



“十二五”国家重点图书出版规划项目

清华大学学术专著

Theory and Methods for Time and Frequency
Domain Electromagnetic Transient Analysis

时频电磁暂态分析 理论与方法

何金良 著
He Jinliang



清华大学出版社





清华大学学术专著

Theory and Methods for Time and Frequency
Domain Electromagnetic Transient Analysis

时频电磁暂态分析 理论与方法

何金良 著
He Jinliang

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

电磁暂态威胁电力系统、电子系统及建筑物等的可靠运行和安全。科学、合理地预测电磁暂态特性是电气、电子设备及系统设计及选型的关键基础。本书既涵盖了传统的波过程理论及电磁暂态基本计算方法,同时根据作者及国内外其他学者多年来的相关研究成果,力图全面梳理电磁暂态分析的理论 and 计算方法的最新研究成果,系统介绍具有时域特性和频域特性的电磁暂态分析的基础理论和数值计算方法,包括具有复杂电磁耦合的半空间全波电磁暂态的数值计算方法,以及电磁暂态分析的智能拟合法;另外重点介绍了不同电力系统设备、电力电子器件及控制系统、新能源装置等的电磁暂态分析模型;最后介绍了电磁暂态特征提取的小波变换理论及计算方法。

本书可供高校和科研院所电气、电子等专业的师生阅读,也可供电力行业和其他相关行业的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

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

时频电磁暂态分析理论与方法/何金良著. —北京:清华大学出版社,2015
(清华大学学术专著)
ISBN 978-7-302-41877-1

I. ①时… II. ①何… III. ①电磁场—暂态特性—研究 IV. ①TM501

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第256777号

责任编辑:黎 强
封面设计:傅瑞学
责任校对:王淑云
责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 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

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

印 装 者:三河市中晟雅豪印务有限公司

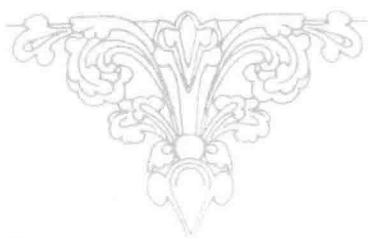
经 销:全国新华书店

开 本:153mm×235mm 印 张:45.5 字 数:744千字

版 次:2015年11月第1版 印 次:2015年11月第1次印刷

印 数:1~1000

定 价:150.00元



作者简介



何金良 男, 1966年出生于湖南长沙。清华大学电机工程与应用电子技术系教授、博士生导师, 高电压与绝缘技术研究所所长。美国电气电子工程师学会会士 (IEEE Fellow)、英国工程技术学会会士 (IET Fellow)。现为全国雷电防护标准化技术委员会主任委员、中国电机工程学会输电线路专委会副主任委员、电磁干扰专委会变电站电磁环境学组副主任委员、高压专委会过电压与绝缘配合学组副主任、北京市电机工程学会高压专委会主任、全国电磁兼容标准化技术委员会大功率暂态现象分技术委员会副主任委员、中国避雷器标委会委员、中国气象学会雷电防护研究会常委; 国际电工委员会 (IEC) TC81中国代表及6个工作组委员; IEEE电磁兼容学会SETcom委员会秘书长, IEEE磁学会会士提名委员会委员, IEEE会士委员会技术委员会委员; 国际大电网会议 (CIGRE) 3个雷电防护工作组委员, WGC4.26工作组“超特高压交流和直流输电线路雷电绕击分析方法评估”召集人; 国际雷电防护会议(国际组织)科学委员会委员, 亚太雷电国际会议(国际组织)副主席。担任《雷电防护与标准化》主编, *Journal of Lightning Research* 副主编, 以及 *IEEE Transactions on Power Delivery*, *Electric Power Systems Research*, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, *IEEE Power Engineering Letters* 和《高电压技术》等刊物编委。2009年作为大会联合主席主办亚洲防雷论坛; 作为大会主席, 主办2010年亚太电磁兼容国际会议、2011年亚太雷电国际会议、2014年雷电防护国际会议和2015年国际磁学大会。

