

现代电力系统丛书

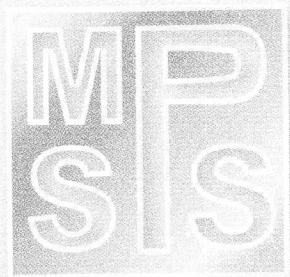


现代鲁棒控制理论与应用 (第2版)

梅生伟 申铁龙 刘康志 著

清华大学出版社

现代电力系统丛书



现代鲁棒控制理论与应用 (第2版)

梅生伟 申铁龙 刘康志 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要介绍现代鲁棒控制理论的基本设计思想及其前沿领域的理论与应用成果,具体内容
包括三个部分。第一部分介绍有关基础知识,包括数学基础、稳定性、有界性和收敛性的基本
定理、具有不确定性的系统的描述方法以及鲁棒稳定与鲁棒性能准则的条件;第二部分介绍线
性及非线性鲁棒控制的理论成果,其中线性鲁棒控制集中介绍以 H_∞ 控制以及 μ 设计等为代
表的经典理论;非线性鲁棒控制则主要介绍鲁棒镇定和鲁棒 L_2 设计,鲁棒自适应控制的基础理论
与前沿成果;第三部分分别介绍上述理论成果在机械系统、电力及电力电子等系统中的设计实例。

本书可以作为自动控制和电气工程专业的研究生教材,也可供从事上述专业的科研人员和
工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

现代鲁棒控制理论与应用/梅生伟,申铁龙,刘康志著. —2版. —北京:清华大学
出版社,2008.8

(现代电力系统丛书)

ISBN 978-7-302-17994-8

I. 现… II. ①梅… ②申… ③刘… III. 鲁棒控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 094512 号

责任编辑:张占奎

责任校对:王淑云

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c_service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:北京铭成印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:24.5 插 页:2 字 数:480千字

版 次:2008年8月第2版

印 次:2008年8月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:42.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部
联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:029586-01

丛书序

当我剪烛为这篇短序时，竟几次因思绪万千未开头便搁笔。出版“现代电力系统丛书”是我的导师高景德院士于1990年开始构思、策划的。作为一位科学家和教育家，高先生十分重视“丛书”对提高我国电力系统学术水平和高层次人才培养方面的重要作用。先生认为：各领域的科技专著应是那个领域最前沿和最高水平科技成果的结晶，是培育一代代科技精英和先锋人物的沃野和圣堂。先生对我说：优秀著作是人类先进思想和成果最重要的载体，正是它们构成了人类文化、科技发展万世不竭的长河。导师的教导音犹在耳。

1997年因这位清华大学老校长烛炬耗尽致使“丛书”出版工作一度停顿。三年后，清华大学出版社重新启动了“丛书”的出版工作，于2002年组成了第二届编委会，继擎着高景德院士亲手点燃的火炬前行。

自1992年以高先生为主编的第一届编委会成立起，至2006年止，我国的电力装机提高了2.7倍，年均以将近20%的速度增长。这在世界各国电力工业发展史上是绝无仅有的。此刻我想到，高先生的在天之灵会问我们这些晚辈：我国的高科技含量的增长是否也与我国的电力总量的增长相匹配？这一问题是要我国电力科技工作者用毕生不懈的努力来回答的。

时光如梭，2002年的第二届编委会又到了换届之时，感谢数位资深编委出色完成了他们的职责。时至2007年5月，第三届编委会在清华大学出版社主持下成立。编委共19名，包括四位中国科学院院士，四位中国工程院院士，其他皆为处于我国电力系统顶尖之列的精英学

者,其中不乏新充实的优秀中青年学者。保证了“丛书”的火炬不仅能得以传承,而且会愈燃愈旺。本次编委会进一步明确“丛书”涵盖的领域为:电力系统建模、分析、控制,以安全稳定经济运行为主;新能源并网发电,如风力发电、太阳能发电等;分布式能源电力系统等内容。

