



电液伺服系统非线性控制

焦宗夏 姚建勇 著



科学出版社

国家科学技

资助出版

电液伺服系统非线性控制

焦宗夏 姚建勇 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

电液伺服系统所具有的强非线性的模型特征和各类模型不确定性,已成为制约系统控制性能提升的瓶颈因素。本书以电液伺服系统非线性控制为研究目标,系统阐述作者及课题组在该领域所取得的研究成果。全书共 13 章:第 1 章为绪论,第 2~8 章主要论述电液位置伺服系统的非线性控制方法,第 9~13 章论述带强运动干扰的电液力伺服系统的非线性控制方法。各章均以电液伺服系统非线性模型为控制器设计的基础,重点考虑如何补偿各类模型不确定性对系统伺服性能的影响,并分别介绍了不同工况下应采取何种控制策略以达到提升系统控制性能的目的。

本书可作为高等院校液压传动与控制方向研究生的教学参考书,也可供相关专业的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电液伺服系统非线性控制 / 焦宗夏, 姚建勇著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-051026-6

I. ①电… II. ①焦… ②姚… III. ①电液伺服系统-非线性控制系统
IV. ①TH137.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 303880 号

责任编辑: 裴 育 纪四稳 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 陈 敬

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>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张: 22 1/4

字数: 428 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



焦宗夏 1963年生，辽宁沈阳人。北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院院长，教授，博士生导师。教育部“长江学者”特聘教授(2006)，新世纪百千万人才工程国家级人选(2007)，

国家杰出青年科学基金获得者(2008)，国家政府特殊津贴专家(2012)，973首席科学家(2014)，第六届全国优秀科技工作者(2014)，何梁何利科学与技术进步奖获得者(2016)。1991年于浙江大学博士毕业，同年到北京航空航天大学做博士后；1993年于北京航空航天大学任教至今；2000年1月~7月于德国汉堡-哈堡科技大学任客座教授。现任飞行器控制一体化技术国家级重点实验室主任，中国航空学会机电分会主任委员，第七届国务院学科评议组成员。获国家技术发明奖二等奖1项，国家科技进步奖二等奖1项，省部级科技奖励10余项；获发明专利35项；发表论文被SCI收录67篇，ESI高被引论文3篇，EI收录200余篇；出版中英文专著2部，编译著5部。主要研究领域为飞机液压系统振动、电液伺服系统及装备、机载电液动力与作动技术。



姚建勇 1984年生，山东菏泽人。南京理工大学机械工程学院火箭导弹发射工程系系主任，教授。2015年入选江苏省“六大人才高峰”人才，2016年入选南京理工大学“卓越计划”青年拔尖人才选

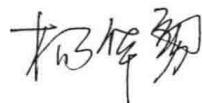
聘计划，破格晋升教授职称。2012年于北京航空航天大学博士毕业，同年到南京理工大学任教至今；2010年10月～2011年10月于美国普渡大学进行学术访问。现任中国航空学会机电分会青工委委员，*IEEE Access* 副主编 (Associate Editor)。获 *Chinese Journal of Aeronautics* 突出贡献奖；获发明专利3项；发表学术论文70余篇，作为第一作者/通讯作者发表论文被SCI收录26篇，其中ESI高被引论文3篇、IEEE汇刊论文7篇。主要研究领域为机-电-液伺服控制、动态系统故障诊断与容错控制、发射装备电液动力与作动技术。

序 一

电液伺服控制是流体传动与控制专业的核心技术之一，是大功率高精度伺服装备的关键。液压系统具有变增益、摩擦、时变参数等本质非线性特性，易受负载与运动等强干扰，是制约电液伺服控制系统性能提升的瓶颈因素，电液伺服系统的非线性控制为解决上述问题提供了一个比传统方法更为有效的理论与技术途径。

《电液伺服系统非线性控制》一书针对电液伺服系统中的模型不确定性与强干扰这一关键问题，独创了自适应积分鲁棒控制、主动摩擦补偿、非线性鲁棒输出反馈、自抗扰与反步控制一体化设计等非线性控制方法，形成了完整的电液伺服系统非线性控制理论体系，是我国第一本专门系统论述电液伺服系统非线性控制的专著。

