

现代电力系统丛书



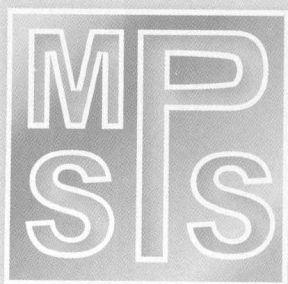
# 电力系统非线性控制

(第2版)

卢 强 梅生伟 孙元章 著

清华大学出版社

现代电力系统丛书



电力系统非线性控制  
(第2版)

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了电力系统非线性控制的理论及应用,在全面总结该领域国内外研究成果的基础上,重点论述了作者从事自然科学交叉重点基金、“973”计划和杰出青年基金等有关项目所取得的最新研究成果。

全书共 13 章,主要内容包括:非线性最优控制理论若干基本概念;单输入单输出与多输入多输出非线性最优控制系统设计原理;非线性鲁棒控制系统设计原理;电力系统建模方法和非线性数学模型;非线性最优/鲁棒控制设计原理在电力系统中的应用,包括大型发电机组非线性最优励磁和非线性鲁棒励磁控制、汽门开度非线性最优控制、大型水轮发电机组水门开度非线性鲁棒控制、交直流联合输电系统中直流输电系统的非线性最优控制、超导储能设备非线性鲁棒控制、静止无功功率补偿系统的非线性最优控制等的数学模型、设计方法、控制策略及实施方案。

本书注重物理概念,理论与实际并重,把现代非线性控制理论与工程实际有机地结合起来,可供从事电力系统自动化工作的科技人员和高等院校有关专业的教师、高年级学生及研究生使用,也可供从事自动控制的工程技术人员参考。

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

电力系统非线性控制 / 卢强,梅生伟,孙元章著. —2 版. —北京:清华大学出版社, 2008. 10

(现代电力系统丛书)

ISBN 978-7-302-17735-7

I. 电… II. ①卢… ②梅… ③孙… III. 电力系统—非线性控制系统 IV. TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 076110 号

责任编辑:张占奎

责任校对:刘玉霞

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 插 页:2 印 张:28.75 字 数:577 千字

版 次:2008 年 9 月第 2 版

印 次:2008 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~1000

定 价:78.00 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:026924-01

## 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路。

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

《电力系统非线性控制》(科学出版社,1993)一书出版迄今已有15年之久,在此期间现代控制理论、方法及其在电力系统中的应用又有了重大发展。同时,随着现代电力系统规模的不断增大和复杂程度的日益增高,电网安全稳定问题亦日益突出,这就使得研究和发展新一代电力系统安全控制理论和技术愈发迫切和重要。本书的再版即缘于该背景。

毋庸置疑,所有电力系统,皆以动态安全和稳定运行为其第一要务,在安全运行的前提下,应使系统处于经济运行状态,最大可能地降耗节能。必须指出的是,由于控制理论和技术的发展滞后于电力系统本身规模和复杂度的增大,十多年来国内外各大电力系统在安全稳定运行方面均存在严重的问题,均发生过灾难性的停电事故,其中尤以2003年美加“8·14”大停电以及2008年春发生在我国的南方冰灾事故最为典型。这些大停电事故一旦发生,造成的损失惨重。因此,提高系统安全运行水平,或者更确切地说,提高电力系统的动态稳定性特别是暂态稳定性,就成为科技工作者面临的极具挑战性的重大课题。

现代科学技术的发展更加坚定了我们这样一个信念:采用先进的控制理论、方法和技术对提高电力系统安全性具有决定性的作用。因此我们认为目前最重要的工作即是在非线性控制理论和电力系统工程实践之间架设一道桥梁,力求以具有一般常微分方程和一般近现代控制理论知识的读者易于接受的方式,将非线性控制领域中与工程应用关系较为密切的主要成果及精华介绍给他们并使之便于应用。从这个基本点出发,本书的一个显著特点是论述深入浅出,竭力避免过分地数学化,避免那些只有数学工作者才感兴趣的严格证明;但同时,又要使读者准确地理解与掌握书中重要的定理、命题、算法、结论与方法,并能正确用于解决实际工程问题,特别是电力系统的工程控制问题。

本书是一部学术专著,书中系统地阐述了电力系统非线性控制理论及应用,在全面总结该领域国内外研究成果的基础上,重点介绍了近年来作者从事国家自然科学基金项目(No. 59837270)、国家重点基础科研计划项目(No. 1998020300)、发改委示范工程项目(发改高技[2004]2080)、国家杰出青年基金项目(No. 50595721)和国家电网公司重点科技项目等有关课题所取得的最新成果。

