

程国扬 著

鲁棒非线性伺服控制及应用



科学出版社

鲁棒非线性伺服控制及应用

程国扬 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

伺服控制是工业自动化和智能制造的核心技术之一。伺服控制系统的性能决定了生产效率、加工精度和系统运行的安全性。本书针对工业生产装备和机电一体化系统中的伺服机构,采用基于状态空间模型的现代控制理论方法,以及线性控制与非线性控制相结合的技术路线,致力于研发高性能的伺服控制方案及其支持工具包,包括抗扰动鲁棒近似时间最优伺服控制、复合非线性定点伺服控制和轨迹跟踪控制、双模切换伺服控制,实现快速、平稳、准确的大范围伺服控制,满足先进制造业对效率和性能的严格要求。

本书可供伺服传动系统和装备制造业(如数控机床、机器人、自动包装/装配机械等)的研发人员,以及高等院校和科研机构中从事控制工程与自动化、机电一体化系统控制研究工作的技术人员阅读参考,也可作为相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

鲁棒非线性伺服控制及应用 / 程国扬著. —北京: 科学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-03-056151-0

I. 鲁… II. 程… III. 鲁棒控制-非线性-伺服控制 IV. TP275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 317783 号

责任编辑: 裴 育 赵微微 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 蓝 正

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年12月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017年12月第一次印刷 印张: 12 3/4

字数: 257 000

定价: 88.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

伺服控制是工业自动化的基础。在数控机床、自动装配生产线等现代机电一体化装备系统中,伺服控制技术是其支撑技术之一。作为控制科学的一个传统研究领域,伺服控制在国内外得到了广泛的研究。在当前中国推行智能制造战略、大力发展机器人和装备制造业的时代背景下,伺服控制技术的重要性更加凸显,将成为学术界和产业界共同关注的技术领域。

本书针对机电伺服传动系统的动态特性和功能需求,采用基于状态空间模型的控制设计技术,致力于提高伺服控制系统的性能和鲁棒性。鉴于线性控制技术固有的局限性,即对于给定的带宽,线性控制系统若要获得较小的超调量就无法同时获得快速响应性能,本书采用线性控制与非线性控制相结合的技术路线,以期同时实现快速响应与平稳控制。为了应对系统的扰动和不确定性,本书采用基于扩展状态观测器的扰动补偿机制,来提高伺服系统的稳态精度和鲁棒性。本书不仅介绍具体的伺服控制技术方案的,而且提供了一个软件工具包来支持设计过程,还通过各种典型的电机伺服系统的实验案例来提供示范和应用指南。

本书介绍的伺服控制技术方案的,不同于传统的基于传递函数模型的多环串级伺服控制系统方案。传统方案由于线性控制律和单自由度结构的局限性,其在性能上存在难以克服的不足。本书介绍的伺服控制技术,也有别于目前控制领域内受到广泛关注的自抗扰控制技术。自抗扰控制的出发点是为线性和非线性不确定系统提供一种统一的简单有效的控制方案,它对系统模型做了大胆的简化假设,即控制器的设计只需用到系统的相对阶和增益系数,而把模型的其他项和外部干扰都归入一个总扰动(扩展的状态变量),利用观测器来提供对状态和扰动的在线估计,用于反馈补偿。为保证快速的收敛性,自抗扰控制在扩展状态观测器和控制律中使用了非线性、非光滑函数(如关于误差量的分段函数),但这种非线性结构导致了理论分析和参数整定的困难。本书介绍的伺服控制技术主要面向机电伺服传动系统这类具有清晰物理结构的工程系统,通过机理建模和系统辨识,这类系统的动态特性可以用一个带有扰动(如负载)和非线性环节(饱和限幅)的线性系统模型来描述。本书的核心理念就是针对被控系统的模型特点,通过线性控制律与非线性控制律的综合运用,实现理想的瞬态性能;同时,利用一个线性的扩展状态观测器来进行扰动补偿,改善系统的控制精度和鲁棒性。

本书是作者过去十多年来在伺服控制领域研究工作的总结,其中主要内容源于

国家自然科学基金项目(面向高性能伺服运动系统的鲁棒非线性控制技术研究, 61174051)的研究成果。首先, 特别感谢新加坡国立大学的陈本美教授和彭可茂博士在理论方法上的启发与引导(本书有一部分内容是作者与他们的合作成果); 其次, 感谢福州大学电气工程与自动化学院的胡金高副教授、黄宴委教授以及作者指导的研究生乐宏来、陆涛、洪建水、彭萌、陈怡、赵继强、张宝刚和张玉彬等在实验方面所作的贡献; 最后, 感谢家人长期以来的支持和照顾。

