

现代电力系统丛书



电力系统暂态分析中的 半张量积方法

梅生伟 刘锋 薛安成 著

清华大学出版社

近期出版书目

- | | |
|-------------------|-----|
| 电力系统非线性控制 (第2版) | 卢 强 |
| 高等电力网络分析 (第2版) | 张伯明 |
| 电力系统非线性鲁棒控制 | 孙元章 |
| 现代电力系统保护 | 董新洲 |
| 大型电力系统可靠性理论与应用 | 丁 明 |
| 最优化方法及其在电力系统中的应用 | 曹一家 |
| 智能电网与智能电力系统导论 | 卢 强 |
| 电力系统并行计算与数字仿真 | 周孝信 |
| 大容量电力电子变换系统电磁暂态过程 | 赵争鸣 |
| 电力系统暂态分析中的半张量积方法 | 梅生伟 |
| 电力系统自组织临界特性与大电网安全 | 梅生伟 |

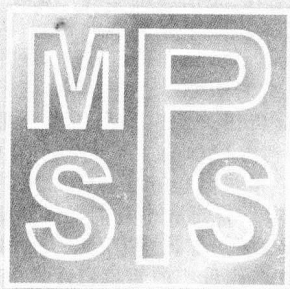


ISBN 978-7-302-22982-7



定价：60.00元

现代电力系统丛书



电力系统暂态分析中的 半张量积方法

梅生伟 刘锋 薛安成 著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍矩阵半张量积理论及其在电力系统暂态分析中的应用成果,内容分为三部分。第一部分(第1~5章)以半张量积方法为叙述主线。其中第1章介绍半张量积方法的研究背景;第2章介绍半张量积方法的基础理论,重点阐述应用较广的左半张量积;第3章讨论多元多项式及其微分的半张量积表示与计算,它是应用半张量积分析和计算非线性系统的基础;第4、5两章是半张量积方法在一般非线性系统稳定性分析和稳定域计算中的应用,从中显示半张量积方法在处理若干非线性稳定性分析问题时所具有的不可替代的优势。作为承接和过渡,第二部分(第6章)介绍了后续章节涉及的电力系统暂态分析相关的模型和基本分析方法,该部分内容力求简明扼要,读者可以作为参考,亦可同时参阅其他专门的电力系统稳定分析文献和著作,以作更深入的了解和学习。第三部分(第7~12章)讨论半张量积方法在电力系统暂态稳定分析中的应用。其中第7~9章分别讨论暂态功角稳定、暂态电压稳定和中长期电压稳定问题;第10章提出一类研究一般非线性系统的多项式近似系统分析方法,并将其应用于电力系统暂稳分析;第11章讨论动态安全域的边界计算问题;第12章讨论基于半张量积的暂稳裕度指标在暂态稳定约束下的ATC、经济调度以及预防控制等方面的应用。此外,附录A给出了一种基于半张量积方法的具有三阶收敛性的潮流求解方法,它亦可作为求解系统平衡点的算法,从而用于电力系统暂态稳定性的分析。

本书可以作为电气工程和系统科学专业的研究生教材,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

电力系统暂态分析中的半张量积方法/梅生伟,刘锋,薛安成著. —北京:清华大学出版社,2010.11

(现代电力系统丛书)

ISBN 978-7-302-22982-7

I. ①电… II. ①梅… ②刘… ③薛… III. ①电力系统暂态分析—半张量积
IV. ①TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第105456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

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

社总机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62772015, 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:三河市春园印刷有限公司

经销:全国新华书店

开本:175×245 印张:20.75 插页:1 字数:412千字

版次:2010年11月第1版

印次:2010年11月第1次印刷

印数:1~2000

定 价:60.00元

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

序

电力工业是国民经济的基础。电力系统的安全运行是电力部门的一项最基本的任务。采用先进的调度自动化系统是保障电力系统安全运行的一种重要手段,其主要任务可以概括为以下三个方面:一是控制整个电力系统的运行方式,使正常状态下运行的电力系统,能够满足安全、经济、优质地向用户供电的要求;二是对可能发生的大扰动事故,制定控制预案或在线控制策略,以有效降低事故造成的危害;三是在故障状态下尽可能降低停电损失,并迅速恢复正常供电。上述三项任务的完成,尤其是后者的实现,迫切需要研究和发 展电力系统安全性的新一代分析技术和手段,即面向调度通信中心的电力系统暂态稳定分析新理论和新技术,以便快捷地分析系统遭受大干扰后的动态行为。自 20 世纪 60 年代以来,世界主要电力系统均发生过稳定破坏的灾难性事故,其中以美加 2003 年“8·14”大停电事故最为突出。这些灾难性事故的发生使电力系统暂态稳定性分析成为世界各国研究的热点。

