

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

现代电力系统丛书



高等电力网络分析

(第2版)

张伯明 陈寿孙 严正 著

清华大学出版社



研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

现代电力系统丛书



高等电力网络分析

(第2版)

张伯明 陈寿孙 严正 著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍电力系统网络分析的计算机计算方法的基本原理和实现技术。

全书共2篇12章。基础篇共6章,介绍电力网络分析的基本原理,包括电力网络分析的一般方法,电力系统网络矩阵,电力网络计算中的稀疏技术,网络方程的修正解法,网络变换、化简和等值,大规模电力网络的分块计算。应用篇共6章,介绍电力系统网络分析中的潮流计算和故障分析,包括潮流计算的数学模型及基本解法,潮流方程的特殊解法,潮流计算中的特殊问题,潮流计算问题的扩展,对称分量法和相序网络,电力系统故障分析的计算机方法。

本书侧重介绍电力网络分析中的基础性和共性问题,将矩阵分析、图论描述和物理概念解释相结合,注意联系电网实际,叙述深入浅出,并附有例题和习题,便于读者自学。

本书可以作为电力系统及其自动化专业研究生教材,也可供电力专业科技人员、高等院校教师和高年级学生参考。

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 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

高等电力网络分析 / 张伯明,陈寿孙,严正著. —2版. —北京:清华大学出版社, 2007.9

(现代电力系统丛书)

ISBN 978-7-302-15291-0

I. 高… II. ①张… ②陈… ③严… III. 电力网络分析 IV. TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第073858号

责任编辑:张占奎

责任校对:赵丽敏

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

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

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京市世界知识印刷厂

装 订 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:22.25

版 次:2007年9月第2版

印 数:1~2500

定 价:42.00元

插 页:1 字 数:425千字

印 次:2007年9月第1次印刷

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:008049-01

作者简介



张伯明,山西霍县人,1948年出生。1985年在清华大学电机工程系获博士学位,并留校任教,1990年晋升为副教授,1993年晋升为教授,1994年为博士生导师。1987—1988年在英国 Strathclyde 大学做访问学者,1994年在瑞士联邦工业大学做访问科学家。长期从事电力系统分析和电网调度自动化的教学和科研工作,在电网控制中心能量管理系统等领域取得多项达到国际先进水平的科研成果。曾于1990年在东北电网率先实现实时状态估计等 EMS 高级应用软件,之后将他领导开发的 EMS/DTS 一体化系统在全国 60 多个电网推广应用。近期又成功开发电网在线安全稳定分析、预警和决策支持系统等新应用,并投入电网实际运行。新近提出三维协调的新一代电网能量管理系统,解决了其中的关键技术问题并完成了示范工程。发表论文 200 多篇。曾获国家级科技进步二等奖 1 项,省部级科技进步一等奖 2 项,光华科技基金一等奖 1 项。曾被国家教育委员会和国务院学位委员会表彰为“在工作中做出突出贡献的中国博士学位获得者”。现任 IEEE 和 CSEE 高级会员,CIGRE 中国国家委员会执委,国际控制中心学术论坛执委。

《现代电力系统丛书》编委会

主 编：卢 强

副主编：周孝信 韩祯祥 陈寿孙

编 委：（按姓氏笔画排序）

王祥珩	甘德强	卢 强	余贻鑫	张伯明
杨奇逊	陈 陈	陈寿孙	周孝信	贺仁睦
赵争鸣	倪以信	夏道止	徐 政	顾国彪
梁恩忠	程时杰	韩英铎	韩祯祥	

责任编辑：张占奎

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,包括三位中国科学院院士,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,我们相信中国电力科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他们康庄之途。

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。

相信中国电力科技应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版自1996年出版以来,电力工程科学和技术又有了很大的发展,尤其是计算机在电网在线调度和控制中的应用已十分普遍,电力市场化改革也对电网安全控制提出了新需求。这些变化要求我们能对电网进行更全面、更快速、更精细的计算分析,这需要电力网络计算机分析的理论和方法的支撑,在这样的背景下本书的再版工作自然提上议程。近10多年来,我用此书在清华大学讲授高等电力网络分析这门研究生学位课,期间正值我国电网快速发展时期,出现了电网分析计算中的新问题、新需求。为适应我国电力网络发展现状以及研究生科研工作的需要,我对教学内容做了很多调整,使这门基础性很强的专业课的特点更加鲜明,使研究生的受益面更广。