由于作者水平有限, 书中难免存在不妥之处, 恳请读者和同行批评斧正。

作 者

2017年8月于福州大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 中国智能制造战略	1
1.2 先进伺服控制技术	2
1.3 本书主要内容	7
参考文献	8
第 2 章 鲁棒近似时间最优伺服控制	14
2.1 引言	14
2.2 连续时域鲁棒PTOS控制	15
2.2.1 鲁棒PTOS控制律的设计	15
2.2.2 稳定性分析	19
2.2.3 仿真实例	21
2.3 离散时域鲁棒PTOS控制	23
2.3.1 离散鲁棒PTOS控制律的设计	23
2.3.2 稳定性分析	26
2.3.3 仿真实例	31
2.4 速度受限PTOS控制	32
2.5 带阻尼伺服系统的扩展PTOS控制	36
2.5.1 扩展PTOS控制律的设计	36
2.5.2 稳定性分析	38
2.5.3 仿真实例	41
2.6 小结	43
参考文献	43
第 3 章 鲁棒复合非线性定点伺服控制	46
3.1 引言	46
3.2 连续时域RCNS控制	47
3.2.1 RCNS控制律的设计	48
3.2.2 稳定性分析	52
3.2.3 仿真实例	57

3.3	离散时域RCNS控制	64
3.3.1	离散RCNS控制律的设计	64
3.3.2	稳定性分析	68
3.3.3	仿真实例	72
3.4	小结	77
	参考文献	78
第4章	鲁棒复合非线性轨迹跟踪控制	80
4.1	引言	80
4.2	参考信号发生器	81
4.3	复合非线性轨迹跟踪控制器	83
4.4	稳定性分析	86
4.5	参考信号生成器的另一种设计	89
4.6	仿真实例	90
4.7	小结	99
	参考文献	99
第5章	复合非线性控制 MATLAB 工具包	100
5.1	引言	100
5.2	理论基础	101
5.2.1	积分增强复合非线性反馈控制	101
5.2.2	鲁棒复合非线性控制	104
5.3	软件框架和用户指南	104
5.4	设计举例	108
5.4.1	旋转-平移执行器系统	108
5.4.2	硬盘磁头定位伺服控制系统	111
5.4.3	三阶系统的轨迹跟踪控制	114
5.5	小结	117
	参考文献	117
第6章	双模切换伺服控制	118
6.1	引言	118
6.2	连续时域DMSC设计	119
6.2.1	鲁棒PTOS控制律	120
6.2.2	RCNS控制律	121
6.2.3	DMSC切换策略	123
6.2.4	稳定性分析	125

6.3 离散时域DMSC设计	128
6.3.1 离散鲁棒PTOS控制律	129
6.3.2 离散RCNS控制律	133
6.3.3 离散DMSC切换策略	136
6.4 仿真实例	140
6.5 小结	143
参考文献	143
第7章 伺服控制应用实践	145
7.1 永磁同步电机位置伺服系统的鲁棒PTOS控制	145
7.1.1 位置伺服控制器的设计	145
7.1.2 仿真分析	148
7.1.3 实验研究	152
7.2 直流伺服电机位置的扩展PTOS控制	155
7.2.1 位置伺服控制器的设计	155
7.2.2 仿真与实验验证	157
7.3 无刷直流电机调速系统的RCNS控制	160
7.3.1 无刷直流电机调速系统的数学模型	161
7.3.2 速度伺服控制器的设计	161
7.3.3 仿真分析	164
7.3.4 实验研究	168
7.4 硬盘音圈电机伺服系统的离散RCNS控制	170
7.4.1 位置伺服控制器的设计	170
7.4.2 仿真与实验验证	173
7.5 永磁同步电机位置伺服系统的DMSC控制	176
7.5.1 位置伺服控制器的设计	176
7.5.2 实验研究	179
7.6 直线电机二维伺服平台轮廓轨迹的RCNT控制	184
7.6.1 二维伺服平台的数学模型	184
7.6.2 曲线轨迹跟踪控制器的设计	186
7.6.3 实验研究	188
7.7 小结	193
参考文献	194