该书系统地研究了影响电液伺服系统性能的各种因素，并针对具体问题给出了优良的解决方案，涵盖了电液伺服系统非线性控制技术最核心的问题，所呈现的研究成果不仅具有重要的理论价值，也具有巨大的工程实际意义，特别是在工程实践中的成功应用与实施，体现了我国在该领域的理论水平和技术实力。该书凝聚了作者十余年来从事电液伺服控制技术研究的心血和成果，如今正式出版，奉献于社会。相信，该书一定会为电液伺服控制技术及相关领域的学者和工程技术人员提供重要参考价值。



中国工程院院士

2016年10月

序 二

非线性、不确定性等因素严重制约了电液伺服系统控制性能的提升。如何有效克服各类非线性和建模不确定性是电液伺服控制领域的核心问题，也是目前的研究热点。围绕此问题，作者开展了长期的理论与实践研究，取得了大量研究成果，已经应用于高精度负载模拟器、高速运动转台等重大精密伺服装备中，引领了电液伺服控制专业的发展方向，部分研究成果具有在国际上获得好评的首创性，如为解决不匹配干扰的渐进补偿问题所提出的自适应积分鲁棒控制方法、为解决输出反馈非线性控制的鲁棒性问题所提出的观测与控制一体化设计方法等。

电液伺服控制理论与技术的发展经历了经典、现代和非线性的控制阶段，前两种理论已经有大量出版物，但专门论述电液伺服系统非线性控制方面的著作还比较少见。该书正是对作者十余年来在电液伺服系统非线性控制领域上取得的研究成果的整理、总结和凝练，它的适时出版必将极大地推动该领域的学术进步和工程应用。



中国工程院院士

2016年10月

前 言

电液伺服系统具有功重比大、响应快及抗负载刚性强等突出优点，在众多重要领域得到了广泛应用，且通常处于控制和动力传输的核心地位，尤其在航空航天领域，电液伺服系统广泛应用于舵面作动、矢量推进、起落架收放、刹车等场合，对安全飞行及着陆等极为重要，是机械电子工程中的核心技术之一。液压系统的非线性特性和建模不确定性，是制约电液伺服控制系统性能提升的瓶颈因素，这也使得基于线性理论的经典控制方法逐渐不能满足系统的高性能需求，因此迫切需要针对电液伺服系统的非线性特性，设计更加先进的非线性控制方法。

电液伺服系统具有强非线性的模型特征，如伺服阀压力流量非线性、微分方程结构非线性、执行器摩擦非线性等。除非线性特性外，电液伺服系统还存在诸多不确定性，包括模型偏差和环境干扰(外负载、测量噪声等)。这些模型不确定性又可以分为两类，即参数不确定性和不确定性非线性。参数不确定性包括负载质量的变化以及随温度和磨损而变化的液压油有效弹性模量、伺服阀流量增益、黏性摩擦系数等。其他的不确定性，如外干扰、未建模泄漏和非线性摩擦等，由于难以获知它们的精确模型，所以称之为不确定性非线性。不确定性的存在，可能会使以系统名义模型设计的控制器不稳定或者性能降阶。模型不确定性是目前基于模型的非线性控制策略主要的研究热点，也是影响基于模型的非线性控制策略控制性能的核心因素。因此，针对模型不确定性的非线性控制技术得到了广泛的关注与空前的发展。

电液伺服控制理论与技术的发展经历了经典、现代和非线性的控制阶段，前两种理论已经有大量出版物，但专门论述电液伺服系统非线性控制方面的著作还比较少见。鉴于此，本书对作者课题组近年来的研究成果进行总结和凝练，填补我国在电液伺服系统非线性控制领域学术专著层面上的空白，也将在推动该领域的学术进步和工程应用方面起到积极作用。