电力网络分析是电力系统分析的关键环节,即使研究暂态过程,对电网的分析和处理也是其主要内容和难点之一。因此,本书仍保持突出电力网络这个主题,只涉及稳态,不涉及暂态,只涉及代数方程,不涉及微分方程。电网的突出特点是网络描述,尽管用矩阵描述比较方便,但是用图来描述矩阵及其处理既直观又简洁,因此本书保留了原版书的这些特点。另外,本书基本保留了原版书的体系结构。

本书共分2篇12章,前6章为基础篇,介绍电力网络分析的基本原理,包括电力网络分析的一般方法、电力系统网络矩阵、稀疏技术、网络方程的修正解法、网络变换、化简和等值、电网分块计算。后6章为应用篇,介绍潮流计算和故障分析,包括潮流计算的数学模型和基本解法、潮流方程的特殊解法、潮流计算中的特殊问题、潮流计算问题的扩展、故障分析的计算机解法。

基础篇介绍了电力网络分析应用中的共性的问题。将矩阵运算和图形描述相结合,将数学推导和物理概念相结合,介绍新方法时注重和传统方法相对比,尽量使读者读后能在头脑中留下一幅清晰的图像。在应用篇既介绍广泛使用的传统应用,也介绍近些年的热点应用。本书从不同角度介绍传统应用,并给出多种解决方法。对内点法、连续潮流和跟踪潮流等新应用,介绍了当今最有效的解算方法。本书相当多的内容凝结了作者多年研究工作的体会和总结。

这次再版删减了如下内容:稀疏技术中网络方程不对称情况处理,REI等值和网络变更时各种等值的修正,多开断分布因子,潮流多解的图示,等等。为突出书中介绍的原理、算法和思路,将正文中部分烦琐的公式推导进行了简化,并将其引入习题当中。为适应新的应用需求,这次再版增加了如下内容:配电网分析的回

路分析方法,电网分解协调计算的一般形式的广义网络分割算法,电网计算中的准稳态灵敏度分析方法,静态电压稳定分析的连续潮流方法,电力市场中的跟踪潮流算法,等等。

本书不是面面俱到地罗列电网分析的各种具体应用,而是希望通过归纳、总结、提升,抽象出电网分析中的共性问题,从更基础的层面来描述和解决电网分析问题。例如,配电网分析普适的回路分析法,图上因子分解和网络方程计算,面向节点和面向支路的网络变化的修正,广义支路切割和统一的网络分块算法,最优潮流的三维分析,潮流方程变量分类和潮流计算问题的扩展,规范化的故障分析计算机计算方法等。希望通过对这些基础性问题介绍,帮助读者掌握分析问题和解决问题的方法,启发读者去创新,去开发新的应用领域。

为了便于读者自学,并便于高等院校使用本书进行研究生教学工作,书中增加了一些研究分析型习题,并且全部习题的解答将在与本书配套的《高等电力网络分析习题与解答》中给出。

本书被教育部推荐为研究生教学用书。虽然书中尽量加重基础性内容的介绍,但是作为研究生教学用书,研究性内容仍然相对较多,对初学者的理解可能会有一定难度;为使读者容易理解,书中尽量多用例题来配合解释相关的理论。本书适合用于讲授一个学期的研究生课程。

我要感谢本书再版的合作者严正教授。他20世纪80年代末和90年代初曾在清华大学我所在的科研组攻读硕士和博士学位,毕业后一直在日本、美国和香港等地的大学做研究工作,于2004年回国到上海交通大学任教授。由于他对电力网络分析有深刻的理解和研究心得,故特邀他和我合作完成本书的再版工作,内点法、连续潮流和跟踪潮流等内容是他完成的。

本书第1版受到很多从事电力系统及其自动化专业工作的教师、工程技术人员和研究生的欢迎,并多次重印。许多研究生已经将本书作为出国深造的必备参考书。10多年来,清华大学有数百位研究生听过我讲授的这门课,他们提出的问题及与我的讨论都对我启发很大,促使我改进教材;他们完成的课程研究报告也对这次再版有很大帮助;他们的激情和新颖的想法对我是一种激励。在此向他们表示感谢。

我还要感谢清华大学电机系给我提供了良好的教学和研究环境,使我能够顺利地完成本书的再版工作。

卢强院士认真审读了全部书稿并提出宝贵意见,在此表示衷心的感谢!由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