1988年毕业于武汉水利电力学院；1991年获重庆大学硕士学位；1994年获清华大学博士学位，后留校任教。1997—1998年作为访问科学家在韩国电气研究所进行学术交流。2001年晋升为教授，2004年获得国家杰出青年基金，2010年受聘为教育部长江学者奖励计划特聘教授。2013年作为首席科学家，主持国家重点基础研究发展计划（“973”计划）项目“大容量直流电缆输电和管道输电关键技术基础研究”。2014—2015年为美国斯坦福大学访问教授。

长期从事先进电能传输技术、雷电防护及电介质材料等领域的研究。研究成果获国家技术发明二等奖1项、国家科技进步二等奖1项、省部级科技进步奖13项。2010年获得IEEE电磁兼容学会技术成就奖；2012年获得亚太电磁兼容国际会议（国际组织）“亚太电磁兼容国际会议奖”；2013年获得日本电气设备学会（IEIEJ）第6届星野奖；2015年获得亚太雷电国际会议（国际组织）杰出贡献奖。

已发表学术论文400余篇，其中SCI收录200余篇；出版中英文著作7部，包括John Wiley & Sons和IEEE联合出版的英文专著《Methodology and Technology for Power System Grounding》和国家科技出版基金资助的专著《配电线路雷电防护》。负责起草4项国家防雷标准，参与起草4项国际电工委员会（IEC）国际防雷标准。



序 言

电力系统产生电磁暂态的主要原因是正常运行中开关操作或发生故障,包括遭受外部雷击情况下引起网络参数的突然改变。电力系统电磁暂态可能引起各种不同类型的过电压,其幅值和持续时间决定各种电力设备的绝缘水平,根据计算所得到的过电压数据是高压,特别是超高压和特高压电力设备进行绝缘配合和绝缘设计的主要依据,而后者将在一定程度上决定设备的造价,并影响到电力系统能否安全可靠地运行。因此,对引起电力系统过电压的电磁暂态进行理论分析和精确计算,研究限制过电压的措施并通过计算分析其有效性,一直是电力设计和研究人员的重要课题。在计算手段方面,目前数值计算已经成为主要选择,得到快速发展。电力系统电磁暂态带来的另外一种危害是对环境的电磁干扰,特别是由于现代电力系统中计算机和各种微电子设备在控制和信号系统中的广泛应用,有关各种强电系统的电磁暂态对弱电系统造成的干扰和危害及其限制措施的研究越来越受到有关方面的重视。另外,随着电子及微电子技术的发展,在低压及电子系统中的电磁暂态造成的电磁干扰问题也受到广泛关注。

电力系统电磁暂态的理论分析牵涉面很广,对计算方法也有很高的要求,需要考虑诸多实际存在的影响因素,例如需要用分布参数计算多导线系统中的波过程,在许多情况下需要考虑电晕以及线路参数的频率特性对波过程的影响;电力系统中存在许多非线性元件,如避雷器中的非线性电阻元件,电力变压器和互感器的非线性电磁元件;雷击、开关操作以及接地系统的电流引起大地中的各种放电过程,都会对电磁暂态过程造成影响。不同类型的电磁暂态过程延续时间的跨度很大,从以秒计算,到以毫秒,微秒,甚至以纳秒来计算,这也为计算方法的设计和选择带来一定的难度。近年来,我国电力系统长距离、大容量超高压和特高压交直流输电技术的快速发展,对电磁暂态计算提出了一系列新的课题和新的要求,在这些系统中深度限制过电压水平,需要有更高的电磁暂态的计算精度,考虑更多的影响因素,同时对控制系统的电磁干扰的要求也更高了,而已有的有关电力系统电磁

暂态分析的著作已经不能满足日益增长的需求,因此,何金良教授精心编写的这一学术著作是十分必要的,弥补了已有著作的不足。

本书作者所在的清华大学研究团队一直非常重视电力系统电磁暂态分析理论和计算方法的研究,包括较早地邀请国际上电磁暂态计算程序 EMTP 创始人 Dommel 教授来校进行系统讲学;较早地对本科生和研究生开设电力系统电磁暂态数值计算课程,并编写有关教材;许多教师一直坚持参与这方面的国家重大项目的研究,并在理论分析和计算方法上获得了进展。何金良教授及其团队结合我国特高压交直流输电系统快速发展的需要,参加并完成了一系列与电磁暂态计算有关的重要课题。此外,作者从 1994 年以来一直在清华大学主讲研究生学位课程《电磁暂态分析》,编写教材,本书就是在继承清华大学原有教学成果的基础上,历经 20 年,结合作者及其研究团队多年来的研究成果编写而成的。