依据被控输出信号的不同，本书从结构上可大致分为两大部分，共 13 章，其中第 1 章为绪论，第 2~8 章重点论述电液位置伺服系统非线性控制策略与实践经验，第 9~13 章总结凝练作者在一类特殊的电液力伺服系统非线性控制方面的科研成果，即电液负载模拟器的非线性控制策略。电液负载模拟器不但有电液力/力矩伺服控制的需求，同时还必须具备抗强运动干扰的能力。

在内容上，本书既注重理论推导过程的严谨性，又强调工程实践过程中的可操作性；在写作上，章节安排遵循循序渐进的原则，在理论方法上由浅入深、由简至繁，同时又尽可能保证各章节具有一定的独立性，以便读者根据感兴趣的主题进行跳跃式阅读，快速理解相应控制器设计的要点。

作者长期从事电液伺服系统非线性控制方法与工程实践等方面的研究，取得了重大进展，获国家技术发明奖二等奖一项，且大部分成果已经以论文的形式发表于国际权威学术期刊，如 IEEE/ASME TMECH、IEEE TIE 等，多篇学术论文入选 ESI 高被引论文，相关成果已经应用于飞机电液余度舵机、高精度电液负载模拟器、高速运动液压转台等重大精密伺服装备中。

本书的部分素材源自第一作者多年指导的博士论文，主要包括姚建勇博士的博士论文以及华清博士的博士论文、汪成文博士的博士论文、韩松杉博士的博士论文，在此表示感谢。此外，本书部分内容也源于近几年作者合作发表的学术论文。书中研究成果得到了国家 973 计划(2014CB046400)、国家自然科学基金(51675279、51235002)等项目的大力支持，本书的出版得到了国家科学技术学术著作出版基金的资助，在此一并表示感谢。

限于作者水平，书中疏漏或不足之处在所难免，望读者批评指正。

作者

2016年6月

目 录

序一	
序二	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 电液伺服系统中的控制问题	1
1.2 本书章节安排	5
参考文献	6
第 2 章 电液伺服系统非线性建模与反馈线性化控制	8
2.1 电液伺服系统线性模型及特性分析	8
2.1.1 线性化建模	8
2.1.2 多自由度负载建模	10
2.1.3 阀控执行器的非线性分析	13
2.2 电液伺服系统非线性模型	14
2.3 模型对比仿真实例	16
2.4 基于精确模型的反馈线性化控制策略及频宽拓展	18
2.4.1 由非线性到线性的坐标变换	18
2.4.2 干扰抑制分析	21
2.4.3 高频鲁棒控制器的输入输出特性及干扰抑制分析	23
2.4.4 实验验证	24
2.5 本章小结	33
参考文献	33
第 3 章 面向模型不确定性的电液伺服系统自适应鲁棒控制	34
3.1 电液伺服系统直接自适应鲁棒控制	34
3.1.1 系统模型与问题描述	35
3.1.2 不连续的参数映射	36
3.1.3 自适应鲁棒控制器的设计	37
3.1.4 自适应鲁棒控制器的性能及分析	41
3.1.5 仿真验证	44
3.2 电液伺服系统间接自适应鲁棒控制	49

3.2.1	控制器的设计	50
3.2.2	受控的参数自适应过程	50
3.2.3	间接参数自适应律设计	52
3.2.4	仿真验证	54
3.3	本章小结	57
	参考文献	57
第 4 章	光滑干扰非线性鲁棒控制	58
4.1	电液伺服系统误差符号积分鲁棒控制	58
4.1.1	误差符号积分鲁棒控制器的设计	59
4.1.2	仿真及实验验证	62
4.2	基于反演设计的电液伺服系统自适应积分鲁棒控制	66
4.2.1	系统模型与问题描述	66
4.2.2	非线性自适应积分鲁棒控制器的设计	68
4.2.3	对比实验验证	72
4.3	电液伺服系统自适应误差符号积分鲁棒控制	83
4.3.1	系统模型与问题描述	83
4.3.2	自适应误差符号积分鲁棒控制器的设计	85
4.3.3	自适应误差符号积分鲁棒控制器的性能及分析	86
4.3.4	对比实验验证	88
4.4	本章小结	98
	参考文献	98
第 5 章	基于模型的非线性摩擦补偿与低速伺服控制	100
5.1	常用的摩擦模型	101
5.1.1	静态摩擦模型	101
5.1.2	动态摩擦模型	102
5.2	基于 LuGre 模型的摩擦补偿控制策略	103
5.2.1	系统模型与问题描述	103
5.2.2	基于 LuGre 模型的自适应鲁棒摩擦补偿控制器的设计	105
5.2.3	自适应鲁棒控制器的性能	109
5.2.4	仿真验证	111
5.3	基于改进型 LuGre 模型的摩擦补偿控制策略	116
5.3.1	系统模型与问题描述	117
5.3.2	新型连续可微的静态摩擦模型	118
5.3.3	改进型 LuGre 摩擦模型及系统重构	119

