



国际电气工程先进技术译丛

Mc  
Graw  
Hill  
Education

# 架空输电线路电气设计

Electrical Design of Overhead Power  
Transmission Lines

马苏德·法泽内 (Masoud Farzaneh)

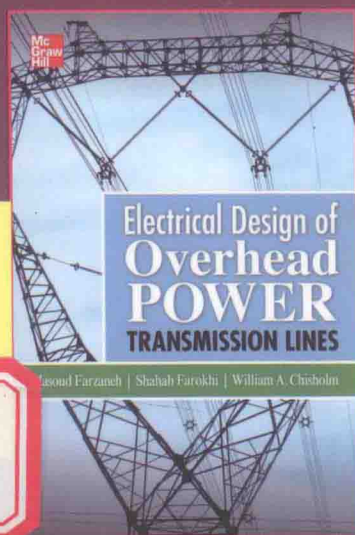
[加]

谢哈布·法若克 (Shahab Farokhi)

著

威廉 A. 奇泽姆 (William A. Chisholm)

蒋兴良 等译



- ◎ 本书由加拿大电力工程领域的著名专家撰写
- ◎ 包含有效设计架空输电线路的所有相关知识
- ◎ 通过理论成果解决实际问题

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

# 架空输电线路电气设计

Electrical Design of Overhead Power Transmission Lines

马苏德·法泽内 (Masoud Farzaneh)

[加] 谢哈布·法若克 (Shahab Farokhi) 著

威廉 A. 奇泽姆 (William A. Chisholm)

蒋兴良 尹芳辉 范才进 胡玉耀 董莉娜 汪泉霖 译

机械工业出版社

Masoud Farzaneh, Shahab Farokhi, William A. Chisholm. Electrical Design of Overhead Power Transmission Lines. ISBN: 978-0-07-1771917.

Copyright © 2013 by The McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and China Machine Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2016 by McGraw-Hill Education and China Machine Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可，对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播，包括但不限于复印、录制、录音，或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司和机械工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内（不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾）销售。

版权© 2016 由麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司与机械工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2013-7846 号。

## 图书在版编目（CIP）数据

架空输电线路电气设计/（加）马苏德·法泽内（Masoud Farzaneh）等著；蒋兴良等译. —北京：机械工业出版社，2016.9

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Electrical Design of Overhead Power Transmission Lines

ISBN 978-7-111-54851-5

I. ①架… II. ①马… ②蒋… III. ①架空线路—输电线路—电气设计—设计 IV. ①TM726.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 221864 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：付承桂 责任编辑：付承桂 任鑫

责任校对：张晓蓉 封面设计：马精明

责任印制：常天培

唐山三艺印务有限公司印刷

2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·26 印张·561 千字

0001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-54851-5

定价：99.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

本书的英文原版由电力工程领域的国际著名专家撰写，全面覆盖了有效设计架空输电线路要求熟知的所有相关知识。书中论述了电网的交流电路与时序电路、交流电力系统的矩阵分析法、输电线路模型、交流电网潮流迭代分析法、对称与非对称故障、电压与潮流控制、交流电网稳定性、高压直流输电（HVDC）、输电线路电场与电晕效应、输电线路雷击特性、输电线路绝缘配合、架空输电线路容量等内容。通过实际案例，阐明了如何应用理论知识解决实际问题的方法。希望本书的翻译能够为我国电气工程及其自动化专业的学生和从事输电线路设计与生产运行的工程技术人员，全面掌握架空输电线路设计与应用的所有相关知识提供一个全面、快捷的途径。

# 译 者 序

长期以来国内外一直十分重视和关注输电线路的电气设计。在过去的几十年里，国际上发生了多次严重的大面积停电事故，很多事故的原因很简单，或多或少与电气安全距离有关，如2003年8月14日美国东北部和加拿大的安大略省大停电事故，最初是由高温和低风期间架空输电线路弧垂过大引起的。因此，全面了解和掌握输电线路的电气设计极其重要，输电线路电气特性的有效和安全设计是电网安全运行的基本保障。

在2013年8月完成了本书作者的《覆冰与污秽绝缘子》一书的翻译工作后，原著作者就希望能够翻译《架空输电线路电气设计》。当时我认真阅读了英文原著，感觉内容非常丰富，基于作者长期讲课的知识总结，很有参考价值。但是本书包含了输电线路电气设计的所有相关知识，涉及的范围很广，需要时间消化和理解，以免译文与原著大相径庭，加上我自己的教学和科研任务重，所以从着手翻译到完稿花了将近三年的时间。