在电力系统暂态稳定分析领域,目前具有代表性的方法主要有两类:一是基于状态空间的时域仿真法,二是直接法。前者又称数值积分法或间接法,其基本思想是利用数值积分方法获取描述电力系统动态特性微分方程组的时间解,并利用发电机组之间的转子角度差来判断系统的稳定性。这种方法直观精确,易于处理各种复杂元件模型和复杂故障的影响,已为众多商业性电力系统分析软件所采用,但其计算量大,特别对大规模电力系统,在实时计算方面有一定的困难。后者是一种定量分析和计算的方法,其核心思想是构造一个类似于“能量”的暂态能量函数,即 Lyapunov 函数,可以在不求解微分方程组的情况下,通过检查该函数沿系统积分轨迹随时间变化的性质来判断系统的暂态稳定性。然而,对一般电力系统而言,其暂态能量函数的构造至今尚无解析方法可以遵循。因此,目前该方法的应用仅限于简单电力系统。电力系统暂态稳定问题实质上就是非线性系统的稳定性问题,由于非线性系统稳定性理论和计算的诸多问题还有待解决,故迄今为止,还没有建立起通用的电力系统暂态稳定分析直接法。

中国科学院程代展教授创立了半张量积新理论,同时在一般系统稳定性理论方面取得了突破性进展;梅生伟教授及该书另外两位青年作者在此基础上,成功地将半张量积理论应用于电力系统暂态稳定分析,开辟了电力系统暂态稳定分析的一条新途径。程代展教授与卢强院士、梅生伟教授多年来一直在电力系统非线性控制领域精诚合作,该书主要内容是继他们在 20 世纪 90 年代创立非线性电力系统几何结构

理论之后取得的又一个里程碑式的工作成果,主要涵盖三个方面的内容:一是扼要介绍矩阵半张量积的基本概念和基本理论,包括左半张量积基础、多元多项式及其微分的半张量积表示形式等;二是系统地阐述了基于半张量积的电力系统稳定域边界近似描述方法;三是紧密结合工程实际,深入讨论了半张量积方法在电力系统暂态功角稳定与动态电压稳定中的应用问题,包括基于半张量积的功角暂态稳定裕度指标及其分解计算方法、电力系统故障临界切除时间估计和动态安全评估等一系列创新性成果。该书是国内外半张量积理论工程应用的首部学术专著,为电力系统暂态稳定性分析方法开辟了一个新的研究方向。作者为该书的撰写倾注了大量的心血,深入浅出地阐述了数学上深奥复杂的半张量积理论,使具有一般矩阵代数和常微分方程知识的研究生、教师和工程技术人员也能方便地阅读和理解。

相信该书的出版对构建面向调度的先进电力自动化系统,提高我国超大规模互联电网的运行安全可靠,促进我国电力系统学科学术水平的提高有重要的理论意义和应用价值。

中国科学院院士 华中科技大学教授 程时杰

2010年7月30日

前 言

设 $X \in M_{m \times n}$ (即 X 为 $m \times n$ 矩阵), $Y_{p \times q}$ (即 Y 为 $p \times q$ 矩阵), 熟知, 普通的矩阵乘法 MN (也称矩阵的标准积) 只有当 $n=p$ 时才有定义。矩阵的半张量积是矩阵标准积的一种推广, 它对一般的 n 和 p 亦可定义两矩阵的乘积, 而当 $n=p$ 时, 它与标准积一致。

要使这种推广具有生命力, 以下三个条件应当是必不可少的: ① 运算本身应十分简洁。如果运算规则复杂, 它就难以得到推广和广泛应用。② 推广后的运算应保持原有矩阵标准积的基本性质。如果原矩阵乘法的一般性质都被破坏了, 或者被搞得面目全非, 那么, 从理论上说, 它不能称为一个真正意义上的推广。③ 它应当有广泛的应用, 而这些应用是现有理论难以解决的, 否则, 它只能是一种数学游戏。