5.3.4	基于改进型 LuGre 模型的自适应摩擦补偿控制器的设计	122
5.3.5	自适应控制器的性能	126
5.3.6	对比实验验证	128
5.4	本章小结	135
	参考文献	136
第 6 章	电液伺服系统重复控制	137
6.1	传统的重复控制策略	137
6.2	电液伺服系统自适应鲁棒重复控制	142
6.3	电液伺服系统非线性自适应重复控制	147
6.3.1	系统模型与问题描述	147
6.3.2	非线性自适应重复控制器的设计	149
6.3.3	对比实验验证	158
6.4	本章小结	164
	参考文献	164
第 7 章	电液伺服系统非线性参数自适应及运动约束控制	166
7.1	含分母非线性参数的自适应鲁棒控制	166
7.1.1	系统模型与问题描述	166
7.1.2	符号定义及不连续映射	169
7.1.3	自适应鲁棒控制器的设计	169
7.1.4	性能定理	173
7.2	电液伺服系统加速度约束控制	174
7.2.1	系统模型与问题描述	175
7.2.2	符号定义及不连续映射	176
7.2.3	控制器的设计	177
7.2.4	性能定理	180
7.2.5	系统速度、加速度约束及控制器参数整定	181
7.2.6	仿真验证	181
7.3	电液伺服系统输出约束控制	186
7.3.1	系统模型与问题描述	186
7.3.2	符号定义	187
7.3.3	控制器的设计	188
7.3.4	性能定理	191
7.3.5	仿真验证	191
7.4	本章小结	193
	参考文献	194

第 8 章 电液伺服系统输出反馈控制	195
8.1 液压马达位置伺服系统输出反馈鲁棒反演控制.....	195
8.1.1 系统模型与问题描述.....	195
8.1.2 非线性输出反馈控制器的设计.....	196
8.1.3 对比实验验证.....	201
8.2 单出杆液压缸位置伺服系统输出反馈控制.....	208
8.2.1 系统模型与问题描述.....	208
8.2.2 系统输出反馈控制器的设计.....	210
8.2.3 仿真分析.....	215
8.3 本章小结.....	218
参考文献.....	219
第 9 章 电液负载模拟器及其速度同步控制	220
9.1 电液负载模拟器的基本原理.....	221
9.2 电液负载模拟器的复杂数学模型的建立.....	222
9.2.1 负载模拟器动力执行机构的数学模型.....	222
9.2.2 负载模拟器其他环节的数学模型.....	226
9.3 简化模型及其所带来的影响.....	228
9.4 复杂模型的特性分析.....	230
9.5 基于舵机控制信号的负载模拟器的速度同步控制.....	235
9.6 本章小结.....	238
参考文献.....	238
第 10 章 基于速度同步思想的复合同步加载控制	239
10.1 复合速度同步控制策略.....	239
10.1.1 数学建模.....	239
10.1.2 结构不变性与传统速度同步方法的理论及应用分析.....	241
10.1.3 考虑舵机刚度的速度同步补偿算法.....	244
10.1.4 复合速度同步控制算法.....	247
10.1.5 复合速度同步控制器的补偿参数确定规则.....	250
10.1.6 实验验证.....	252
10.2 基于舵机指令前馈的同步加载控制策略.....	261
10.2.1 同步控制器设计.....	261
10.2.2 实验验证.....	263
10.3 本章小结.....	266
参考文献.....	266