至今,该“丛书”系列已出版专著约十本,预计今明两年将至少再出版六部。应该说已出版的该系列专著已经引领几代青年学者、科技工作者走上了科技大道。近年来,我们在“电力系统灾变防治和经济运行重大科学问题”方面得到国家首期“973”项目资助和支持,并取得了一些突破性进展;电力领域第二期“973”项目“提高超大规模输电系统的运行可靠性研究”从2004年推着前浪前进,成果丰硕。所取得的这些前沿成果将在“丛书”中得到充分的体现。有些成果在世界上未有先例。因此,我们相信中国电力学会引领世界电力科技的发展;相信“丛书”系列还将继续引领和帮助一代代电力界科技工作者开辟康庄之途。

按照高景德院士的教育思想,“丛书”的作用主要“不是去灌满一桶桶的水,而是去点燃一把把的火”。

导师英名长存。感谢清华大学出版社使“丛书”之炬得以传承。

相信中国电力科技能成为世界电力科技引路之光。

卢强

2007年7月于清华园

前言

本书第1版作为自动控制和电气工程专业的研究生的鲁棒控制课程教材,同时也作为上述专业的科研人员和工程技术人员的参考书目,得到了读者们的普遍关注。应该说在介绍现代鲁棒控制理论和工程应用成果这两个方面,第1版更偏重于前者。自面世以来,鲁棒控制理论在电力系统中的应用又有了长足的进展。本书再版的动机,即是总结并介绍作者近5年来在这方面的最新成果,希望本书再版后能够实现两个目标:一是基本理论与工程应用并重,从而使得“现代鲁棒控制理论与应用”名副其实;二是“电力系统应用”部分的介绍系统化或自成体系,即其内容能够覆盖当今电力系统鲁棒控制的各个层面。

本书是作为“现代电力系统丛书”的一册而再版的,为此我们倍感荣幸但又诚惶诚恐,而实现上述目标更是作者必须矢志完成的任务。本书第1版于2003年发行以来,虽然受到广泛关注,但有一个现象引起了我们的思考:第1版的宗旨是为自动控制和电气工程两大领域的读者服务,而从本书数百次他引数据来看,绝大多数引用来自自控领域,而在电气工程领域的引用较少。这使我们意识到本书的确在电气工程方面有待加强,希望并相信本书的再版能够为提高我国电力系统学术水平、培养高层次人才作出贡献。

全书分为三个部分共11章。

第一部分包括第1章至第4章,主要介绍与鲁棒控制相关的基础知识。其中第1章是绪论,阐明现代鲁棒控制研究的背景和所要研究的问题;第2章介绍鲁棒控制的数学基础,主要包括 Lyapunov 方程、Riccati 方程和 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程等控制理论三大基本方

程;第3章主要讨论稳定性基本概念及稳定性判据理论;第4章主要阐述具有不确定性的系统基本描述方法以及鲁棒控制的基本概念。

第二部分为第5章至第9章,主要介绍鲁棒控制的基本理论。其中第5章集中讨论在 H_∞ 性能指标下如何设计反馈控制器,同时还概要介绍 μ 设计方法;第6章介绍非线性鲁棒控制理论的基础知识;第7章阐述基于无源性概念的鲁棒镇定控制器的设计方法;第8章主要讨论满足 L_2 性能准则的反馈控制器的设计方法;第9章讨论不确定性可表示为未知参数线性函数情况下的自适应控制器设计方法。

第三部分为第10章和第11章,主要讨论工程应用实例。其中第10章介绍线性鲁棒控制实例,包括汽车离合器变速控制和矿车速度控制两个机械系统,以及先进静止无功补偿器、可控串补和多机系统小扰动稳定分析等4个电力系统实例;第11章讨论非线性鲁棒控制实例,主要涉及大型同步发电机组励磁系统和大型水轮发电机组调速系统水门开度鲁棒控制器的设计问题,以及有源滤波器无源控制和超导储能设备与励磁的协调控制问题。