张伯明

2007年6月于清华园

第1版前言

电力系统分析取决于对电力系统本身客观规律的认识,同时也取决于当时能够采用的研究、分析计算的手段和工具。40年来,随着计算机技术的蓬勃发展和广泛应用,矩阵、图论、数值计算等与计算机相关的数学分支在这个领域里也得到了充分的发展。因此,虽然对电力系统本身客观规律的认识和几十年前没有根本的不同,但是电力系统的分析却面目一新,其数学表达的形式、建立数学模型的方法、相应的计算处理方法等方面发生了很大的变化。正是这种变化适应了现代大规模电力系统(几千个节点,上万条支路)和在线实时控制快速分析的需求。

电力系统分析包括稳态分析和暂态过程的分析。机电动态及暂态过程分析的有关内容将在《动态电力系统理论与分析》一书中介绍。本书主要涉及电力网络稳态分析的有关内容,重点论述以计算机及其相应数学方法为工具进行电力网络稳态分析的原理、方法和实现技巧。应用计算机技术进行电力网络分析吸引了无数学者和专家,提出的各种方法散见于各种教科书和浩瀚的文献之中。作者自20世纪80年代初以来在清华大学从事研究生教学工作,深感需要一本系统介绍的基础性书籍。本书是作者教学和科研工作的经验总结,有些内容是作者近些年来科研工作的成果。为了适应计算机分析的需要,全书采用与之相适应的数学形式来叙述,这样可以使建立数学模型、确定解算方法、实现编程成为一个整体,并且具有简明的特点,但对初学者来说,较难建立形象直观的概念。为此,我们尽量配合以物理概念的解释,使用网络图加以形象地说明,同时还附有一定的例题和习题。因此,只要具有电力系统的初步知识,用这本书自学也并不困难,但是真正融会贯通,一定还要有计算机编程的实践。

本书由三部分组成。

第一部分从第一章到第六章,论述了电力网络的数学模型和基本解算方法,它是电力网络分析的基础。其中重点介绍了电力网络模型及其数学描述;介绍了网络矩阵的性质、物理意义和形成的方法。为适应现代大规模电力系统和实时控制快速分析的需要,本书对稀疏矩阵和稀疏矢量技术、网络等值变换、网络分块计算、并行处理以及网络局部变化时的修正算法等内容给予了较多的关注。这些内容是必不可少的基本知识,其中一些内容是作者近年来的研究成果。

第二部分从第七章到第十章,论述了电力系统的潮流计算——它是电力系统

稳态分析的基本内容,也是一切动态及暂态分析的出发点。关于潮流计算的基本原理和方法在一般的教科书中已经有较详细的叙述,所以本书仅在第七章中作了总结、归纳。第八章和第九章分别介绍了潮流计算的特殊解法和其中的特殊问题。而在第十章中着重论述潮流计算的扩展,它既是实际电力系统安全、经济运行提出的需求,也是潮流计算基本算法解决以后,人们关注的新领域。读者从这一章中可以了解各种扩展潮流计算(例如最优潮流、动态潮流、随机潮流、开断潮流等)与潮流基本算法之间的关系,它们的区别和特点。对于较成熟、最常用的最优潮流和开断潮流给予了更多的论述。

第三部分包括第十一章和第十二章,讨论了用计算机进行电力系统故障分析中的短路电流计算的方法。电力系统发生故障,将经历一个暂态过程,当仅以求得某一瞬间短路电流的周期性分量为目的时,可以把这一瞬间看作过程中的一个断面,通过采用针对该瞬间的等值电动势和等值参数,而化作一个类似稳态电路的计算问题。由于短路电流计算的基本概念和方法在大学本科的教科书中已经有详细的论述,所以本书仅在第十一章中采用矩阵的形式对它进行了总结,并以此为基础在第十二章中论述了对任意复杂的多重故障的短路电流计算采用统一的数学描述和规范化的系统求解方法。读者可以从中了解到一些实用的有效算法,而且可以根据这里叙述的思路自己研究适合于问题特点的算法。

本书作为《现代电力系统丛书》中的一册得以出版是高景德教授的大力支持。在多年的教学和研究工作中,始终得到清华大学张宝霖教授、周荣光教授、倪以信教授的指导和合作,周荣光教授还审阅了全书的手稿,西安交通大学夏道止教授也曾对本书提出过许多宝贵的意见,助教博士生孙宏斌为本书例题做了解答,清华大学电机系和电力系统及其自动化教研组为本书撰写创造了良好的条件,作者在此对他们一并表示感谢。