第 11 章 电液负载模拟器的自适应速度同步复合控制	267
11.1 自适应速度同步复合控制思想	267
11.2 自适应速度同步控制器设计	269
11.2.1 舵机和加载系统的速度频域模型	269
11.2.2 速度同步控制器结构	270
11.2.3 基本概念与相关定理	272
11.2.4 主要结论	273
11.3 仿真研究	276
11.3.1 基于 AMESim/Simulink 的联合仿真环境	276
11.3.2 多余力仿真	278
11.3.3 动态加载仿真	281
11.4 实验验证	284
11.4.1 多余力实验	285
11.4.2 动态加载实验	287
11.5 本章小结	290
参考文献	291
第 12 章 电液负载模拟器自适应鲁棒控制	292
12.1 电液负载模拟器自适应鲁棒非线性控制	292
12.1.1 系统模型与问题描述	292
12.1.2 自适应鲁棒力控制器设计	294
12.1.3 仿真验证	298
12.2 电液负载模拟器高动态自适应鲁棒输出反馈控制	302
12.2.1 系统模型与问题描述	302
12.2.2 自适应鲁棒力控制器设计	303
12.2.3 实验验证	308
12.3 电液负载模拟器自适应鲁棒反步控制	314
12.3.1 系统模型与问题描述	314
12.3.2 自适应鲁棒反步力控制器设计	314
12.4 本章小结	320
参考文献	320
第 13 章 电液负载模拟器静态加载摩擦补偿	321
13.1 基于动态摩擦模型的非线性鲁棒控制	321
13.1.1 系统模型与问题描述	321
13.1.2 控制器设计	324
13.1.3 实验验证	328

13.2 基于光滑 LuGre 模型的自适应鲁棒控制与摩擦补偿.....	332
13.2.1 系统模型与问题描述	332
13.2.2 控制器设计.....	333
13.2.3 仿真验证.....	336
13.3 本章小结	339
参考文献	339

第 1 章 绪 论

1.1 电液伺服系统中的控制问题

电液伺服系统具有输出力/力矩大、功重比高、响应快及抗负载能力强等突出优点,在众多重要领域得到了广泛应用,且通常处于控制和动力传输的核心地位,是机械电子工程的核心技术之一^[1]。凡是需要大功率、快速、精确反应的控制系統,几乎都离不开电液伺服控制,尤其在飞行器舵面操纵、机轮刹车与转向、发动机喷口矢量控制、装甲武器行进间射击的双稳系统、火箭武器发射系统的随动调转装置、高端装备制造、冶金、工程机械、力学环境效应模拟与测试等领域,电液伺服系统作为作动子系统起着举足轻重的作用,而优良控制器的设计是研制高性能电液伺服装置的关键。

电液伺服控制方法总是与控制理论的发展相辅相成。自 1948 年维纳出版划时代的著作《控制论》以来,以奈奎斯特为代表的诸多学者创立并发展了基于频域分析的经典控制理论。美国麻省理工学院(MIT)的 Blackburn 等学者在 20 世纪 50 年代末期采用经典控制理论对液压放大器和电液伺服系统进行了系统研究,构成了液压伺服系统的经典控制理论体系,并出版了第一本液压伺服控制的专著^[2]。此后,美国 Merritt 于 1967 年出版了系统讨论液压伺服系统分析与设计的经典著作 *Hydraulic Control Systems*^[3]。史维祥等^[4]在苏联学者工作的基础上,出版了讨论机床液压随动系统的著作。刘长年^[5]基于经典控制理论和 ITAE 最佳化设计准则,提出了液压伺服系统的负载轨迹计算、液压伺服系统的优化设计和液压动力机构最佳参数计算的 P-Q 计算尺。李洪仁^[6]提出了液压动力机构的概念,并对考虑负载动力学特性影响的二自由度伺服机构进行了分析。经典液压伺服控制理论的特点是以系统的输入输出关系为切入点,基于系统输出反馈信息,对伺服系统进行分析与综合。目前,基于经典控制理论的电液伺服控制器设计方法已经形成系统化、体系化,该方法恰当结合一些保守性假设^[7],在保证系统稳定性的前提下,进行线性控制器设计,如 PID 控制器及其各类变型、超前滞后校正、速度与加速度并联校正等,已经在电液伺服系统的工程实践中得到了广泛应用。20 世纪六七十年代,以状态空间法、极大值原理与二次型最优控制、卡尔曼滤波、自适应控制和变结构控制等为基础的分析与设计控制系统的现代控制理论得到确立和快速发展,为复杂电液伺服系统的控制问