本书再版主要增加了下述内容:第10章中增加了两个电力系统线性鲁棒控制实例,分别是电力系统小干扰稳定的 H_∞ 分析和 μ 设计;第11章中增加了三个电力系统非线性鲁棒控制实例,分别为大型水轮发电机组水门开度非线性自适应控制、APF(有源滤波器)无源控制和超导储能设备与励磁非线性协调控制。这些新增的设计实例均是当前电力系统控制领域的热点问题。至此,本书第三部分内容覆盖了现代鲁棒控制理论在电力系统应用的主要场景。这使得本书不仅仅是一本讲授现代鲁棒控制理论的学术专著,也是广大电力控制工程技术人员学习如何将现代鲁棒控制理论应用于实际电力工程的有益的工具书。

感谢卢强院士,正是他的强力推荐和赏识,使得本书有幸以“现代电力系统丛书”中的一册再版。此外,本书再版新增添的研究内容得到国家自然科学基金杰出青年基金项目“电力系统暂态分析”(No.50525721)的资助,借此机会向国家自然科学基金委谨致深深的谢意。同时这些成果还包括研究生莫逆、关天祺、桂小阳和陈菊明的学位论文的研究成果,在此也向他们深表谢意。

清华大学出版社对本书出版给予了大力帮助和支持,谨借此机会表达深切的谢意。

梅生伟

2008年6月于清华园

第1版序

清华大学出版社

1988年8月

实际运行的工程系统都会受到不确定性的影响,机电系统就是这样一类典型的具有不确定性的系统。以线性最优控制和非线性微分几何控制为代表的现代控制理论一般是基于被控对象的精确数学模型来做控制器的设计的。该类理论虽然能够为控制器设计提供完善的解析设计手段,但由于在系统建模时忽视了不确定性,从而使得所设计的控制器难以达到预期的性能指标。为了弥补现代控制理论的这一不足,以 H_∞ 控制、无源化控制及 L_2 增益分析等理论为代表的现代鲁棒控制理论应运而生。它们共同的出发点是在系统建模和控制器设计过程中考虑不确定性对系统的影响,将实际控制对象看成一个系统族,即带有不确定性的系统,其数学模型由标称系统(即精确已知部分)和一个不确定性判别模式所组成。在此基础上,利用解析方法设计控制器,这样有更大的可能性使系统族中的所有被控对象(包括实际控制对象)均能满足期望性能指标。

该书包括鲁棒控制基础、非线性鲁棒控制方法和工程应用三个部分。其中第一部分的叙述不拘于一般鲁棒控制基础理论的专著或教材,它涵盖了系统稳定性、线性鲁棒基础、 H_∞ 控制、 μ 理论和包括Popov判据等在内的鲁棒控制基础知识。结构精练而不失完备,内容丰富而不失简洁,利于引导读者进入鲁棒控制领域。第二部分主要是基于该书作者在不确定建模的非线性鲁棒控制方面的理论研究成果,包括鲁棒自适应镇定、鲁棒性能准则设计和递推设计等。第三部分是作者将理论研究成果应用于实际工程的设计实例,包括采矿车、汽车离合器、发电机励磁和电力电子等机电一体化系统。

该著作不仅是一本良好的鲁棒控制基础读物,而且对了解和研究鲁棒控制前沿课题也有所裨益。同时也为那些有志于运用先进控制理论解决实际工程问题的科研工作者提供了一个范例。因此,本书具有较高的学术价值,对工程实践也有指导意义。

主题突出、系统完整是该书一大特点;使前沿理论与实际工程问题紧密结合为该著作另一鲜明特性。有关鲁棒控制设计的研究虽已有大量成果,但令人稍感遗憾的是目前尚缺乏系统性的专著,本书的出版在一定程度上弥补了这个不足。相信这本书将为有关同行和青年科技工作者提供有益的参考。