第 1 章 绪 论

1.1 中国智能制造战略

制造业是发展国民经济、保障国家安全和改善社会民生的基石。从 2010 年开始,我国制造业的产值超越了美国,成为全球制造业第一大国。但是,我国制造业当前还存在四个主要问题:一是自主创新能力不强;二是产品质量问题还比较突出;三是资源利用效率比较低,能耗比较高,污染较严重;四是产业结构不合理,低端产品产能严重过剩,高端制造能力比较差。简而言之,我国制造业多处于附加值较低的“生产—加工—组装”环节,只能算是一个以低端制造业为主体的“制造大国”,距离“制造强国”还有很长的路要走^[1]。

随着我国人口老龄化趋势凸显,人口红利逐渐消失、劳动力供给减少,加之资源枯竭、环境危机加重,我国长期以来以劳动密集型、资源消耗型和环境污染型为主体的制造业将难以为继、急需转型。另外,发达国家在经历 2008 年的金融危机之后,对制造业的重要性有了新的认识。美国、德国、英国等国家纷纷提出以重振制造业为核心,以信息网络技术、数字化制造技术应用为重点,旨在依靠科技创新,抢占制造业新的制高点的“再工业化”战略。例如,美国于 2012 年 2 月正式发布了《先进制造业国家战略计划》;德国在 2013 年 4 月推出了“工业 4.0 实施建议”。在国际制造业竞争加剧、我国制造业传统优势逐渐弱化、新一轮工业革命酝酿爆发的大背景下,我国政府于 2015 年推出了制造业战略发展规划^[2],期望用三个十年左右的时间,实现中国从制造业大国向制造业强国的转变。其中,《中国制造 2025》是三步走的第一个十年行动纲领,也是一个路线图和时间表。它提出通过新一代信息技术与制造业融合,来强化工业基础能力,提高综合集成水平和完善多层次人才体系,实现数字化和智能制造,满足经济社会发展和国防建设对重大技术装备的需求,达到创新发展、提质增效的目的。

《中国制造 2025》拟定了九大任务、十大领域、五大工程以及八大政策。2015 年,全国启动了超过 30 个智能制造试点示范项目,覆盖了流程制造、离散制造、智能装备和产品、智能制造新业态/新模式、智能化管理、智能服务等六方面。通过试点示范,关键智能部件、装备和系统自主化能力大幅提升,产品、生产过程、管理、服务等智能化水平显著提高,智能制造标准化体系初步建立,

智能制造体系和公共服务平台初步成形。2017 年扩大应用范围，在全国推广有效的经验和模式。

《中国制造 2025》提出要“推进制造过程智能化”、“促进制造工艺的仿真优化、数字化控制、状态信息实时监测和自适应控制”。其实现的基础是生产过程或制造环节的自动化(工业自动化)，这就需要在工厂里装备各类自动加工或装配的生产线、机器设备，包括数控机床、工业机器人等。全球最大的电子产品代工企业富士康提出了百万机器人计划，希望借助自动化技术消除简单、重复性的工作，预期今后几年内将出现首批完全自动化的工厂。《中国制造 2025》也提出“加快发展智能制造装备和产品。组织研发具有深度感知、智慧决策、自动执行功能的高档数控机床、工业机器人、增材制造装备等智能制造装备以及智能化生产线”。为实现这个目标，则需要在高档数控系统、伺服电机和控制器等方面加强研发、突破技术障碍。其中的电机伺服控制技术也是新能源汽车(电动汽车、燃料电池汽车等)和先进农机设备这些重大领域的关键核心技术之一。

1.2 先进伺服控制技术

在工业自动化制造和各类机电一体化系统中，广泛使用伺服传动机构。控制技术在这类系统中发挥着重要的作用，例如，在数控加工和自动装配生产线上，一个有效的控制系统，可确保系统的运动部件按预期的轨迹和速度运行，从而实现所需的功能和效能。上述这类系统，称为运动控制系统(或伺服系统)，在现代生产和生活领域中大量存在，如数控机床、机械手的定位控制系统，计算机硬盘中的磁头定位伺服系统等。伺服控制系统的性能决定了劳动生产率和最终产品的性能及精度。可以说，伺服控制技术是现代装备制造业的核心技术之一。