我国高等院校电气工程及其自动化专业一般都开设了电力系统稳态分析、暂态分析、高电压技术、电力电子技术、直流输电等多门课程。由于我国高等院校学生选课采取的选修制，很多电力系统及其自动化专业的学生选课并不全面，因此毕业后对架空输电线路电气设计的相关内容并不全面了解，就像原书中所说“我们同时代的很多工程师喜欢科幻作品类电视连续剧中所展现情景的星际旅行。但从几年前新闻中得知，目前了解虚构概念拖引光束的学生比了解真实电磁概念的学生还多，这多少有点令人不安”。本书最大的特点是以一种快捷、全面、系统的方式阐述了以上多门课程的基本知识，可以说是我国电气工程及其自动化专业多门课程的精简版本。本书全面覆盖了有效设计架空输电线路电气安全距离要求熟知的所有相关知识，除了涵盖电力系统电力潮流和稳定性分析外，还介绍了与天气有关的架空输电线路故障风险管理相关的主要问题。本书以简洁的方式介绍这些内容，从阐述绝缘配合和发热限值的相关概念开始，将读者引导到工业标准和参考资料，从而进一步拓展其知识范围。因此，本书可为我国电气工程及其自动化专业的学生和从事输电线路电气设计和生产运行的工程技术人员全面掌握架空输电线路线路设计与应用的所有相关知识提供一个全面、快捷的途径。

本书的第1章、第2章、第3章由博士研究生尹芳辉翻译；第4章由重庆电力

#### IV 架空输电线路电气设计

公司董莉娜翻译；第5章、第12章由博士研究生范才进翻译；第6章、第11章由博士研究生胡玉耀翻译；第7章由博士研究生汪泉霖翻译。本书的原书前言、致谢、第8章、第9章、第10章、第13章、第14章、第15章由蒋兴良翻译。全书由蒋兴良统稿和校核。本书各章后的习题也都给出了答案，但考虑到图书篇幅，这部分习题答案请联系机械工业出版社进行网上下载，联系方式 [fuchenggui52@163.com](mailto:fuchenggui52@163.com)，或扫描书后“E视界”的二维码进行联系下载。

由于文化的差异和译者水平有限，译文误解和误译之处在所难免，恳请读者谅解。

当然，由于作者所处的国度和环境与我国有差异，有些差异还是很明显的，所以其工程条件和工程环境与我国也有很大差异，采取的方法和技术路线与我国的情况也有所不同，这是在所难免的，恳请读者求同存异。

蒋兴良  
于重庆大学  
2016年7月

# 原书前言

电力系统是有史以来人类所构造的最复杂的系统之一。利用复杂的数学模型，构建、规划和扩展了电力系统，使其满足与服务于日益增长的人口对供电的要求。由20世纪留给我们的这个遗产（即电力系统），一方面为整个21世纪提供经济可靠的电力服务，另一方面也可能遭受越来越多的毁灭性的打击。在过去40年里全球所发生的五次最严重的停电事故中，其中就有三次发生于2000—2010年之间。在美国东北部和加拿大的安大略省，约5500万人口遭遇了2003年8月14日的大停电的影响，而这次事故的起因最初是由高温和低风期间架空输电线路弧垂过大引起的。这个意外偶然事故最终导致欠电压和过电流的稳定性问题，造成256台发电机被系统隔离5min。这次特大停电事故造成的经济损失超过60亿美元。但总体来看，美国每年因电力质量问题所产生的经济损失则是这次大停电事故所造成的经济损失的20倍，即电力质量问题产生的经济损失接近美国国内生产总值的1%。

与作者同时代的很多工程师喜欢科幻作品类电视剧中所展现情景的星际旅行。但从几年前的新闻中得知，目前了解虚构概念拖引光束的读者比了解真实电磁概念的读者还多，这多少有点令人不安。作为电工领域的读者，作者想请您参与探讨下面设置的问题，从而测试您对电磁学知识的掌握程度。如果电流同时通过两条并排平行的电线，它们会相互吸引还是相互排斥呢？本着这一目的，许多非专业人士兴奋地阅读了有关相量测量装置的布置以开发情景感知工具，用来对可能导致电力系统崩溃的情况进行早期识别。本书描述了相量是什么，说明了为什么它们在电力系统稳定性分析中是非常关键和敏感的量值，希望本书能够让读者对这些概念有一个清晰的认识，使得它们不再令人晕眩。

除了涵盖电力系统电力潮流和稳定性分析外，作者还介绍了与天气有关的架空输电线路故障风险管理相关的问题。本书以简洁的方式介绍这些内容，首先阐述了绝缘配合和发热限值的相关概念，然后将读者引导到工业标准和参考资料上以进一步拓展其知识范围。这些了解有助于帮助读者在工程中更好地利用现有的线路以及设计新的线路为人们服务。

本书主题的设计和完善是以作者在魁北克大学希库蒂米分校（UQAC）为工程专业学生讲课内容为基础的。尽管自20世纪80年代以来，大多数大学的电力工程专业日渐暗淡，而UQAC在魁北克水电局、加拿大政府以及国家科学与工程研