由我国著名控制专家、中国科学院程代展教授独创的矩阵的半张量积方法完全满足以上三个条件, 因此, 它正日益得到同行的认可, 并在不同的领域得到越来越多的应用。

本书的目的是向读者介绍矩阵的半张量积 (以下简称半张量积) 及其在电力系统的应用。回顾历史, 不能不感叹我的幸运, 我有幸先后成为程代展教授和卢强院士的学生, 而他们正是在控制科学和电力系统领域具有重要影响的两位大家。近三十年来, 也正是他们卓有成效的合作, 先后在电力系统分析与控制领域铸就了两个里程碑式的工作: 一是电力系统非线性控制理论, 二是电力系统半张量积方法, 因此可以说半张量积方法和电力系统有不解之缘。先从非线性系统的几何理论谈起。用微分几何方法研究非线性控制系统起源于 20 世纪 70 年代, 它使非线性系统的控制理论得到突破性的进展。20 世纪 80 年代初, 卢强院士到美国华盛顿大学作访问教授, 当时程代展教授在该校攻读博士学位。那个时候的华盛顿大学系统科学与数学 (SSM) 系是美国非线性系统几何理论及其应用的研究中心之一。著名的意大利非线性控制专家 A. Isidori 教授在那里讲授非线性系统几何理论课。他的名著 *Nonlinear Control Systems*^[1] 就是以他当时的讲稿为基础补充完成的。其时, 几何专家 W. M. Boothby 教授也在华盛顿大学讲授微分几何, 用的讲义就是他的专著 *An Introduction to Differentiable Manifolds and Riemannian Geometry*。Boothby 教授自己也研究几何控制问题。除这两位学者以外, 系里教授中从事非线性控制系统几何理论研究的有程代展教授的导师 T. J. Tarn, 还有 D. L. Elliott, M. A. Shayman 等。值得一提的是, M. W. Spong, R. Su, R. Marino, W. P. Dayawansa, Y. Chen, X. Yun

等后来在非线性几何理论及应用做出突出贡献的专家,都是 SSM 系的学生。特别是 20 世纪 80 年代 SSM 的系主任 J. G. Zaborszky 院士,他是电力系统专家。他带领学生 G. Huang 等将微分几何方法用于电力系统控制,取得了一批出色的结果^[2]。卢强院士也是与 Zaborszky 合作,从那时开始他的电力系统微分几何控制理论研究的,他与程代展教授当时就有过许多交流和讨论。程代展教授回国后,在卢强院士的支持和鼓励下,于 1988 年出版了《非线性系统的几何理论》^[3]。

电力系统是典型的非线性系统,卢强院士是国际上最早将非线性系统的几何理论应用于电力系统控制的专家之一,也是目前国内外学术界公认的电力系统非线性控制学的集大成者。20 世纪 90 年代中期,他与其指导的研究团队系统地创立了一套电力系统非线性(微分几何)控制理论^[4],并成功应用于实际电网,取得巨大的社会效益。虽然微分几何方法在理论分析方面十分有力,但在计算上十分复杂,不易于计算机实现,这为实际应用带来了许多困难。为了进行电力系统中大量的非线性计算,特别是微分几何理论中所大量使用的 Lie 导数运算,卢强院士与程代展教授等经多次讨论,意识到有可能通过对矩阵运算的推广使之适用于多线性映射计算,而非线性光滑函数总可以用多线性映射任意逼近。因此,推广矩阵运算,使之适用于电力系统微分几何控制理论中所需要的非线性计算成为一个理论上富有挑战性,又有迫切工程需求的课题。在国家自然科学基金委员会电工学科与自动化学科的共同支持下,他们申请交叉重点项目“电力系统非线性鲁棒稳定控制代数化几何方法及工程应用”并获立项支持,而电力系统分析与控制中的半张量积方法正是该项目的研究重点之一。该研究在随后卢强院士为首席科学家的“973”项目“我国电力大系统灾变防治和经济运行的重大科学问题的研究”(No. G1998020300)中得以深入开展,并得到突破性的进展。

