begin{aligned}\dot{w} &= \mu(w, x, y_r, t), & w(0) &= w_0, & w &\in \mathbb{R}^r \\ u &= u(w, x, y_r, t)\end{aligned}$$

我们称之为**动态状态反馈(dynamic state feedback)**控制算法。若仅有

$$u = u(y, y_r, t)$$

或

$$u = u(x, y_r, t)$$

则分别称之为**静态输出反馈(static output feedback)**控制和**静态状态反馈(static state feedback)**控制。设计控制的目的是解决**闭环(closed loop)**系统

$$\dot{x} = f(x, \theta, u(w, y, y_r, t))$$

$$\dot{w} = \mu(w, y, y_r, t)$$

$$y = h(x, \theta)$$

的跟踪问题。通常提出的附加要求有：向量 $x(t)$ 和 $w(t)$ 是有界的；当存在干扰 $\theta(t)$ 时，要求其输出的影响抑制到任意程度，称为**干扰解耦(disturbance rejection)**问题，或者衰减到任意程度，称为**干扰抑制(disturbance attenuation)**问题；通常要求所关心的平衡点 (x_e, ω_e) 具有渐近稳定性，而该平衡点是与期望常值参考输出 y_r 相对应的。作为一种特殊情况，当不存在干扰，即当 $\theta(t) = 0$ 时，参考输出 y_r 为零，且 x 可量测时，控制问题则变为**状态反馈镇定(state feedback stabilization)**问题，即设计状态反馈控制律，使得平衡点 (x_e, ω_e) 局部或全局渐近稳定；而当仅有输出 y 可量测时，我们称之为**输出反馈镇定(output feedback stabilization)**问题。

1.2 从传统方法到现代非线性控制

对于参数已知且不含有干扰的非线性控制系统

$$\dot{x} = f(x, u)$$

$$y = h(x)$$

传统研究方法是基于在某定常输入 u_i 所对应的平衡点 x_{ei} 附近的**线性近似(linear approximations)**描述方法

$$\dot{\xi}_i = F_i \xi_i + G_i v_i$$

$$y_i = H_i \xi_i$$

其中 $\xi_i = x - x_{ei}$ ， $v_i = u - u_i$ ，且

$$F_i = \frac{\partial f}{\partial x}(x_{ei}, u_i)$$

$$G_i = \frac{\partial f}{\partial u}(x_{ei}, u_i)$$

$$H_i = \frac{\partial h}{\partial x}(x_{ei})$$

为雅可比矩阵，其中 x_{ei} 和 u_i 满足

$$f(x_{ei}, u_i) = 0$$

$$h(x_{ei}) = 0$$

这种方法涉及到几个线性控制问题的求解，从一个问题向另一个问题的转化是相当关键的。

当状态变量在大范围内变化时, 系统不一定能保持好的性能, 甚至不能保证稳定性。由这种近似而得到的线性系统集合可以视为含有未知参数的单个线性系统(自适应方法), 或受到扰动的一族线性系统(鲁棒方法)。自适应算法和鲁棒算法都可用于控制这类由近似产生的线性系统集合。

功能更强大、价格更低廉的微处理器的使用, 以及对更高性能的需求, 激发了控制工程师们去设计具有创新性的非线性控制算法, 并将其应用于先进控制领域, 如机器人、飞机和航天器以及可作为发动机和电动机的电机等。这一情形始于20世纪70年代, 当时已开始采用微分几何工具研究非线性的可控性和可观性, 并且促进了非线性反馈控制设计理论在20世纪80年代的形成和发展。这种实践先于理论的情形是时常发生的。在这些应用中, 非线性特性, 如电动转矩、向心力和 Coriolis 力以及惯性力等扮演了重要角色, 而这些非线性特性是能够借助于已知的物理定律进行精确建模的。基于对系统物理特性以及精确的非线性模型的深入理解, 工程师们设计了用于不同领域的非线性控制算法, 以满足那些采用线性控制方法所不能满足的特殊要求: 1972年感应电动机的磁场定向控制; 1975年直升机的自动驾驶仪; 以及1976年高速刚性机器人的力矩推算等。这些算法具有一个共同创新性特点: 利用状态坐标的非线性变换和非线性状态反馈(目的在于非线性补偿), 可使闭环系统在新的坐标下具有期望的线性特征, 或至少更简单一些。例如, 在电力驱动应用方面, 用于异步电机磁场定向控制的算法使得闭环系统特性符合直流电机的动力学特征, 而直流电机工作特性好且易于控制。这很贴近极点配置理论的思想, 该思想认为任何线性可控系统(稳定或不稳定的)都可以通过状态反馈转化为具有理想特征值的系统。