对一个控制系统，通常的要求是输出响应要快(相当于提高生产效率)、平稳(即振荡或超调量低，从而降低设备磨损，节能降耗)、没有稳态误差(提高加工精度，从而改善质量)。迄今，90%以上的工业控制系统采用比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制^[3]。PID 控制的优点是结构简单，只有三个参数，仅利用误差信号，其设计不依赖对象模型。尤其是在化工过程控制领域，由于控制对象的机理复杂，不易建立其数学模型，采用 PID 控制最便利。但是，PID 控制系统的性能并不理想，往往存在振荡(超调)过大或响应迟缓的缺点。控制性能的拙劣意味着效率的损失和能源的浪费。尽管人们不断研究 PID 参数的整定方法，以改进控制性能^[4]，但由于 PID 控制本质上是一种单自由度的线性控制方法，不能很好地协调快速响应和减少振荡这两者的矛盾，这就从结构上限制了控制系统的效能；PID 控制中的积分项容易产生积分饱和(windup)现

象,并且在包含静摩擦的系统中会产生极限环(limit cycle)。目前已出现了一些PID控制的改进方案^[5-10]。其中,文献[8]在对象模型已知的情况下,提出了基于积分项预测的抗饱和方案,并在交流变速电机上取得较好的效果。文献[9]研究了在满足预期稳定裕度下优化闭环性能指标的PID参数整定方法。文献[10]采用变增益积分控制器来改善运动控制系统的瞬态性能。这些改进型PID控制器有的只是针对特定的对象类型,有的需依赖于启发式的参数调整,缺乏严格的闭环稳定性分析,而且随着控制器的复杂度增大,已偏离PID控制原本简单明快的优点。对某些复杂系统(高阶次或/和非线性对象),PID控制甚至难以保证稳定性。为突破PID控制的局限性,一些学者转而研究分数阶控制器。例如,文献[11]和[12]把分数阶控制器应用于伺服传动系统中。与PID控制相关的、引起广泛关注的一种控制技术是由韩京清教授提出的自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)^[13,14]。ADRC不需要精确的被控对象模型,只要知道系统的相对阶和开环增益就可以设计控制律:它引入非线性跟踪微分器来提取给定目标信号的平滑(广义)导数,据以安排过渡过程,利用扩展状态观测器来估计系统状态量和广义扰动(包括模型不确定性),通过误差信号及其各阶导数构成非线性反馈控制律,并对扰动进行抵偿,最终成为一种比PID控制更有效的控制方案。迄今,围绕ADRC的理论方法展开了大量的研究^[15],它也在许多领域得到了成功应用^[16-19]。但由于ADRC引入了非线性动态特性,其闭环稳定性和性能方面的理论分析较为困难,且控制器的参数较多,参数选择与系统性能的关系不明朗,给应用推广带来了麻烦。近年来,研究的热点转向线性ADRC^[20]。

由于大多数伺服运动系统都具有清晰的物理结构,可以通过物理定律建立其伺服机制的数学模型,然后采用基于数学模型的更有效的控制技术,而不必仅仅依赖于PID等控制技术。随着微处理器和DSP(digital signal processor)芯片的性价比越来越高,在系统中采用微计算机来实现比PID控制复杂但性能更优的控制算法无论在经济上还是在技术上都具有了现实性和合理性。这方面的研究在最近二十年间受到国内外同行的持续关注^[21],研究重点在于控制系统的扰动补偿机制^[22-28]和参数自适应能力^[29-34]两方面,特别是对系统未知扰动的估计,已提出了一些较为有效的方法,如基于内模原理的扰动观测器的方法^[22]、基于时间延迟控制的扰动/不确定性的估计^[23]、基于PI观测器的扰动估计^[24]、基于等价输入的扰动估计^[25]、采用滑模观测器的扰动估计方案^[26],而文献[27]和[28]在扰动观测器的基础上分别引入非线性阻尼项和 H_∞ 滤波来抑制高频段的扰动观测器误差。上述基于扰动估计、补偿机制或参数自适应能力的研究成果有助于提高控制系统的稳态精度,但瞬态性能也是控制系统中必须关注的一个重要因素。