作为半张量积理论的开拓者和奠基者,除电力系统领域外,程代展教授还进一步将半张量积方法应用于逻辑推理、微分几何计算及 Lie 代数结构分析、一般非线性系统非正则线性化及对称性研究等问题。程教授是我的老师,20 世纪 90 年代我在中国科学院攻读博士学位时即受益于他的教诲。近年来,有幸继续在他的指导下工作。程教授思维敏捷、视野开阔,不仅是一位享誉海内外的控制学专家,更让我钦佩不已的是他卓越的数学才华,可以说这是他硕果累累的主要源泉。我本人也是数学出身,二十多年前即系统地学习过微分几何,不想多年以后从事科学研究工作的一个重点竟是非线性系统几何理论及电力系统应用。多年浸淫其间,总以为自己也算是一个微分几何“专家”。九年前的一个学术讨论会“击碎”了我的良好感觉。当时程教授做“非线性系统的代数化几何方法”学术报告。他以向量场入手,以一架飞机的东西南北闭环飞行轨迹为例完整清晰地阐述了向量场乃至微分流形的几何意义,进而解释李导数、李括号,直至李代数、李群。他的演讲如行云流水、高屋建瓴,既无一般数学演讲的晦涩艰深,亦无常见科普宣传的泛泛空谈。听了他的报告,我自以为对微分几何乃至几何与拓扑学的理解有了一个质的飞跃。应该说,只有高深数学造诣并对实

际工程或者物理问题有深刻洞察力的大学者才能如此作为。程教授正是这样一类学者,而本书也正是他所创立的半张量积理论在电力系统应用成果的提炼和集成。不仅如此,作为理论基础的本书前4章直接出自他的研究成果,行文更得益于他的点化,读者可从中欣赏程教授横溢之才华。

本书各章的主要内容如下:第1章是绪论,扼要地介绍半张量积理论和电力系统暂态稳定分析问题。第2章讨论半张量积基础。由于本书主要用到的是左半张量积,故该章着重介绍左半张量积。第3章讨论多元多项式及其微分的半张量积表示形式,它是半张量积处理非线性问题的基础。第4章应用半张量积方法分析多项式系统的稳定性。第5章主要讨论动态系统稳定域边界的子流形计算问题,分别给出了1型和 k 型不稳定平衡点的稳定子流形多项式近似表达式。第6章讨论电力系统暂态分析问题和相应的数学模型,主要介绍电力系统暂态问题的由来及分类,并给出研究稳定性问题所需要的发电机、输电网络及负荷等电力系统主要元件的动态模型,在此基础上提出一种电力系统主导不稳定平衡点的综合求解法。第7章讨论半张量积方法在暂态功角稳定中的应用,提出网络约化情形下的电力系统暂态功角稳定裕度指标计算方法,给出电力系统故障临界切除时间及相应的动态安全评估方案。第8章讨论半张量积方法在暂态电压稳定中的应用,主要提出电力系统暂态功角稳定和电压稳定的界定方法并依此给出暂态电压稳定判据。第9章从非线性几何动力学的角度出发,首先建立了一个统一的大扰动后中长期电压稳定分析模型,进而提出中长期电压稳定判据及稳定评估方法。第10章基于半张量积方法建立了一般非线性系统的近似多项式表示模型,给出了近似系统与原非线性系统拓扑等价的严格数学证明,进一步提出了利用近似多项式系统研究原系统稳定性的方法并将其应用于电力系统暂稳分析,这是一种新的稳定性研究思路。第11章讨论动态安全域的边界计算问题,分别给出了动态安全域的数学表达式及几何性质、局部边界的隐式表达式以及灵敏度的计算方法;进一步研究了裕度型动态安全域,提出了基于稳定域边界的暂稳裕度指标、基于安全域边界的暂稳裕度指标,深入讨论了这两类指标在故障排序及暂态稳定评估中的应用问题,最后讨论并提出了可给出暂态稳定裕度的裕度型安全域方法。第12章主要研究动态安全域的应用,提出了暂稳约束下的ATC计算方法,暂稳约束下的最小发电机成本调度方法,给出了电力系统预防控制策略的设计方法。

我深信,电力系统分析与控制的半张量积方法将是一个全新的理论和极具实用前景的有力工具。她是如此的年轻,以至于到处都是待开垦的处女地。希望更多的专家,特别是年轻学者加入半张量积方法研究努力开拓发展这一新领域。