本书介绍了许多创新的研究成果,例如作者提出了全波过程的电力系统暂态分析模型的概念,其基本思想是在分析电力系统电磁暂态过程中,除了考虑地面上输电线路和电力设备的仿真模型外,还要统一考虑包括接地装置和接地系统在内的整个系统中所发生的实际波过程,进而建立包括大地中的接地系统在内的统一的电磁暂态计算模型。显然,与传统的电磁暂态计算模型把杆塔接地装置和变电站接地系统按集中接地电阻来等效相比,这种新方法的计算精度会更高,但计算难度也更大。用类似的思路,也可以考虑各种电力设备,如大型电力变压器和 GIS 等设备内部波过程的仿真模型,不仅可以得到更精确的作用在电力网络中的过电压数据,同时也能得到各种外界电磁暂态作用下电力设备内部的过电压分布,这对于绝缘结构设计是非常有利的。书中另外一些内容在传统电力系统电磁暂态分析的教材或著作中也是尚未涉及或很少涉及的,例如新出现的超高压或特高压交直流输电线路并行架设,当直流系统中电力电子器件频繁重复动作时,会在交流系统引起新一类的电磁暂态过程,需要进行研究和仿真计算;需要研究区别于传统平行多导线系统的半空间复杂导体结构的全波电磁暂态的时域计算方法;在现代交直流大规模互连网络中要求对持续时间跨度极大的电磁暂态进行仿真计算,对研究提出了超大规模数值计算的新要求。书中所论述的这些新的内容,填补了以往出版著作的空白,发展和丰富了电力系统电磁暂态分析的研究内涵。

需要指出的是,书中的许多内容已经发表在国际主流学术刊物上,受到国际上有关学者和专家的肯定和积极评价。鉴于作者在电磁暂态分析方面

的研究进展和在其他领域取得的创新成果,何金良教授在 2007 年被选为 IEEE Fellow,并在 2010 年获得了 IEEE 电磁兼容学会的技术成就奖。

相信本书的出版必将推动电力系统电磁暂态分析理论和计算方法的进一步发展,为我国电力工程学科的进步做出重要的贡献。

吴维韩

2015 年 8 月

Preface

It is generally accepted that electromagnetic transient analysis on a real electrical transmission system started during the second half of the 19th century with the work of Lord Kelvin to investigate signal distortion on the planned Trans-Atlantic telephone cable in 1854. Since then, methods and tools to accomplish the problem of interest have been progressively developed and enhanced, from traveling wave theory to the more recent numerical electromagnetic analysis, passing through a long phase of development of electromagnetic transient like programs, which are still the most diffused and used tools for accomplishing electromagnetic analysis in power systems. These methods and tools have benefited by the impressive evolution of the computational power of computers; some theories that a few decades ago were requiring prohibitively long computational times and could not be used for engineering purposes can now be successfully applied through the employment of modern computers and parallel computing techniques.

Electromagnetic transient analysis has gained progressively more and more importance in the last decades, essentially because the increasing/widespread use of electronic devices has been accompanied on the one hand by their increasing performance, but on the other hand by their increasing sensitivity and vulnerability to transient disturbances too. Electronic devices are deployed at a large number points within the electric and electronic systems and appliances we are surrounded by, and in some cases it is the same system in which they are embedded that originates the transient disturbances that can potentially damage them. The problem is made even more important due to the fact that our society is relying more and more on ICT applications in most of its sectors, think for instance at the smart grid and smart city paradigms that are receiving major attention worldwide.

Full-wave numerical electromagnetic analysis methods (henceforth called NEA) allow the direct numerical solution of Maxwell's equations either in frequency or in time domains. These methods, thanks to the earlier mentioned impressive performance of computers if compared to the one they were exhibiting only a few decades ago, are becoming a promising approach for the numerical solution of complex transient phenomena that cannot be straightforwardly solved by means of circuit-theory-based simulation tools such as the Electromagnetic Transient Program (EMTP). As a matter of fact, circuit-theory based approaches cannot, in principle, solve transients that involve non-TEM propagation modes. Additionally, circuit-theory based approaches present major difficulties for the solution of transients in complex media (e. g. grounding electrode, cables semi-conducting layers, etc.). Finally, it is worth noting that circuit-theory approaches require the prior knowledge of the circuit parameters that are often hard to estimate. On the other hands, NEA methods are inherently capable of solving this problem as they require only with the geometrical and physical parameters of a given system, although involving major computational efforts and a non-straightforward definition of both sources and boundary conditions.