由于伺服系统是一种快速动态系统,其瞬态性能往往直接影响了系统的效率

和安全性, 所以针对提高瞬态性能的研究非常重要。众所周知, 时间最优控制(time-optimal control, TOC)的瞬态性能虽好, 但缺乏鲁棒性; 二次型线性最优控制需要面对线性控制方法固有的“快速响应与减少振荡”的矛盾; 增益调度控制(也包括变参数 PID 控制)在保证稳定性和算法实现方面较为麻烦。迄今, 对提高瞬态性能较为有效的控制技术有两种: 第一种是近似时间最优伺服(proximate time-optimal servomechanism, PTOS)控制^[35,36], 它在时间最优控制律的基础上引入一个线性控制区, 从而避免了控制量的颤振现象。但 PTOS 控制现有的设计方案主要适用于双积分模型的伺服系统, 要应用到一般模型的系统尚有困难。第二种能有效提高瞬态性能的控制技术是复合非线性反馈(composite nonlinear feedback, CNF)控制技术, 它可以解决那些控制输入饱和和受限的线性系统的快速跟踪控制问题^[37,38]。CNF 控制技术是针对线性控制技术固有的局限性(快速响应和低超调不能得兼)而提出的改进方案, 其控制器包含线性反馈和非线性反馈两部分: 线性反馈实现快速响应的控制功能; 非线性反馈通过动态阻尼来抑制超调, 从而使整个系统具有快速且平稳的优越的瞬态性能。这种控制技术具有灵活的结构, 其线性部分可以独立运行, 非线性部分可按需要选用或不用, 而不改变控制信号的平滑性, 也不影响系统稳定性(采用基于 Lyapunov 稳定性的设计来保证)。CNF 控制技术最初在硬盘磁头定位控制系统中获得了实验验证, 其渐近跟踪性能不但远远优于 PID 控制, 甚至超过时间最优控制^[38]。这项技术目前已在硬盘伺服系统^[38-40]、机械手的定位控制^[41]、无人直升机的飞行控制^[42,43]等系统上进行了成功测试, 展示了其优越性, 特别是在数控加工、自动装配等需要快速精确定位的应用领域。文献[44]将目标轨迹生成器引入 CNF 控制律, 并进行基于误差信号的积分控制, 实现了在常值扰动下对典型曲线轨迹信号的准确跟踪。文献[45]给出了一种适于多输入多输出系统进行轨迹跟踪的 CNF 控制设计方案, 但未考虑扰动因素的影响。文献[46]和[47]针对未知扰动和模型不确定性的影响, 引入扩展状态观测器, 对扰动进行估计和补偿, 改进了 CNF 控制系统的稳态性能和鲁棒性。由于 CNF 线性控制律的输出信号不应超过控制信号的最大幅值, 在设计 CNF 控制律时就限定了允许的工作范围, 即只保证半全局稳定性(semi-global stability)——现有的线性控制方法在控制信号幅度受限的情况下都存在这个问题。文献[48]提出了基于两阶段定位的统一控制方案(unified control scheme, UCS), 可以扩大系统的工作范围, 但不能彻底消除半全局稳定性的缺陷, 而且由于其控制器中含有两个非线性反馈律, 控制系统的设计和实现都较为麻烦。CNF 控制器的设计过程涉及矩阵方程求解和参数选择, 尤其是非线性反馈部分的设计, 需要一定的技巧和调试工作量。文献[49]给出了一种对 CNF 非线性增益函数的参数进行整定从而优化 ITAE(integral of time multiplied by absolute error)性能指

标的思路,其实质就是通过循环迭代仿真来寻优。文献[50]介绍了一个基于MATLAB的CNF设计支持软件包,它实现了一些基本设计功能,例如,利用积分控制消除常值扰动的影响,实现准确的定点跟踪;仿真测试和数据导出。

CNF控制虽然具有卓越的瞬态性能,但其仅考虑了控制输入量的饱和和限幅,还不能处理系统状态约束的问题。文献[51]和[52]研究了约束条件下的迭代学习控制方法,可用于改善伺服跟踪性能。文献[53]和[54]把模型预测控制与滑模控制技术结合起来改善微纳定位系统的性能。迄今,模型预测控制(model predictive control, MPC)是唯一能在求解优化控制问题的过程中直接处理状态与控制量约束条件的工业控制技术,但约束条件下的控制量不再具有解析形式,而是要在每个控制周期内通过实时求解一个数学规划问题来获得,因而MPC算法的在线计算量巨大。现有的成功应用主要集中在炼油、化工这些动态特性缓慢且计算资源相对宽裕的系统^[55]。而对电力电子、伺服传动等快速动态系统和计算资源有限的嵌入式系统,MPC的实际应用尚存在不少困难^[56],目前研究的重点是对MPC算法进行简化和提高其计算效率^[57,58],这方面仍有待更深入的研究和突破。