本书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承担国家杰出青年基金项目(No. 50525721)、国家自然科学基金重大项目子课题一(No. 50595411)和国防“973”项目等有关课题所得的最新研究成果。在项目研究和本书写作过程中,得到了香港大学 Felix F Wu 教授和倪以信教授、华中科技大学程时杰院

士的热情帮助。程时杰院士认真审阅了全稿并欣然为本书作序。本书所涉及的部分内容,包括华北电力大学马进博士,清华大学电机系研究生叶俭、王义红和孙玉娇等刻苦研究的成果,在此一并向他们表示感谢。

清华大学出版社特别是张占奎老师对本书的出版给予了宝贵的支持和帮助,谨借此机会表达深切的谢意。

最后,我谨向卢强院士多年来对电力系统半张量积方法研究的支持和指导深致谢意。

梅生伟 谨识

2010年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 矩阵的乘法	3
1.2.1 矩阵与矩阵的标准乘法.....	3
1.2.2 Kronecker 积性质	6
1.2.3 Hadamard 积性质	7
1.3 电力系统暂态分析概述	8
1.4 本书内容简介	9
第 2 章 矩阵的半张量积	10
2.1 多维数组.....	10
2.2 矩阵的半张量积.....	20
2.3 换位矩阵.....	27
2.4 半张量积的性质.....	31
2.5 右半张量积及一般矩阵的半张量积.....	35
2.6 应用举例：布尔网络	38
第 3 章 函数矩阵及其微分	44
3.1 多元多项式的矩阵表示.....	44
3.2 基底变换.....	47
3.3 函数矩阵的微分.....	51
3.4 微分基本公式.....	55
3.5 Lie 导数的计算	56
3.6 应用举例：逆映射的计算	58
第 4 章 动态系统的稳定性	61
4.1 稳定性与 Lyapunov 函数方法	61
4.2 多项式的正定性.....	63
4.3 非线性系统的稳定性.....	68
4.4 多项式系统的全局稳定性.....	70

4.5	算例分析	73
第5章	动态系统稳定域边界计算	78
5.1	稳定子流形和稳定域	78
5.2	不稳定平衡点子流形的隐式表示	80
5.2.1	1型不稳定平衡点子流形的隐式表示	80
5.2.2	k 型不稳定平衡点子流形的隐式表示	85
5.2.3	k 型不稳定平衡点子流形多项式近似	89
5.2.4	算例分析	91
5.3	Hessian 矩阵形式二次近似计算	95
5.4	微分代数模型的稳定域边界近似	98
5.5	稳定域估计的扩张方法	100
5.5.1	非线性自治系统稳定性分析的拓扑理论	100
5.5.2	能量函数层集的扩张与收缩	103
5.5.3	能量函数层集的近似扩张算法	107
5.5.4	算例	112
5.6	说明与参考	116
第6章	电力系统暂态稳定性分析的模型及方法	118
6.1	概述	118
6.2	暂态稳定性分析的一般数学模型	121
6.2.1	一般性假设	121
6.2.2	动态电力系统的通用数学模型	121
6.2.3	表示暂态过程的通用数学模型	123
6.3	暂态稳定性分析的动态模型	124
6.3.1	同步发电机数学模型	124
6.3.2	负荷模型	131
6.3.3	网络模型	134
6.3.4	网络变换与节点收缩	136
6.3.5	电力系统二阶经典模型	138
6.3.6	电力系统结构保留模型	140
6.4	电力系统暂态稳定分析方法	142
6.4.1	电力系统暂态稳定分析方法概述	142
6.4.2	暂态能量函数法的基本理论	144
6.4.3	电力系统稳定域的多项式近似	154
6.4.4	系统 CUEP 的求取方法	154
6.5	电力系统动态安全域	158