清华大学 卢强
2002年8月

第1版前言

在经典控制理论中,被控对象的频率特性是设计控制系统的主要依据,整个系统的性能指标也是通过引入控制器来整定开环系统频率特性的方法而实现的。由于被控对象的频率特性通常是靠实验测试等手段获得的,因此,不可避免地带有不确定性。这就导致经典控制理论设计的控制器在很大程度上必须依靠现场调试,才能获得满意的控制性能。而基于状态方程等数学模型为主要设计依据的现代控制理论,则依靠线性代数、微分几何以及最优化方法等严谨的数学工具,采用数学解析的手段来设计控制系统。同理,通常用机理推导和模型辨识等手段得到的数学模型同样带有不确定性,所以,通过严谨的数学手段设计出来的控制器,在实际运行时,其理论上预期的性能指标仍然不能完全实现,而且基于现代控制理论设计的控制器,其现场调试更为复杂,有时甚至显得无从下手。这就对现代控制理论提出了一个非常重要的课题——鲁棒控制,即在建立数学模型和设计控制器的过程中,如何考虑不确定性的影响,并且基于有关不确定性的不完整信息,设计不依赖于不确定性的控制器,使得实际系统满足期望性能指标。

所谓鲁棒性(robustness),粗略地讲就是指系统的性能对不确定性的“强健”程度。这里所说的不确定性并不意味着一无所知或变幻莫测,而是指对系统的某些部分了解不全面,只知道片断的不完整信息。通俗地说,鲁棒控制问题就是如何将这些已知的不完整信息利用到系统设计中。事实上,早在经典控制理论中,鲁棒性问题就已经引起人们的重视。譬如就稳定性能而言,使系统频率特性具有足够的稳定裕度,就是为了保证稳定性不受到不确定性的破坏。不过直至现代控制理论

发展的后期,对鲁棒性问题的研究还停留在定性分析的程度。但从20世纪80年代初起,在现代控制理论的框架上迅速发展起来的鲁棒控制,则开始在建立数学模型和设计控制器的过程中积极地考虑不确定性,并对其影响给出定量的结论。在20世纪最后20年中诞生并成熟的这种鲁棒控制,其基本思路就是将含有不确定性的被控对象表现为一个系统集,即基于有关不确定性的不完全信息构造表现该系统集的数学模型,再根据该模型设计能够使系统中所有的成员即被控对象满足期望性能指标的控制器。为了区别这种鲁棒控制与早期的有关鲁棒性问题的理论,我们称前者为现代鲁棒控制理论。

本书的主要目的,就是介绍现代鲁棒控制理论的基本设计思想及其前沿领域的理论与应用成果。本书的内容具体可分为三个部分。第1部分包括第1章至第4章,主要介绍与本书内容有关的基础知识,包括数学基础、稳定性、有界性和收敛性的基本定理,具有不确定性的系统的描述方法以及鲁棒稳定与鲁棒性能准则的条件;第2部分包含第5章至第9章,主要介绍线性及非线性鲁棒控制的理论结果,其中线性鲁棒控制集中介绍以 H_∞ 控制以及 μ 设计等为代表的经典理论,非线性鲁棒控制则主要介绍鲁棒镇定和鲁棒 L_2 设计、鲁棒自适应控制的基础理论与前沿成果;第3部分包括第10章和第11章,分别介绍上述理论结果在机械系统、电力及电力电子等系统中的设计实例。

在本书的写作过程中,作者试图突出“精、新、简、实”,并力争做到自我完备(self-contained)。即在选择基础理论时精益求精,同时力求介绍前沿领域,特别是作者自身的最新理论及应用成果。在叙述方法上力求理论与工程实际相结合,而在证明推导过程中则力求简明扼要。涉及有关泛函分析、微分几何等数学知识时,不过分追求纯数学意义上的严谨性,以便于只具有工科数学基础的读者能够理解本书的基本内容。此外,本书在内容安排上尽可能做到内容完备,以便于掌握了经典控制理论、线性系统理论的基本内容以及工科数学基础知识的读者不再需要翻看其他参考书就能够理解本书的内容。