在实际应用中,伺服传动系统的功能趋于多样化,面临的环境不确定性增大,当系统特性发生较大差异时,如出现大扰动(给定目标变化、突加负载、非线性效应等),或者由于零件故障导致系统参数突变等情况,其控制系统的性能可能出现很大的偏差,甚至失去稳定性。其根本原因在于,控制系统的设计目前主要采用连续变量动态系统(continuous variable dynamic system, CVDS)控制技术,其本身不足以有效地处理系统特性突变等离散事件,而这些离散事件的产生有其独特的时序逻辑关系,且与底层的连续变量动态系统之间又有相互作用。这种既带有事件触发的离散逻辑,又包含时间驱动连续动态,且两者相互作用的复杂系统,称为混杂动态系统(hybrid dynamic system, HDS),或简称为混杂系统^[59]。混杂系统包含离散事件动态系统(discrete event dynamic system, DEDS)和CVDS两类不同的子系统^[60],虽然DEDS和CVDS领域的研究迄今已经取得了较多成果,特别是CVDS领域的研究较为成熟。但是,正如Godbole等^[61]所证实的,简单地将单独设计的连续系统控制器和离散事件监控器结合起来,不能确保系统获得理想的性能。例如,在硬盘伺服系统中,磁头的行为受计算机逻辑单元发出的磁道定位和读写信号支配,一方面,需满足“在未达到目标磁道时不能开始读写”和“未能成功读出数据时产生失败标志”等逻辑约束关系;另一方面,磁头在音圈电机带动下的寻道过程是一种连续动态的机械运动过程,其占用的时间远大于数据访问的电磁运动过程的时间,因而硬盘访问数据的时间瓶颈就是磁头的寻道过程,从优化硬盘整体性能的角度考虑,必

须同时考虑寻道过程和数据访问要求,对寻道顺序进行调度,并采用批数据预读入。这就是一个混杂动态控制的问题。

虽然混杂动态控制的概念可追溯到 20 世纪 60 年代^[62],但其真正受到密切关注是在最近二三十年,这主要得益于计算机技术的发展使得复杂控制算法的实时实现成为可能,另外也归因于现代社会对控制系统的性能要求日益提高。由于混杂系统的复杂性,难以建立统一的建模和分析方法,一般是根据工程实际 HDS 问题的各自特点,把它们加以分类之后进行模型描述,以便“对具体系统进行具体分析”,典型的子类有切换型 HDS、水箱型 HDS、集中控制型 HDS、旅行商型 HDS、递阶型/交互型 HDS、HDS 的仿真语言模型/混杂自动机/混杂 Petri 模型等。目前,切换型 HDS,特别是线性切换系统,得到较多的研究,研究的重点是切换系统的稳定性、能控性和切换镇定^[63-79]。切换型 HDS 针对的工程背景是采用多个控制器按切换方式来控制一个连续动态对象,其在某种意义上可看成是变结构系统的一般化,但系统的复杂性大为增加。在混杂控制器设计方面,Narendra 等从自适应控制的角度出发,提出采用多个模型对系统进行辨识、参数整定和控制律切换的设计方案^[80-83]。Morse 等^[84-86]针对系统的不同运行状态设计一族固定的控制律,然后在顶层采用一个监督控制器进行控制律调度和切换。这些方案及其扩展方案受到了广泛关注。但现有的研究成果主要是基于线性控制律的切换策略,分析切换系统的稳定性,而对如何通过合理设计底层控制律(族)和顶层基于逻辑的切换规则来提高系统性能从而实现单一控制律无法达到的多个性能目标,这方面的研究还远远不够。特别是对复杂的工业伺服传动系统,其动态特性会由于非线性扰动、突加负载、零件故障、控制目标/任务不同等因素而发生急剧的变化,控制系统必须能在其状态变量和控制输入受限的条件下进行快速响应并维持良好的工作性能。常规的自适应控制方案很难适用于这样的系统,而需要借助 HDS 的理论方法加以分析和进行控制设计。目前,这一方向的研究已开始受到重视。例如,文献[87]基于混杂系统的理论方法,把带间隙机械系统的运行模式分为“接触模式”和“间隙模式”,分别设计其分段模型预测控制器,改善了带间隙机械系统的跟踪控制性能。文献[88]提出一种基于脉冲控制的混杂控制结构,在离散时间点上对反馈控制器的状态进行脉冲式的改变,可以实现线性反馈所不能达到的性能目标,并应用于一个扫描探针显微镜的精确运动控制。文献[89]和[90]分别在离散时域和连续时域,针对带未知扰动的双积分伺服系统的快速定点跟踪问题,提出把近似时间最优伺服控制律用于初始大误差阶段的快速追踪,随后切换成带扰动补偿的复合非线性控制律进行平稳的渐近跟踪,实现了系统大范围工作的鲁棒一致性能。文献[91]设计了基于有限状态机的机电系统运行状态监督控制器,并采用事件驱动的控制律对无刷交流电机进行电流调节,