第 7 章 暂态功角稳定裕度评估及计算	162
7.1 基于稳定域边界的暂态稳定裕度指标	162
7.1.1 指标构建.....	162
7.1.2 指标近似计算.....	163
7.1.3 故障排序.....	164
7.2 经典模型的分解计算方法	164
7.2.1 稳定域二次近似的分解计算.....	164
7.2.2 临界切除时间的计算及其讨论.....	166
7.3 仿真算例	167
7.3.1 暂态稳定域边界近似算例.....	167
7.3.2 临界切除时间算例.....	173
7.3.3 暂态稳定裕度指标算例.....	176
7.4 说明与参考	178
第 8 章 暂态电压稳定裕度评估及计算	179
8.1 暂态电压稳定研究现状	180
8.1.1 现有暂态电压分析研究方法及不足.....	180
8.1.2 暂态电压失稳机理.....	183
8.1.3 暂态电压稳定与暂态功角稳定的界定.....	183
8.2 含感应电机的多机系统暂态电压稳定分析模型	185
8.3 利用 CUEP 界定暂态电压失稳与暂态功角失稳	188
8.3.1 求解电压稳定模式的 UEP(UEPV)	189
8.3.2 求解功角稳定模式的 UEP(UEPA)	191
8.3.3 确定 CUEP	194
8.4 暂态电压稳定裕度指标	194
8.4.1 暂态电压稳定裕度指标的构建.....	194
8.4.2 暂态电压稳定裕度指标的计算.....	195
8.5 仿真验证	196
8.5.1 单负荷无穷大母线系统.....	197
8.5.2 独立电力系统.....	201
8.6 说明与参考	208
第 9 章 中长期电压稳定裕度评估与计算	209
9.1 中长期电压稳定研究现状	209
9.1.1 中长期电压稳定的研究方法.....	209
9.1.2 中长期电压失稳机理.....	210
9.2 QSS 仿真基本原理	211

9.3	中长期电压稳定分析模型	212
9.3.1	短期动态元件模型	213
9.3.2	中长期动态元件模型	214
9.3.3	输电网模型	216
9.3.4	中长期电压稳定分析综合模型	217
9.4	中长期电压稳定判据	217
9.5	仿真分析	218
9.5.1	单机单负荷系统	219
9.5.2	IEEE 39 节点系统	221
9.6	说明与参考	224
第 10 章	基于非线性系统多项式近似的电力系统暂态稳定分析	225
10.1	问题的提出	225
10.2	非线性系统的多项式近似系统	226
10.2.1	非线性系统的多项式近似表达	226
10.2.2	基本假设	227
10.2.3	基本引理	228
10.2.4	多项式近似系统平衡点与原系统平衡点间的关系	229
10.3	多项式近似系统平衡点的求解	231
10.3.1	多项式近似系统平衡点个数及分布	231
10.3.2	多项式近似系统平衡点的求解	233
10.4	暂态稳定分析应用	234
10.4.1	电力系统暂态经典模型的多项式近似	234
10.4.2	基于多项式近似的平衡点的求解	239
10.4.3	多项式近似系统的能量函数构造	244
10.4.4	多项式系统暂态稳定域边界近似的求解思路	245
10.5	说明与参考	247
第 11 章	动态安全域边界计算	249
11.1	动态安全域的数学表示及其几何性质	249
11.1.1	动态安全域数学表示	249
11.1.2	动态安全域的几何性质	250
11.2	动态安全域局部边界的隐式表示	252
11.3	动态安全域边界的近似	253
11.3.1	二次近似	253
11.3.2	拟二次近似	254
11.3.3	Q 线性近似	254

11.3.4	L 线性近似	254
11.3.5	L_0 线性近似	255
11.3.6	灵敏度计算	255
11.3.7	相关问题讨论	256
11.3.8	仿真分析	257
11.4	裕度型动态安全域	265
11.4.1	裕度型动态安全域的构建	265
11.4.2	裕度型动态安全域的近似	265
11.4.3	基于裕度型动态安全域的暂态稳定评估	267
11.4.4	暂态稳定评估算例	267
11.5	说明与参考	270
第 12 章	暂态稳定裕度指标应用	272
12.1	暂态稳定约束下的 ATC	272
12.1.1	计算方法	272
12.1.2	仿真分析	275
12.2	暂态稳定约束下的最小发电成本调度	278
12.2.1	调度策略求解方法	278
12.2.2	仿真分析	280
12.3	预防控制	282
12.3.1	故障筛选	282
12.3.2	预防控制策略设计	283
12.3.3	仿真分析	283
12.4	说明与参考	287
附录 A	具有三阶收敛性的牛顿迭代法	288
附录 B	IEEE 3 机 9 节点系统参数	294
附录 C	新英格兰 10 机 39 节点系统参数	295
附录 D	名词索引	298
参考文献	参考文献	301