本书的写作动机应该追溯到1997年。当年暑期,本书的作者之一申铁龙博士应中国科学院系统科学研究所王恩平教授(已故)之邀回国短期工作,深深感到有必要用中文写作一本系统地介绍鲁棒控制理论的基础与前沿成果的著作,以推动国内该领域的学术研究活动。他的设想得到了王恩平教授以及系统科学研究所秦化淑教授的热情鼓励和支持,但是由于种种原因未能及时成稿。在后续几年里,作者为清华大学、日本上智大学和千叶大学的研究生讲授现代控制理论的讲稿,以及自身在该领域的更深入的研究成果,构成了本书的雏形。特别是此期间作者承担和参加国家重点基础研究项目(No. G1998020309)、国家自然科学基金重点项目(No. 59837270)、863高技术计划项目(863-98-2)、清华大学电力系统国家重点实验室开放研究课题基金以及中日科学合作项目(NSFC/JSPS)的研究经历,更增强了

作者完成本书的信心。

本书初稿执笔分担如下:第2,3,11章和第4,10章的部分内容由梅生伟博士主笔,第1章和第6章至第9章的内容由申铁龙博士主笔,第5章和第4,10章的部分内容由刘康志博士主笔。全书最后由梅生伟博士统一定稿。

作者由衷地感谢中国科学院院士、清华大学电力系统国家重点实验室主任卢强教授和清华大学自动化系郑大钟教授,他们的热忱推荐使得本书得到清华大学出版社学术出版基金的支持。

本书所介绍的鲁棒控制理论在电力系统中应用的研究得到了卢强教授的指导,而在上述研究项目的执行过程中,作者得到了清华大学孙元章教授、中国科学院系统科学研究所秦化淑教授、程代展教授、日本上智大学田村捷利教授以及东京工业大学美多勉教授的热情支持。上智大学工学部博士研究生焦晓红认真校阅了第1章至第9章,并提出了许多宝贵意见。清华大学电机系研究生薛安成、王智涛和吴佳耘为本书排版付出了辛勤劳动。特别是博士研究生胡伟、陈菊明和刘锋,本书所涉及的在电力系统中的应用成果与他们的刻苦研究是分不开的。

清华大学出版社对本书出版给予了大力帮助和支持,作者谨借此机会表达深切的谢意。

作者 谨识
2002年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 数学基础	8
2.1 向量和矩阵的范数	8
2.2 矩阵奇异值	12
2.3 函数的范数	16
2.4 算子及其范数	20
2.5 Lyapunov 方程	23
2.6 Riccati 方程	28
2.7 正实性	34
2.8 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程	42
第 3 章 稳定性	47
3.1 BIBO 稳定性	47
3.2 小增益定理	50
3.3 Lyapunov 稳定性	52
3.4 Lyapunov 稳定定理	53
3.5 La Salle 不变集原理	59
3.6 终值定理	64
第 4 章 鲁棒控制基础	68
4.1 鲁棒控制基本思想	68

4.2	不确定性的描述	71
4.3	线性不确定系统频域模型	74
4.4	鲁棒稳定性的频域判据	78
4.5	鲁棒稳定性的时域判定条件	84
4.6	绝对稳定性	87
4.7	鲁棒性能准则及其充分条件	90
第5章	线性鲁棒控制系统设计	94
5.1	H_∞ 控制问题	94
5.2	Riccati 方程解法	99
5.3	LMI 解法	103
5.4	定理 5.1 的证明	112
5.5	一般被控对象建模原则	117
5.6	μ 设计与鲁棒性能	121
5.7	鲁棒 H_∞ 性能的充分必要条件	127
5.8	$D-K$ 递推设计法	129
5.9	参数摄动的抽出法	130
第6章	非线性系统鲁棒控制基础	135
6.1	无源性与稳定性	135
6.2	耗散性与 L_2 性能准则	142
6.3	L_2 增益与 HJI 不等式	145
6.4	存储函数的递推设计	149
6.5	坐标变换与反馈等价性	154
6.6	非线性系统的标准型	159
6.7	非线性系统的链式结构	164
第7章	非线性鲁棒镇定	170
7.1	不确定系统的描述	170
7.2	无源化设计基础	172
7.3	鲁棒无源性	179
7.4	鲁棒镇定控制器设计	184
7.5	鲁棒控制器的推广	190