全书共13章。第1章是导论,阐明非线性系统的特点和特殊问题。第2章介绍基于微分几何的非线性最优控制的基本原理。第3章系统地讨论单输入单输出

非线性最优控制系统的设计理论和方法,包括状态反馈精确线性化理论与算法、零动态设计理论与方法以及输出对于干扰解耦的设计理论与方法。第4章主要讨论多输入多输出非线性系统的设计理论与方法。第5章首先阐明非线性鲁棒控制系统的基本概念(这些基本概念构成了非线性鲁棒控制理论的基础),然后系统地讨论非线性鲁棒控制系统的设计原理,其中包括 Hamilton-Jacobi-Isacs 不等式、基于精确反馈线性化  $H_\infty$  的设计法和 SDM(状态-动态-量测)混合反馈设计方法。第6章是非线性控制原理与电力系统控制问题之间的联接部分,它主要阐述电力系统建模方法及其非线性数学模型。第7章论述非线性最优控制理论在大型发电机组励磁控制中的应用。第8章论述非线性鲁棒励磁控制器设计并给出有关现场实验和在 RTDS 上的大扰动实验研究结果。第9章介绍非线性最优控制理论在大型汽轮发电机组汽门开度控制中的应用。第10章讨论大型水轮发电机组水门开度非线性鲁棒控制问题,从中读者可以了解到 SDM 混合反馈设计方法是如何得到有效应用的。第11章论述交直流联合输电系统中直流系统的非线性最优控制和对交流系统的紧急支援问题。第12章具有前瞻性地论述超导储能设备的非线性鲁棒控制问题。第13章讨论静止无功补偿器系统的非线性最优控制问题。

与第1版相比,本版主要增加了下述内容:一是系统阐述了非线性鲁棒控制系统设计原理及其在大型发电机组励磁系统、大型水轮发电机组调速系统和超导储能设备控制系统中的应用。这些成果集理论研究、算法设计和硬件装置研制于一体,具有系统的自主创新性。另外,与第1版中仅有计算机仿真不同,上述各类非线性鲁棒控制律的验证均增加了动模实验、RTDS 实验、现场试验的内容,显著增强了理论成果的工程实用性。二是增加了基于微分几何的非线性控制器的最优性讨论,给出了严格的数学证明,同时分别介绍了零动态第三和第四种设计方法并以此为基础论述了非最小相位系统的非线性最优控制问题。应该说,最使作者看重的是,在第2版中添加了我国自主研发的世界上第一台非线性鲁棒励磁镇定装置在白山水电厂 300 MW 机组上投入运行的现场试验内容。该励磁控制器在东北电网的成功投入运行成为非线性理论转化为现实生产力的里程碑。

现代电力系统的复杂性可归结为三个方面:强非线性、高耦合性和不可避免的不确定性的影响,后者主要指未建模动态和外界干扰等。电力系统非线性控制学科即为处理这样一类复杂系统的优化控制问题应运而生的。它主要包含两个理论体系:一是基于微分几何的非线性最优控制理论,其精髓是利用状态反馈精确线性化以克服以往近似线性化方法所带来的本质上的缺憾;二是基于微分对策的非线性鲁棒控制理论,其精髓是利用对策论并结合微分几何方法,设计干扰抑制控制器以克服目前构造鲁棒非线性控制器必须求解 HJI 不等式的困难,而 HJI 不等式的求解目前在数学上尚无一般方法。本书即为以上理论的全面总结。

值本书搁笔之际,我不禁想起了我的导师高景德院士。正是先生首次倡导电力系统非线性控制研究并鼓励和支持我在该领域进行不断的努力和探索,同时也

造就了本书(包括第1版)。特别可以告慰先生在天之灵的是,本书是作为高先生生前策划与构思的“现代电力系统丛书”中的一册再版的。希望并相信本书的出版能够实现先生对出版“丛书”的初衷——提高我国电力系统学术水平,培养高层次人才。

在项目研究及本书再版的过程中,作者得到了美国华盛顿大学(St. Louis) T. J. Tarn 教授、东北电网有限公司黄其励院士和中国科学院系统科学所秦化淑教授、程代展教授的热忱帮助和支持。清华大学电机系博士研究生刘锋、郑少明、桂小阳等的博士论文的成果也融入本书之中,其中还有刘锋博士所获的2007年全国百篇优秀博士论文的贡献。在此谨向他们致以深切的谢意!