在降低逆变开关切换频率的同时保持了滞环电流控制的优势。文献[92]借鉴混杂控制的思想,根据系统实时运行状态,在驱动电机与负载侧轮换进行摩擦补偿,实现了间接驱动机构负载侧的准确跟踪控制。文献[93]提出一种基于指令调节器的混杂监督控制结构,可用于受约束系统的实时控制。这些研究成果体现了混杂动态控制技术的性能优越性,但其主要针对特殊的系统结构进行设计,若要加以推广则需进一步的研究。随着现代工业制造环境对伺服传动系统的功能需求走向复杂化和智能化,其发展成为一种信息物理系统(cyber-physical system)的趋势日渐明朗,系统的底层物理过程与顶层信息处理之间的融合与相互作用越来越密切。在伺服传动系统中引入混杂动态建模与控制技术,能显著提升其运行效率和可靠性,而这方面的研究才刚刚起步。

总之,伺服控制是一个在国内外均受到持续关注的研究领域。研究适用于工业自动化和智能制造系统的高性能伺服控制技术,并与实际应用紧密结合,对我国装备制造业的技术进步、实现中国智能制造战略具有重要的现实意义。

1.3 本书主要内容

本书针对工业自动化与智能制造环境下伺服传动机构对定点位置和曲线轨迹的跟踪控制问题,探索基于状态空间模型的控制设计方法,致力于提高伺服控制的瞬态性能,实现快速与平稳的跟踪,并改善系统对负载扰动和不确定因素的鲁棒性。本书的主体内容将在后续的六章分别加以介绍。本节在此提供一个概要预览,帮助读者了解与把握全书的技术内容。

第2章针对双积分模型为基础的系统,分别在连续时域和离散时域介绍基于线性扩展状态观测器的鲁棒PTOS控制方案。这种控制方案在初始误差较大时利用饱和控制信号对系统进行最大的加速或减速(类似于时间最优控制),而当误差低于某个阈值时则平滑切换为线性控制律;利用一个降阶的扩展状态观测器来同时估计系统状态量和未知扰动,并用于反馈和补偿。这种控制方案可以达到接近时间最优控制的性能,但具有对系统模型偏差和扰动的鲁棒性,特别适合如数控机床进给系统的快速位置伺服控制。该章也将讨论带有速度限制和惯性阻尼两种特殊情况下的PTOS控制方案设计。

第3章考虑控制输入(执行器)饱和和受限和存在未知扰动的一般线性系统的定点伺服控制问题,分别在连续时域和离散时域上介绍鲁棒复合非线性定点伺服(robust composite nonlinear set-point servo, RCNS)控制设计方法。这种控制方案具有模块化的结构,它包含线性控制律(核心部分)、非线性反馈(可选)、基于扩展状态观测器的扰动补偿机制(可选)三个组成部分,可实现优越的瞬态和稳态定点

跟踪性能。利用 Lyapunov 理论严格证明 RCNS 闭环系统的稳定性, 并通过一个双惯性伺服传动系统和一个电机位置伺服系统的控制器设计仿真实例, 展示控制方案的优越性。这种可组态的控制系统为高性能伺服应用场景提供一种有效的解决方案。

第 4 章把鲁棒复合非线性控制设计方案推广用于曲线轨迹跟踪。首先引入一个参考信号生成器来构造出与目标信号相对应的状态量和辅助控制信号, 然后把它们结合到鲁棒复合非线性控制的统一框架中。通过一个仿真案例的研究, 来验证该方案在曲线轨迹的跟踪控制的优越性能, 且对目标轨迹和未知扰动的变化具有较好的鲁棒性。该章介绍的鲁棒复合非线性轨迹跟踪(robust composite nonlinear trajectory tracking, RCNT)控制方案, 可应用于数控机床、机械臂等多轴联动机电装置的伺服控制系统设计。