上述应用实例可视为现代非线性反馈设计的开始。下面通过一个简单的例子说明这些设计方法的新颖之处。如对于一阶系统($\theta \neq 0$)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \theta x^3 + u \\ y &= x \end{aligned} \quad (1.1)$$

若 $y_r = 0$, 即控制目标是驱动输出为零, 那么采用关于原点的线性化方法有

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \\ y &= x \end{aligned}$$

为此, 我们设计如下控制($k > 0$):

$$u = -kx$$

则闭环系统

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \theta x^3 - kx = \theta x \left(x^2 - \frac{k}{\theta} \right) \\ y &= x \end{aligned}$$

有三个平衡点: 一个渐近稳定平衡点 $x = 0$, 其吸引域为 $-\sqrt{k/\theta} < x < \sqrt{k/\theta}$, 两个不稳定平衡点 $x = \pm\sqrt{k/\theta}$ 。增益 k 越大, 原点的吸引域就越大。然而, 无论 k 多大, 均不能获得全局渐近稳定, 而采用非线性控制($k > 0$)

$$u = -\theta x^3 - kx \quad (1.2)$$

就可以做到全局渐近稳定。这个控制律就可以使闭环系统成为线性且渐近稳定的系统。实际上被控对象的非线性项 θx^3 被抵消了, 为此就要求参数 θ 和非线性特性 x^3 是精确已知的。

上述例子说明了非线性反馈的好处，在非线形控制设计中采用这种合适的坐标的重要性还可通过如下二阶系统的例子说明：

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + \theta x_1^2 \\ \dot{x}_2 &= -2\theta^2 x_1^3 - 2\theta x_1 x_2 + u \\ y &= x_1\end{aligned}\quad (1.3)$$

在新的坐标 $z_1 = x_1, z_2 = x_2 + \theta x_1^2$ 下，该系统可表示为

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= u \\ y &= z_1\end{aligned}$$

因此，控制律 ($k_1 > 0, k_2 > 0$)

$$u = -k_1 z_1 - k_2 z_2 = -k_1 x_1 - k_2 x_2 - k_2 \theta x_1^2 \quad (1.4)$$

可保证系统全局渐近稳定。注意，在这种情形下，非线性部分 θx_1^2 也必须精确已知。

在如下的二阶系统例子中，可以明显看出将非线性坐标变换和非线性状态反馈相结合的优势：

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + \theta x_1^2 \\ \dot{x}_2 &= u \\ y &= x_1\end{aligned}\quad (1.5)$$

当 $\theta \neq 0$ 时，采用关于原点的线性近似化方法无法设计线性控制

$$u = -k_1 x_1 - k_2 x_2$$

使得原点全局渐近稳定。然而，非线性控制 ($k_1 > 0, k_2 > 0$)

$$u = -2\theta x_1 x_2 - 2\theta^2 x_1^3 - k_1 x_1 - k_2 x_2 - k_2 \theta x_1^2 \quad (1.6)$$

能够使得原点全局渐近稳定。事实上，在新的全局坐标 $z_1 = x_1, z_2 = x_2 + \theta x_1^2$ 下，闭环系统变为

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= -k_1 z_1 - k_2 z_2 \\ y &= z_1\end{aligned}$$

在某些情形下，忽略非线性项，采用线性近似方法的线性设计可能导致严重的问题。考虑系统

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \theta x_2^3 + u \\ y &= x_1\end{aligned}\quad (1.7)$$

与例(1.5)一样，当 $\theta > 0$ 时，采用关于原点的线性近似设计的线性控制

$$u = -k_1 x_1 - k_2 x_2$$