在编写本书的过程中,我们虽然对体系的安排,素材的选取,文字的叙述都尽了努力,但在正式出版的时候,仍诚恳地期待着对本书提出的指导和批评。

作 者

1995年8月于清华园

目 录

基础篇 电力网络分析基本原理

第 1 章 电力网络分析的一般方法	2
1.1 网络分析概述	2
1.1.1 网络的概念	2
1.1.2 电力网络分析的主要步骤	3
1.2 网络的拓扑约束	5
1.2.1 图的概念和一些基本定义	5
1.2.2 网络分析中常用的关联矩阵	6
1.2.3 关联矩阵 A, B, Q 之间的关系	9
1.2.4 网络拓扑约束——基尔霍夫定律的表达	10
1.2.5 道路-支路关联矩阵	12
1.3 电力网络支路特性的约束	14
1.3.1 一般支路及其退化	14
1.3.2 网络支路方程和原始阻抗(导纳)矩阵	15
1.4 网络方程——网络的数学模型	15
1.4.1 节点网络方程	16
1.4.2 回路网络方程	17
1.4.3 割集网络方程	17
1.4.4 基于道路的回路网络方程	18
1.5 关联矢量与支路的数学描述	19
1.5.1 关联矢量和一般无源支路的数学描述	19
1.5.2 广义关联矢量和变压器/移相器支路的数学描述	20
1.6 小结	22
习题	22
第 2 章 电力系统网络矩阵	24
2.1 节点导纳矩阵	24
2.1.1 节点导纳矩阵的性质及物理意义	24

2.1.2	节点导纳矩阵的建立	27
2.1.3	节点导纳矩阵的修改	32
2.2	节点阻抗矩阵	35
2.2.1	节点阻抗矩阵的性质及物理意义	35
2.2.2	用支路追加法建立节点阻抗矩阵	37
2.2.3	连续回代法形成节点阻抗矩阵	44
2.2.4	基于连续回代法的稀疏阻抗矩阵法	47
2.2.5	网络变更时节点阻抗矩阵的修正	49
2.3	节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵之间的关系	50
2.4	节点法和回路法之间的关系	51
2.5	小结	54
	习题	55
第3章	电力网络计算中的稀疏技术	58
3.1	概述	58
3.2	稀疏技术	59
3.2.1	稀疏矢量和稀疏矩阵的存储	59
3.2.2	稀疏矩阵的因子分解	62
3.2.3	利用稀疏矩阵因子表求解稀疏线性代数方程组	64
3.3	稀疏矩阵技术的图论描述	69
3.3.1	基本定义和术语	69
3.3.2	因子分解过程的图论描述	71
3.3.3	前代回代过程的图论描述	75
3.3.4	不对称稀疏矩阵的处理	78
3.3.5	计算代价的分析	79
3.4	稀疏矢量法	80
3.4.1	有关稀疏矢量法的几个定义	80
3.4.2	稀疏矢量法中的几个性质和定理	81
3.4.3	道路集的形成	83
3.4.4	计算代价的分析	84
3.5	节点优化编号	84
3.5.1	稀疏矩阵中节点优化编号方法	84
3.5.2	提高稀疏矢量法计算效率的节点优化编号方法	85
3.6	小结	86
	习题	87

第 4 章 网络方程的修正解法	89
4.1 补偿法网络方程的修正解	89
4.1.1 矩阵求逆辅助定理	89
4.1.2 补偿法网络方程的修正计算	89
4.1.3 补偿法在电网计算中的应用	92
4.1.4 补偿法的物理解释	94
4.2 因子表的修正算法	98
4.2.1 因子表的秩 1 修正算法	98
4.2.2 系数矩阵阶次变化时因子表的修正	104
4.2.3 因子表的局部再分解	109
4.2.4 块稀疏矩阵的因子表修正算法	112
4.3 小结	113
习题	113
第 5 章 网络变换、化简和等值	115
5.1 星形接法变成网形接法以及负荷移置	115
5.2 网络化简	117
5.2.1 用导纳矩阵表示的形式	118
5.2.2 用阻抗矩阵表示的形式	118
5.2.3 网络的自适应化简	119
5.3 电力系统外部网络的静态等值	123
5.3.1 外部网络静态等值的原理	123
5.3.2 外部网络静态等值的实用化	124
5.4 诺顿等值、戴维南等值及其推广	127
5.4.1 诺顿等值和戴维南等值	127
5.4.2 网络变化时等值参数的修正	133
5.5 小结	135
习题	136
第 6 章 大规模电力网络的分块计算	139
6.1 网络的分块解法	139
6.1.1 节点分裂法	139
6.1.2 支路切割法	144
6.1.3 统一的网络分块解法	151
6.2 大规模电网的分解协调计算和并行计算	155
6.2.1 网络分块解法的并行计算特性分析	155