The volume "Theory and Approaches for Time- and Frequency-Domain Electromagnetic Transient Analysis" by professor Jinliang He deals with a timely subject in the area of electrical and electronic systems: the modeling and appraisal of electromagnetic transients affecting power and telecommunication systems or, more in general, electric and electronic systems. In this book professor Jinliang He has not only covered the large domain of the traditional wave process theory and fundamental numerical analysis methods of electromagnetic transients, but has also illustrated the theory of NEA and its application to the analysis of transient surges in power systems. This volume has the merit of accomplishing a comprehensive survey and categorization of some of the most advanced research findings within the domain of interest achieved by the key international research groups dealing with it, and among which the author's group is distinguished for productivity and outstanding level. It presents a critical assessment of existing modelling methods of power system components, and electromagnetic analysis methods.

In recent years, while I was serving as the chair of CIGRE Study Committee C4 System Technical Performance, Prof. He has convened and joined several CIGRE Working Groups related to lightning protection and electromagnetic transient analysis; many new achievements obtained within the framework of those working groups are indeed included in this book.

The matter dealt with develops across fourteen chapters, devoted to the characterization of transients, the fundamental theory for analyzing the electromagnetic transients in time and frequency domains, the relevant numerical computational methods. Such a theory includes full-wave electromagnetic transients approach, the algorithms for electromagnetic transient analysis based on the transmission line approach, the wavelet transform for extracting the characteristics of different electromagnetic transients, and the relevant numerical methods. Useful indeed and commendable, the part of this book relevant to the models of various power system equipment and apparatuses, including power electronics and control systems devices as well as power renewable sources, in transient regime.

I think that this book represents an extremely useful piece of knowledge for those, scientific researchers and advanced engineers working in the area of electromagnetic transient analysis, and wish the author all the editorial success he deserves.



Carlo Alberto Nucci
Professor of Bologna University
Jul. 30, 2015

前 言

雷电及其他电磁暂态现象会威胁电力系统、电子系统及建筑物的运行安全。科学、合理地预测电磁暂态特性是电气、电子设备及系统设计与选型的关键基础。电磁暂态产生的根本原因是网络参数的突变。电力系统电磁暂态,也称电力系统过电压,是发展高压和超高压电网所必须研究的重要课题,它不仅影响变压器、断路器、输电线路等电力设备绝缘强度的合理设计,而且还直接关系到电力系统能否安全可靠地运行。各种类型的过电压,如正常运行或切除故障所引起的操作过电压,雷闪放电引起的大气过电压等,都是由电力系统中突然出现的电磁暂态过程激发而产生的。电力系统含有非线性特性的避雷器、铁磁电感,以及具有分布参数特性的输电线路等电磁元件,有时还需要考虑输电线路参数随频率变化的特性和线路发生电晕以后的伏库特性等。因此,电气系统中的电磁暂态过程往往是很复杂的,解析方法只适用于过电压的原理分析和简单情况下的计算,而电磁暂态过程的深入解析则必须借助于数值计算方法。

随着计算机技术的发展,电磁暂态数值计算技术得到了长足的进步。目前已形成一些比较成熟的算法和计算程序。例如,由加拿大 UBC 的 H. W. Dommel 教授创建并经过许多人的共同努力而完成的电磁暂态计算程序 EMTP,已经成为国际上普遍采用的大型计算程序,并发展成重要的两个分支,一是北美的 PSCAD/EMTDC/RTDS 程序,走的是商业路线,目前可以实现实时仿真;二是欧洲的 ATP 版本,属于免费版本。另外,在广为应用的工具软件 MATLAB 中有一个 Power System Blockset 模块,也能够进行电磁暂态计算。应用数值计算方法研究电力系统过电压等电磁暂态过程,在通用性、灵活性、计算精度和功能等方面日益显示出它的优越性,可以满足在电网实际条件下计算各种类型过电压的工程要求。目前,电磁暂态分析软件已从过去的 DOS 版本升级为 Windows 版本,可以直接搭建所需解决的电路,非常方便实用。