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。

卢 强

2008年4月于清华园



## 第 1 版前言

《输电系统最优控制》一书出版至今已经 10 年了,在这期间控制理论与技术及其在电力系统的应用又有了重大发展,上述著作曾建造了从线性最优控制原理到电力系统控制工程之间的一条通道。如果说当这本书刚问世时,它还只是“纸上谈兵”的话,那么差不多在它与学生见面 10 年之后,在碧口水电厂单机容量为 10 万千瓦、刘家峡水电厂单机容量为 22.5 万千瓦以及白山水电厂单机容量为 30 万千瓦的大型发电机上,我国自行研制的线性最优励磁控制器已经成功投入运行。这在世界上还是首次。这种励磁控制器与其他类型的励磁控制器相比,有以下两方面优点:一是对改善电力系统小干扰稳定性与动态品质的作用更为显著;二是对系统参数与运行方式在一定范围内的变化有较好适应能力。这就是它问世不久便能在我国一些大型远距离输电的电站得以推广应用的重要原因之一。当然,这种控制器制造厂家工艺水平和制造质量的优良也是重要原因。

我们知道,实际上,包括电力系统在内的诸多控制系统都是非线性的,如机器人控制系统、自动驾驶飞机控制系统、化学反应器控制系统。用线性控制理论和方法去设计非线性的控制器,首先需要将系统的数学模型在选定的某一平衡点(平衡状态)处加以近似线性化。实质上,就是要在数学模型中,以非线性解析函数在该点的全微分代替其增量。这种近似的方法,从原理上决定了这样一个基本事实,即当系统实际状态偏离设计中选定的平衡状态甚远时,如果说控制器不是起相反作用的话(不能排除这种可能性),其控制的效果也会大大削弱。如何对付这个挑战?对于慢过程的控制系统,实时地改变多变量反馈增益的方法来“自动寻优”是可行的,但对于像电力系统这类系统来说,在其状态量较大幅度地发生变化的情况下就难以实现,因为其振荡周期是以秒来计算的,那么最好的出路何在?

近十年来,非线性控制理论有了突破性的进展,微分几何方法在非线性和控制系统的控制理论中得到了广泛的应用,从而形成了控制理论中的一个崭新的分支,正如罗马大学教授伊西多锐(A. Isdori)在 1985 年所提出的,20 世纪 50 年代的拉氏变换、复变函数理论应用于线性单输入单输出系统,以及 20 世纪 60 年代状态空间描述方法和线性代数应用于多变量线性系统那样,用微分几何方法研究非线性控制系统取得了并将进一步取得突破和成功。今天,非线性系统微分几何方法研究非线性系统不仅在理论上已经初步形成了自己的体系,而且在工程技术中也得到了应用。例如,美国一些科学家将它用于机械手控制系统和直升机与飞行器自动

控制系统的设计中,我国学者将它用于化学反应器控制系统,本书作者则将它首次应用于电力系统动态安全性控制中。

本书的主要目的是要在近代非线性控制理论与工程控制之间架设一道桥梁。力求用具有一般常微分方程知识和一般近代控制理论知识的大学生、研究生、教师、工程技术人员和科学技术工作者易于接受的方式,把这个领域中与工程应用关系较密切的主要成果以及精华介绍给他们,使之便于应用。从这个基本点出发,本书在论述中力求深入浅出,竭力避免过分的“数学化”,避免那些也许只对专门的数学工作者才感兴趣的“严格证明”;但同时,又要使读者准确地理解与掌握那些重要的定理、命题、算法、结论与方法,并能正确地用于解决实际工程问题,特别是电力系统的工程控制问题。

根据上述给本书规定的基本任务,决定了它的基本结构由四个组成部分。

第一部分,从与线性系统的比较上,阐明非线性系统的特点与特殊问题,并着重阐明非线性控制理论中的一些基本概念,这些概念是本书后续内容的基础。这部分内容包括在第1章和第2章中。

第二部分,系统地讨论单输入和多输入多输出非线性系统的设计原理。其中包括状态反馈精确化原理与算法,零动态设计原理与方法以及输入对于干扰解耦的设计原理与方法。这些是第3章与第4章的主要内容。