6.3 广义支路切割法的一般形式	158
6.3.1 一般形式广义支路切割法的列式	158
6.3.2 讨论几种情况	161
6.3.3 并行算法的实现	163
6.4 大规模电网分块计算的实际应用	166
6.5 小结	167
习题	168

应用篇 潮流计算与故障分析

第7章 潮流计算的数学模型及基本解法	172
7.1 潮流计算问题的数学模型	173
7.1.1 潮流方程	173
7.1.2 潮流方程的讨论和节点类型的划分	174
7.2 以高斯迭代法为基础的潮流计算方法	176
7.2.1 高斯迭代法	176
7.2.2 关于高斯法的讨论	177
7.3 牛顿-拉夫逊法潮流计算	180
7.3.1 牛顿-拉夫逊法的一般描述	180
7.3.2 直角坐标的牛顿-拉夫逊法	181
7.3.3 极坐标的牛顿-拉夫逊法	181
7.3.4 雅可比矩阵的讨论	182
7.4 小结	187
习题	188
第8章 潮流方程的特殊解法	191
8.1 直流潮流	191
8.1.1 直流潮流算法列式	191
8.1.2 直流潮流的理论基础	192
8.2 潮流计算的快速分解法	194
8.2.1 快速分解法的修正方程及迭代格式	194
8.2.2 快速分解法的理论基础	195
8.2.3 快速分解法的计算流程	199
8.3 潮流计算中的灵敏度分析和分布因子	202
8.3.1 灵敏度分析的基本方法	202
8.3.2 潮流灵敏度矩阵	204
8.3.3 分布因子	208

8.4 小结	217
习题	218
第9章 潮流计算中的特殊问题	220
9.1 负荷的电压静态特性	220
9.2 节点类型的相互转换和多 $V\theta$ 节点问题	221
9.2.1 PV节点转换成PQ节点	221
9.2.2 PQ节点转换成PV节点	224
9.2.3 多 $V\theta$ 节点时的潮流计算	225
9.3 中枢点电压及联络线功率的控制	227
9.3.1 中枢点电压的控制	227
9.3.2 联络线功率的控制	229
9.4 潮流方程解的存在性、多值性以及病态潮流解法	230
9.4.1 潮流方程解的存在性和多值性	230
9.4.2 病态潮流及其解法	231
9.5 潮流方程中的二次型	232
9.6 连续潮流计算	234
9.6.1 连续潮流计算的基本原理	234
9.6.2 连续潮流计算的主要技术	235
9.7 小结	237
习题	238
第10章 潮流计算问题的扩展	241
10.1 概述	241
10.1.1 变量的划分	242
10.1.2 潮流方程	242
10.1.3 约束方程	243
10.2 潮流计算问题的扩展	245
10.2.1 常规潮流	245
10.2.2 约束潮流	245
10.2.3 动态潮流	246
10.2.4 随机潮流	248
10.2.5 最优潮流	250
10.2.6 开断潮流	251
10.3 最优潮流及其求解方法	252
10.3.1 最优潮流算法的分类	252

10.3.2	简化梯度法最优潮流	254
10.3.3	牛顿法最优潮流	259
10.3.4	有功无功交叉逼近最优潮流算法	260
10.3.5	基于内点法的最优潮流算法	262
10.3.6	关于最优潮流的经济目标函数	264
10.4	开断潮流及其求解方法	265
10.4.1	补偿法支路开断时的潮流计算	265
10.4.2	发电机开断的潮流计算	267
10.5	潮流跟踪算法	268
10.5.1	电力市场环境下的潮流跟踪问题	268
10.5.2	比例分配原则	269
10.5.3	潮流跟踪算法	269
10.5.4	无环流网络的节点排序	274
10.6	小结	275
	习题	275
第 11 章	对称分量法和相序网络	277
11.1	对称分量法	277
11.1.1	三相对称元件的单相模型表示	277
11.1.2	故障系统分析的对称分量法	280
11.1.3	相分量法和对称分量法的比较	283
11.2	电力系统元件的序参数和序网	284
11.2.1	同步发电机和负荷的序参数	284
11.2.2	输电线元件的序参数	285
11.2.3	变压器元件的序参数	287
11.2.4	电力系统的零序网络及零序节点导纳矩阵	293
11.3	故障电路的对称分量模型	294
11.3.1	横向故障电路的相分量模型	296
11.3.2	横向故障电路的序分量模型	296
11.3.3	纵向故障电路的相分量和序分量模型	298
11.4	小结	299
	习题	300