传统的电磁暂态计算方法只能解决相对简单的传导电磁暂态的时域计

算问题,目前随着科学技术的发展,电力系统及其他电气系统对电磁暂态精确建模和计算提出了更为苛刻的需求,而当前广为采用的电磁暂态计算程序对很多工程问题都无法进行计算,电磁暂态分析正朝着充分考虑系统及装置的时频特性和全波电磁暂态分析方向发展。另外,各种新的器件及设备,特别是各种新能源发电装置的使用,也给电磁暂态分析带来了新的挑战。

本书力图全面梳理电磁暂态分析理论和计算方法的最新研究成果,包括传统的波过程理论及电磁暂态基本计算方法,也包括具有时域特性和频域特性的电磁暂态分析的基础理论和数值计算方法。

本书内容共划分为14章。第1章为概论,第2章介绍传统的波过程基本理论,第3章介绍平行多导线系统的参数计算方法,第4章介绍平行多导线波过程的数值计算方法。第3章的部分、第4章、第9章的部分内容继承了清华大学电机工程与应用电子技术系吴维韩、张芳榴、高玉明、张纬钹和黄炜纲五位教授编著的《电力系统过电压数值计算》的精华,介绍了传统的电磁暂态计算程序(EMTP)的基本理论及计算方法,同时也补充了最新的研究成果,如如何在线路参数计算中考虑土壤的有限导电特性,电缆参数的计算方法,土壤参数频变特性对线路参数的影响,输电线路的雷电冲击和操作冲击电晕特性等。本书第5~8章主要介绍不同电力系统元件、装置及系统的电磁暂态模型,包括绝缘子闪络、杆塔、变压器、发电机、互感器、非线性器件、电力电子器件及控制系统、新能源装置等关键设备的电磁暂态分析模型。第9章讨论平行多导体线路电磁暂态的频域分析方法。第10章论述平行多导体线路电磁暂态分析的时域分析方法,包括基于Chebyshev多项式展开的时域电磁暂态分析理论及方法,以及基于时域有限差分的计算方法。第11章介绍考虑空间场耦合的传输线电磁暂态分析方法,着重介绍外界场在传输线上产生电磁感应电压的基本理论及数值计算方法。第12章阐述具有复杂电磁耦合的半空间全波电磁暂态的数值计算方法,包括准静态下复杂导体结构电磁暂态的时域计算方法、有损全空间中时域积分方程的求解方法、有损半空间内外时域积分方程的计算方法等。第13章介绍电磁暂态分析的智能算法,包括具有时频特性的系统的电磁暂态过程的快速计算理论及数值方法。第14章讨论电磁暂态特征提取的小波变换理论及计算方法,实现电磁暂态过程特征参数的提取,为电磁暂态理论在输电线路故障测距、行波测距式距离保护原理等提供理论支撑。本书重在阐明相关的基本概念、基本原理和计算方法,同时紧密联系工程实际。每一章既反映

了作者的研究工作与取得的成果,又注意介绍国内外相关的研究成果与进展。

在本书编写过程中,余占清副教授编写了第7章的初稿;王顺超博士整理了第11章的初稿,并将其博士论文整理为第12章的初稿;黄曹伟参与了第14章初稿的编写;张波副教授为本书提出了大量的修改意见。

非常感谢作者的恩师、清华大学吴维韩教授为本书作序。吴维韩教授是我国电磁暂态数值计算领域的开拓者之一,毕生致力于此领域的研究。另外也非常感谢电磁暂态领域的国际著名专家、IEEE Fellow、意大利博洛尼亚大学的 C. A. Nucci 教授为本书作序,Nucci 教授长期担任 CIGRE C4 (系统特性)委员会主席,他在推动电磁暂态分析的发展和应用方面做了很多工作,享有很高的声誉。