第三部分,是非线性控制原理与电力系统控制问题之间的连接部。它主要阐述电力系统建模方法和非线性数学模型,这部分内容主要在第5章加以表述。

最后一部分,论述非线性控制理论与设计方法在电力系统中的应用,其中包括大型发电机组非线性励磁控制、调节汽门控制、交直流联合输电系统的非线性励磁控制、静止无功功率补偿系统的非线性控制等的研究成果。将给出它们的数学模型、设计方法、控制策略、控制效果以及实现方案的讨论。这部分内容将在第6章至第9章中论述。实际上,从第6章到第9章每章都是一篇关于电力系统非线性控制问题的专题研究总结。

对于专业领域和电力系统比较密切的读者,除了本书前面几章所阐述的非线性控制原理以外,最后一部分内容,想来会引起他们的兴趣并给予特殊关注;对于与电力系统领域较远的读者,可选择最后一部分的某些章节,作为非线性控制理论应用实例加以研究。

本书所总结和概括的研究成果,主要是在国家自然科学基金基本材料与工程科学部的支持下取得的,没有这项基金的支持,要想顺利开展这一较大的基础性和应用基础性课题的研究,并在较短时间取得这样系统性的成果,几乎是不可能的。本书的一名青年作者的研究工作,也得到了国家自然科学基金委员会科学基金的资助。书中所述的交直流联合输电系统的研究成果,主要是在这项青年基金支持下取得的。上述事实说明,国家自然科学基金对于推动我国自然科学中的基础研究和应用基础研究起到了重要的作用。

本书所论述的科研项目的研究工作是在高景德教授主持下完成的。高景德教授指导了本书的编写,审阅了全部书稿,并提出了宝贵的意见。在课题研究与本书的撰写过程中,还曾得到了美国华盛顿大学(圣·路易斯)谈自忠(T. J. Tarn)教授、中国科学院系统科学研究所程代展教授和秦化淑教授的热情帮助;清华大学电机系为本书的撰写创造了良好的条件,中国科学院科学出版基金资助了本书的出版,所有这些都使作者感激至深。

我们期待着与读者之间的学术交流,并诚恳地欢迎来自他们的批评性的评论和意见,还函请寄:北京 100084 清华大学电机系。

作者

1992年9月于清华园

# 目 录

第 1 章 导论	1
1.1 引言	1
1.2 控制理论发展概述	3
1.3 线性控制系统与非线性控制系统	11
1.4 非线性系统近似线性化设计方法及其局限性	14
1.5 非线性系统稳定与不稳定平衡点	17
1.6 非线性系统的混沌现象与电力系统非线性振荡	19
第 2 章 非线性最优控制若干基本概念	24
2.1 引言	24
2.2 非线性最优控制问题的数学描述	25
2.3 非线性系统的坐标变换	26
2.3.1 坐标变换的一般概念	26
2.3.2 线性系统坐标变换	27
2.3.3 非线性坐标变换与微分同胚	28
2.3.4 映射	29
2.3.5 局部微分同胚	29
2.3.6 非线性控制系统的坐标变换	30
2.4 仿射非线性系统	31
2.5 向量场	33
2.6 向量场的导出映射	35
2.7 Lie 导数与 Lie 括号	37
2.7.1 Lie 导数	37
2.7.2 Lie 括号	39
2.8 向量场集合的对合性	43
2.9 控制系统的关系度	45
2.10 非线性系统的线性化标准型	48
2.11 小结	53

<b>第3章 单输入单输出非线性最优控制系统设计原理</b> .....	56
3.1 引言 .....	56
3.2 状态反馈精确线性化设计原理 .....	57
3.2.1 关系度 $r$ 等于系统阶数 $n$ 的线性化设计原理 .....	57
3.2.2 非线性控制律最优性讨论 .....	62
3.2.3 一般情况下的线性化设计原理 .....	67
3.2.4 精确线性化的条件 .....	69
3.2.5 精确线性化的算法 .....	76
3.3 零动态设计原理与方法 .....	86
3.3.1 零动态第一种设计方法 .....	86
3.3.2 零动态第二种设计方法 .....	91
3.3.3 零动态第三种设计方法 .....	94
3.3.4 零动态第四种设计方法 .....	100
3.3.5 若干问题讨论 .....	106
3.4 线性系统零动态设计方法 .....	108
3.5 输出对干扰解耦的控制系统设计原理 .....	113
<b>第4章 多输入多输出非线性最优控制系统设计原理</b> .....	123
4.1 引言 .....	123
4.2 关系度与线性化标准型 .....	123
4.2.1 系统的关系度 .....	123
4.2.2 线性化标准型 .....	126
4.3 零动态设计原理 .....	138
4.4 状态反馈精确线性化设计原理 .....	148
4.4.1 状态反馈精确线性化的条件 .....	148
4.4.2 状态反馈精确线性化的算法 .....	151
4.4.3 非线性控制律最优性讨论 .....	164
<b>第5章 非线性鲁棒控制设计原理</b> .....	168
5.1 引言 .....	168
5.2 非线性鲁棒控制基本概念 .....	169
5.2.1 非线性鲁棒控制问题的数学描述 .....	169
5.2.2 信号及其 $L_2$ 范数 .....	170
5.2.3 系统及其 $L_2$ 增益 .....	172
5.2.4 耗散系统与 Hamilton-Jacobi 不等式 .....	175
5.2.5 二人零和微分对策 .....	179
5.3 Hamilton-Jacobi-Issacs 不等式 .....	180