第 5 章介绍一个用于支持复合非线性控制器(包括定点伺服和轨迹跟踪)设计和仿真测试的 MATLAB 工具包。此工具包利用 MATLAB 系统的图形用户界面资源, 为用户提供简便易用的软件操作功能。用户通过此工具包, 可以方便地对控制器的结构和参数进行组态, 如选择状态反馈或输出反馈、积分增强或基于扩展状态观测器的扰动补偿、复合非线性控制或纯线性控制等, 以及闭环主导极点的阻尼和自然频率、观测器的带宽等参数值, 可以进行仿真测试、观察仿真结果, 还可以把设计和仿真的相关数据导出 MATLAB 工作空间。

第 6 章介绍双模切换伺服控制(dual mode switching servo control, DMSC), 其主要思想是在大误差时采用 PTOS 控制进行快速追踪, 而当系统状态进入目标的邻域时则切换为 RCNS 控制来实现平稳着陆。分别在连续时域和离散时域上设计 DMSC 的切换策略和用于速度估计、干扰补偿的扩展状态观测器, 并从理论上分析闭环系统的稳定性。通过一个仿真案例, 验证该控制方案可以实现大范围定点目标的快速、精确跟踪, 具有改进的调节时间和较好的鲁棒性。该章给出的 DMSC 方案采用参数化设计, 可以方便地应用于具有双积分器模型的伺服系统。

第 7 章把前面各章介绍的伺服控制技术, 即鲁棒 PTOS 控制技术(包括速度受限 PTOS 控制、扩展 PTOS 控制)、RCNS 和 RCNT 控制技术, 以及 DMSC 技术等应用到具体的电机伺服系统中, 实现高性能的位置或速度调节。涉及的电机伺服系统包括永磁交流同步电机、直流伺服电机、无刷直流电机、音圈电机、直线电机两维伺服运动平台等, 基本覆盖了工业伺服应用中常见的电气传动设备。通过控制器设计、仿真分析、数字信号处理器芯片编程实现和实验测试, 展示这些伺服控制技术的优越性, 为实际应用提供示范和指导。

参 考 文 献

[1] 中国科学院先进制造领域战略研究组. 中国至 2050 年先进制造科技发展路线图. 北京: 科学

出版社, 2009.

- [2] 国务院. 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知(国发〔2015〕28号). 2015-05-19. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [3] Li Y, Ang K H, Chong G. Patents, software, and hardware for PID control—An overview and analysis of the current art. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, 26(2): 42-54.
- [4] Åström K J, Hägglund T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 2006.
- [5] Su Y X, Sun D, Duan B Y. Design of an enhanced nonlinear PID controller. *Mechatronics*, 2005, 15(9): 1005-1024.
- [6] Heertjes M F, Schuurbiens X G P, Nijmeijer H. Performance-improved design of N-PID controlled motion systems with applications to wafer stages. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(5): 1347-1355.
- [7] Choi J W, Lee S C. Antiwindup strategy for PI-type speed controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(6): 2039-2046.
- [8] Shin H B, Park J G. Anti-windup PID controller with integral state predictor for variable-speed motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(3): 1509-1516.
- [9] Li K. PID tuning for optimal closed-loop performance with specified gain and phase margins. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(3): 1024-1030.
- [10] Hunnekens B, van de Wouw N, Heertjes M, et al. Synthesis of variable gain integral controllers for linear motion systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(1): 139-149.
- [11] Yu W, Luo Y, Pi Y. Fractional order modeling and control for permanent magnet synchronous motor velocity servo system. *Mechatronics*, 2013, 23(7): 813-820.
- [12] Zhong J, Li L. Tuning fractional-order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers for a solid-core magnetic bearing system. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(4): 1648-1656.
- [13] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900-906.
- [14] 韩京清. 自抗扰控制技术. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [15] 李杰, 齐晓慧, 万慧, 等. 自抗扰控制: 研究成果总结与展望. *控制理论与应用*, 2017, 34(3): 281-295.
- [16] 周振雄, 曲永印, 杨建东, 等. 采用改进型自抗扰控制器的平面磁轴承悬浮控制. *电工技术学报*, 2010, 25(6): 31-38.
- [17] 赵春哲, 黄一. 基于自抗扰控制的制导与运动控制一体化设计. *系统科学与数学*, 2010, 30(6): 742-751.
- [18] 吴丹, 赵彤, 陈息. 快速刀具伺服系统自抗扰控制的研究与实践. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1354-1362.
- [19] Tang H, Li Y. Development and active disturbance rejection control of a compliant micro/nano-positioning piezo-stage with dual mode. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(3): 1475-1492.
- [20] 陈增强, 程贻, 孙明玮, 等. 线性自抗扰控制理论及工程应用的若干进展. *信息与控制*, 2017,