第 8 章 非线性系统鲁棒性能准则设计	194
8.1 L_2 性能准则设计问题	194
8.2 基于 HJI 不等式的设计方法	197
8.3 匹配条件与存储函数	203
8.4 L_2 性能准则问题的递推解法	208
8.5 鲁棒 L_2 性能准则问题	214
第 9 章 具有自适应功能的鲁棒控制器设计	218
9.1 参数不确定性及自适应功能	218
9.2 自适应控制器	221
9.3 调整函数	231
9.4 自适应鲁棒控制器	237
9.5 自适应鲁棒 L_2 性能设计	242
第 10 章 线性鲁棒控制设计实例	247
10.1 汽车离合器变速缓冲装置	247
10.2 矿车速度控制	254
10.3 STATCOM(静止无功补偿器)内部控制	262
10.4 三峡输电系统 TCSC(可控串补) H_∞ 控制	273
10.5 提高多机系统小干扰稳定性的全状态 H_∞ 控制器设计	280
10.6 电力系统小干扰稳定性的 μ 分析方法	288
第 11 章 非线性鲁棒控制设计实例	295
11.1 单机系统 L_2 增益干扰抑制励磁控制器	295
11.2 多机系统分散 L_2 增益干扰抑制控制器	302
11.3 励磁系统非线性自适应控制器	312
11.4 水轮机调速系统非线性自适应控制器	322
11.5 APF(有源滤波器)无源控制器	331
11.6 含超导储能装置的多机系统分散 L_2 增益干扰抑制控制器	339
附录	351
附录 A Minkovski 不等式的证明	351

附录 B	例 5.4 中硬盘 H_∞ 设计用 mfile	352
附录 C	例 5.9 中硬盘 μ 设计用 mfile	355
附录 D	6 机仿真系统数据	357
附录 E	注 11.4 的证明	359
附录 F	定理 11.3 的证明	361
附录 G	定理 11.4 的证明	362
附录 H	电力系统常用变量符号	365

名词索引	366
------------	-----

参考文献	369
------------	-----

第

1

章

绪 论

无论是自然界还是人类社会,不确定性是一个普遍存在的因素。所谓天有不测风云就是这个意思。这种不确定性的存在,使人类的社会活动更富于挑战性,使人生更具有戏剧性色彩。可以想象,如果没有这种不确定性存在,人类的社会生活将会变得多么索然无味。但是,对于工程技术而言,这种不确定性的存在一般是不能允许的。工厂生产的产品要精益求精,要精确地满足设计指标,这种设计指标一般是不允许在含有不确定性因素的意义上实现的。

对于自动控制技术来讲也是这样。理想的情况应该是设计出来的自动控制系统的性能品质准确地实现预期的设计要求,但是这对控制技术来讲几乎是不可能的事情。因为自动控制系统的设计与其他领域的制造技术不一样,有其自身的特点。例如,机械产品的设计人员可以完全按照自己的意愿对所设计的产品进行加工和改造,使其精确满足预期的设计要求。而自动控制系统一般由被控对象和控制器两部分组成。从控制的角度来讲,设计人员能够自由支配的只有控制器,而被控对象中存在的确定性因素是设计人员所无法剔除的。这意味着不确定性是自动控制系统设计人员不可避免地要面对的,这给自动控制技术提出了一个很重要的课题:在被控对象含有某种不确定性的假设前提下,如何设计控制器使系统尽可能接近理想的设计指标。

上述问题对于 20 世纪 60 年代逐渐发展起来的现代控制系统设计理论显得更为突出。尽管这种现代控制理论能够以完美的数学工具,解析地给出精确满足理想品质要求的控制器,但真正应用在工程上时,只有在用于设计的数学模型准确无误地描述了被控对象的动态特性的情况下,这种理想的性能品质要求才能得以实现,否则只是纸上谈兵。