5.3.1	$L_2$ 增益意义下的非线性鲁棒控制问题	180
5.3.2	Hamilton-Jacobi-Isacs 不等式的推导	182
5.3.3	线性鲁棒控制系统的 HJI 不等式——Riccati 不等式	187
5.4	反馈线性化 $H_\infty$ 设计法	189
5.5	SDM 混合反馈线性化 $H_\infty$ 方法	195
5.5.1	SD 反馈线性化 $H_\infty$ 方法	195
5.5.2	SM 反馈线性化 $H_\infty$ 方法	203
5.5.3	SDM 反馈线性化 $H_\infty$ 方法与输出设计	210
<b>第 6 章</b>	<b>电力系统基本数学描述</b>	<b>212</b>
6.1	引言	212
6.2	同步发电机转子运动方程	213
6.3	同步发电机输出功率方程	215
6.4	多机系统中同步发电机实用的输出功率方程	222
6.4.1	单机无穷大系统中的发电机输出功率方程	222
6.4.2	多机系统中同步发电机实用化的输出功率方程	224
6.5	同步发电机励磁绕组电磁动态方程	228
6.6	汽轮发电机组汽门开度控制系统数学描述	228
6.7	水轮发电机组水门开度控制系统数学描述	232
6.7.1	水力系统动态方程	233
6.7.2	水轮机子系统动态方程	236
6.7.3	水轮机调速系统模型	237
6.8	直流输电系统数学描述	240
6.8.1	直流输电线路的动态方程	240
6.8.2	直流调节系统的数学模型	244
6.9	超导储能系统数学描述	246
<b>第 7 章</b>	<b>大型发电机组非线性最优励磁控制</b>	<b>249</b>
7.1	引言	249
7.2	励磁控制方式的发展	250
7.3	单机系统中发电机非线性最优励磁控制系统的设计	257
7.3.1	精确线性化设计方法	257
7.3.2	关于非线性最优励磁控制规律的实现问题的讨论	265
7.3.3	非线性最优励磁控制的效益	266
7.4	多机系统中发电机非线性最优励磁控制系统的设计	270

7.4.1	多机电力系统的动力学方程	271
7.4.2	励磁控制系统精确线性化的设计方法	272
7.4.3	实用化的非线性最优励磁控制规律	282
7.4.4	多机系统发电机非线性最优励磁控制规律的讨论	283
7.4.5	多机电力系统非线性最优励磁控制器的控制效果	284
<b>第8章</b>	<b>大型发电机组非线性鲁棒励磁控制</b>	<b>291</b>
8.1	引言	291
8.2	多机励磁系统建模	291
8.3	非线性鲁棒励磁控制器的设计	293
8.4	非线性鲁棒励磁控制器参数整定方法	296
8.5	非线性鲁棒励磁控制器现场试验	297
8.5.1	额定负载2%机端电压阶跃试验	298
8.5.2	单机稳定极限试验	299
8.5.3	双机稳定极限试验	299
8.5.4	切机试验	301
8.6	非线性鲁棒励磁控制器在RTDS上的实验	301
8.6.1	RTDS实验系统	302
8.6.2	0.1 Hz低频振荡抑制实验	303
8.6.3	静稳极限功率传输实验	303
8.6.4	大扰动实验	304
8.6.5	非线性鲁棒励磁控制器鲁棒性能测试	306
<b>第9章</b>	<b>大型汽轮发电机组汽门开度非线性最优控制</b>	<b>308</b>
9.1	引言	308
9.2	单机无穷大系统中汽轮发电机组汽门非线性最优控制	309
9.2.1	数学模型	309
9.2.2	精确线性化设计方法	311
9.2.3	单机系统汽门非线性最优控制的动态模拟实验结果	316
9.2.4	单机系统主调节汽门非线性最优控制的数字仿真结果	319
9.3	多机电力系统中发电机组汽门非线性最优控制	320
9.3.1	数学模型	320
9.3.2	精确线性化设计方法	322
9.3.3	多机电力系统汽门非线性最优控制措施的效果	331
9.4	若干问题的讨论	332