题带来了新的解决工具。以线性化的电液伺服系统状态空间模型为对象,我国学者阳含和等引入二次型最优性能指标求解最优状态反馈实现了液压伺服系统的最优控制^[8]。王占林^[1]等发展了电液伺服系统的最优控制与优化设计方法,并进一步在余度电液伺服系统的力均衡补偿控制中进行了应用。

然而,随着(国防)工业技术水平的不断发展进步,迫切需要高性能的电液伺服系统作为支撑。当电液伺服系统向高精度、高频响、宽调速范围、强抗扰能力、高可靠性等方向发展时,系统固有的非线性特性、环境影响等以往常被忽略的因素,对性能的影响越来越显著,逐渐成为制约其性能提升的瓶颈因素,这也使得基于线性理论的经典控制方法逐渐不能满足系统的高性能需求,因此必须针对电液伺服系统的非线性等因素,研究更加先进的非线性控制方法。

电液伺服系统普遍存在多种非线性特性,如伺服阀压力流量非线性、微分方程结构非线性、执行器摩擦非线性等^[3,7],这些非线性因素是绝大多数电液伺服系统都面临的共性问题。在以往线性控制策略设计框架下,往往将它们在平衡点附近进行线性化或等效为系统外干扰,进而获得系统开环传递函数,并针对各类干扰及参数摄动,通过配置恰当的反馈控制增益或校正环节使被控对象稳定。然而,上述设计思想存在如下局限性:①伺服阀压力流量非线性是最重要的非线性因素,将它们在平衡点位置进行线性化时高估了系统的开环增益而低估了系统的固有阻尼,尽管这样的处理方法可以确保所设计的线性控制策略的闭环稳定性,但增加了控制器设计的保守性;②往往将参数摄动的取值考虑为对稳定性最不利的情况开展控制器设计,这同样增加了控制器设计的保守性;③系统的某些非线性因素,如间隙、滞环、摩擦等难以被线性化,抗外干扰的鲁棒性设计对它们往往难以奏效,这些非线性特性不但可能会在各个频率段上恶化以线性控制理论设计的控制器的跟踪性能,甚至会引起系统失稳,危及系统安全,非线性摩擦引起的低速极限环振荡就是典型的例子。上述这些问题一直困扰着电液伺服系统的控制器设计人员。由此可见,非线性特性广泛存在于电液伺服系统,对系统性能有着重大影响,更重要的是,很多现象利用线性模型是无法涵盖的,因此必须建立基于非线性的分析和控制器设计方法。

自 20 世纪 90 年代以来,信号处理、高速采集与计算等技术的迅速发展,为基于非线性模型的控制策略的设计与执行奠定了基础。由于非线性模型描述真实系统更加准确,信息更为全面,所以发展基于非线性模型的先进控制方法成为控制理论发展的主要方向之一。针对一般性非线性系统控制中的不确定性因素,瑞典学者 K. J. Astrom、苏联学者 V. I. Utkin 等发展了自适应控制、变结构滑模控制等非线性控制手段和方法。电液位置伺服系统存在严重的不匹配不确定性,在相当长的一段时间内一直困扰着电液伺服系统非线性控制方法的发展, P. V.