由于作者的理论水平和实际经验都有限,书中的缺点和错误之处在所难免,谨请读者指正。

作者

2015年9月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 电磁暂态的危害	1
1.2 电力系统的电磁暂态	2
1.3 电磁暂态分析的数学方法	3
1.3.1 电磁暂态分析的数学模型	3
1.3.2 计算方法的分类	5
1.3.3 电磁暂态的数值分析方法	6
1.4 传导电磁暂态分析理论与方法	8
1.4.1 电磁暂态分析技术的发展过程	8
1.4.2 传导电磁暂态的主要研究方向	10
参考文献	14
第 2 章 电磁暂态波传导理论	16
2.1 波过程的物理概念	16
2.2 波动方程	17
2.2.1 波动方程的解	17
2.2.2 前行波和反行波	19
2.2.3 波的折射和反射	20
2.3 传输线波过程的集总参数等值电路	23
2.3.1 单根传输线波过程的彼德逊法则	23
2.3.2 多根传输线波过程的等值波法则	24
2.4 波经过电容和电感	25
2.4.1 丢阿摩尔积分	25
2.4.2 波经过电容和电感	26
2.4.3 电感和电容削弱波的陡度	27

2.5	计算波过程的特征线法	29
2.5.1	计算波过程的特征线法	29
2.5.2	特征线方程的物理意义	30
2.5.3	应用特征线法求解线路波过程的方法	31
2.6	波的衰减和变形	32
2.6.1	波沿导线传播时的衰减和变形	32
2.6.2	冲击电晕特性	33
2.6.3	冲击电晕对波过程的影响	39
	参考文献	41
第3章	平行多导线系统的参数计算方法	43
3.1	波在平行多导线系统传播的静电方程	43
3.1.1	波传播的静电方程	43
3.1.2	平行多导线的耦合系数	44
3.2	平行多导线参数计算	47
3.2.1	电位系数矩阵	47
3.2.2	电容系数矩阵	47
3.2.3	阻抗矩阵	51
3.3	输电线路模型	55
3.3.1	对称分量模型	55
3.3.2	支路参数模型	57
3.4	非理想导体大地对架空线路参数的影响	58
3.4.1	非理想导体大地的复透入深度	58
3.4.2	考虑非理想大地时导线阻抗的修正方法	64
3.4.3	阻抗修正公式的数值积分方法	67
3.5	导体的趋肤效应	67
3.6	土壤参数频变特性对线路参数的影响	71
3.6.1	土壤参数的频变特性	71
3.6.2	土壤参数频变特性对输电线路参数的影响	72
3.7	电缆的参数计算	74
3.7.1	单相单芯电缆的阻抗	75
3.7.2	三相单芯电缆阻抗	79
3.7.3	电缆的导纳矩阵	81

3.8	电缆暂态参数的数值计算方法	83
3.8.1	解析法求解单芯同轴电缆的阻抗和导纳	83
3.8.2	解析法求三芯电缆的阻抗和导纳	87
3.8.3	分离元法	90
3.8.4	线单元分离元法	94
3.8.5	有限元法	95
3.8.6	电缆参数计算方法的比较	99
	参考文献	102
第4章	基于贝杰隆特征线法的波过程数值计算方法	106
4.1	贝杰隆特征线法求解单导线波过程	107
4.1.1	单根无损线的贝杰隆等值计算电路	107
4.1.2	集中储能元件的暂态等值计算电路	108
4.1.3	线路损耗的近似处理方法	111
4.1.4	节点电压方程和节点导纳矩阵	114
4.1.5	电源支路的处理	116
4.2	平行多导体线路波动方程和模变换方法	119
4.2.1	平行多导体线路的波动方程	119
4.2.2	平行多导体线路的模变换方法	120
4.2.3	平衡线路的模变换矩阵	121
4.2.4	平衡线路模量上的波速度	126
4.2.5	平衡线路模量上的线路参数	126
4.2.6	平衡线路模量上的波阻抗	127
4.3	不平衡线路的模变换的数值计算方法	131
4.3.1	不平衡线路的模变换矩阵	131
4.3.2	实域中求解不平衡线路的模变换矩阵	132
4.3.3	复数域中求解不平衡线路的特征值和模变换矩阵	133
4.3.4	不平衡线路的模量传播参数	136
4.4	多导线线路模量上的电阻参数	138
4.4.1	均匀换位线路模量上的电阻参数	139
4.4.2	不换位线路模量上的电阻参数	139