<b>第 10 章 大型水轮发电机组水门开度非线性鲁棒控制</b> .....	335
10.1 引言 .....	335
10.2 理想水轮机建模及水门开度非线性鲁棒控制 .....	335
10.2.1 数学模型 .....	335
10.2.2 控制器设计 .....	337
10.2.3 单机系统水轮机水门非线性鲁棒控制的效果 .....	342
10.3 多机系统中水轮发电机组水门非线性鲁棒控制 .....	343
10.3.1 数学模型 .....	343
10.3.2 控制器设计 .....	344
10.3.3 多机电力系统水门非线性鲁棒控制措施的效果 .....	347
10.4 数字式水门开度非线性鲁棒控制器 .....	355
10.4.1 非线性鲁棒控制器软件结构 .....	355
10.4.2 非线性鲁棒控制器硬件设计 .....	357
10.5 动态模拟实验 .....	358
10.5.1 实验系统 .....	358
10.5.2 实验步骤 .....	359
10.5.3 动模实验结果及分析 .....	359
10.6 现场模拟试验及结果 .....	361
10.6.1 试验系统与方案 .....	361
10.6.2 试验效果 .....	362
10.7 若干问题的讨论 .....	366
<b>第 11 章 交直流联合输电系统中直流系统非线性最优控制</b> .....	367
11.1 引言 .....	367
11.2 换流站运行特性与常规控制方式 .....	367
11.2.1 整流器电压-电流特性 .....	367
11.2.2 逆变器的电压-电流特性 .....	368
11.2.3 整流器定直流电流、逆变器定关断越前角的常规 控制方式 .....	369
11.2.4 整流器定直流电流、逆变器定直流电压的常规 控制方式 .....	370
11.2.5 直流输电系统的功率调制 .....	371
11.3 换流站的非线性最优控制 .....	372
11.3.1 定电流、定关断越前角非线性最优控制器的设计 .....	372



11.3.2	定电流、定电压非线性最优控制器的设计 .....	381
11.4	直流系统非线性最优控制与互联电力系统的稳定性 .....	385
11.4.1	交直流系统非线性最优控制器设计的数学模型 .....	385
11.4.2	非线性最优直流稳定控制器设计 .....	387
11.4.3	直流系统非线性稳定控制器的控制效果 .....	389
<b>第 12 章</b>	<b>超导储能设备非线性鲁棒控制 .....</b>	<b>391</b>
12.1	引言 .....	391
12.2	装有 SMES 的单机无穷大系统的数学模型 .....	391
12.3	非线性鲁棒控制器设计 .....	393
12.4	单机无穷大系统中 SMES 非线性鲁棒控制计算机仿真效果 .....	396
12.5	SMES 非线性鲁棒控制器动态模拟实验 .....	398
12.6	若干问题的讨论 .....	403
<b>第 13 章</b>	<b>静止无功补偿器系统的非线性最优控制 .....</b>	<b>404</b>
13.1	引言 .....	404
13.2	无功补偿的基本概念 .....	404
13.2.1	输电系统中的无功潮流 .....	404
13.2.2	无功功率补偿的两种基本方式 .....	406
13.2.3	线路中间无功补偿对传输功率极限的影响 .....	407
13.3	静止无功功率补偿装置的结构 .....	411
13.3.1	可控硅控制电抗器(TCR 型) .....	411
13.3.2	可控硅开关电容器(TSC 型) .....	417
13.4	静止无功补偿器(SVS)的常规控制方式 .....	420
13.5	静止无功补偿器的非线性最优控制器设计 .....	422
13.5.1	SVS 控制系统模型 .....	422
13.5.2	精确线性化设计方法 .....	423
13.5.3	静止无功补偿器非线性最优控制的效益 .....	426
<b>附录</b>	.....	<b>429</b>
A	8 机 36 节点参数 .....	429
B	非线性鲁棒控制调速器的安装地点及对应参数 .....	430
C	动模实验系统参数 .....	430
<b>参考文献</b>	.....	<b>431</b>