究理事会 (NSERC) 持续和热情的支持下, 在该领域的发展迅速并取得卓越成就。

作为一名电气工程专业的学生或者爱好者, 您有可能成为幸运的少数人之一, 接手从 2010—2020 年预计退休的 200000 名电力公司员工中的工作。您对用于管理电力基础设施的新的监测技术和通信系统的胜任能力在一定程度上取决于本书在何种程度上帮助您提高技能并激起您的好奇心以了解更多的知识。



# 致 谢

作者感谢 Joy Bramble, Molly Wyand, Aloysius Raj 和 McGraw Hill 公司的工作人员以及 UQAC 的 Denis Masson 对本书的组织、准备和出版过程提供的热情帮助和支持。

多位审稿人对本书的编写提出了独到的见解和宝贵的修改意见,其中包括 J. Stephen Barrett、Glen Davidson、John Kuffel、Tom McDermott、AzamNekahi 和 Emanuel Petrache。特别值得一提的是 AzamNekahi 对本书的例题进行了校对。

作者将此书献给他们的家人,感谢他们长久以来给予的鼓励、耐心和关爱。

**MASOUD FARZANEH**

**SHAHAB FAROKHI**

**WILLIAM A. CHISHOLM**

加拿大魁北克希库蒂米

加拿大安大略多伦多

# 目 录

译者序

原书前言

致谢

第1章 绪论 .....	1
1.1 电力系统发展历史 .....	1
1.2 现代电力系统结构 .....	2
1.3 现代输电系统的选择 .....	3
1.4 架空输电线路的组成部分 .....	5
1.5 本书结构 .....	6
1.5.1 学习基本目标 .....	6
1.5.2 与工业资源和标准的联系 .....	7
1.5.3 面向水平 .....	7
1.5.4 第1章 绪论 .....	8
1.5.5 第2章 电网的交流电路和序电路 .....	8
1.5.6 第3章 交流电力系统分析的矩阵法 .....	8
1.5.7 第4章 架空输电线路模型 .....	8
1.5.8 第5章 输电线路建模 .....	8
1.5.9 第6章 交流输电线路潮流分析迭代法 .....	9
1.5.10 第7章 对称性故障分析 .....	9
1.5.11 第8章 非对称故障 .....	9
1.5.12 第9章 电压与潮流控制 .....	9
1.5.13 第10章 交流电网的稳定性 .....	9
1.5.14 第11章 高压直流输电系统及柔性输电装置 .....	9
1.5.15 第12章 输电线路的电晕效应及电场效应 .....	10
1.5.16 第13章 输电线路的雷电特性 .....	10
1.5.17 第14章 输电线路绝缘配合 .....	10
1.5.18 第15章 架空线路导线的载流特性 .....	10
第2章 电网的交流电路和序电路 .....	12
2.1 引言 .....	12
2.2 单相电路 .....	12

2.2.1 单相电路功率 .....	12
2.2.2 复功率 .....	14
2.3 三相电路 .....	17
2.3.1 平衡三相电路 .....	17
2.3.2 不平衡三相电路 .....	21
2.4 单线图 and 单相等效电路描述 .....	26
2.5 标幺制 .....	27
2.5.1 定义 .....	27
2.5.2 标幺制的优点 .....	28
2.6 电力系统元件对称序阻抗 .....	30
2.6.1 对称负载阻抗 .....	30
2.6.2 同步发电机 .....	34
2.6.3 电力变压器 .....	36
2.6.4 传输线 .....	38
2.7 序网络 .....	39
思考题 .....	41
参考文献 .....	41
<b>第3章 交流电力系统分析的矩阵法 .....</b>	<b>42</b>
3.1 引言 .....	42
3.2 发电机和阻抗的表示 .....	42
3.3 节点分析法与节点导纳矩阵 ( $Y_{bus}$ ) .....	43
3.4 回路分析法与节点阻抗矩阵 ( $Z_{bus}$ ) .....	46
3.5 科龙节点缩减 (Kron Reduction) 消元法 .....	48
3.6 戴维南等效阻抗与阻抗矩阵 $Z_{bus}$ 的元素 .....	49
3.7 $Z_{bus}$ 的修正 .....	54
3.8 直接构建 $Z_{bus}$ 的算法 .....	57
思考题 .....	62
参考文献 .....	62
<b>第4章 架空输电线路参数 .....</b>	<b>63</b>
4.1 引言 .....	63
4.2 电阻 .....	63
4.2.1 直流电阻 .....	63
4.2.2 交流电阻 .....	64
4.3 电感 .....	65
4.3.1 双线式实心导体 .....	68

4.3.2	应用几何平均半径的复导线	69
4.3.3	等间距三相输电线路	72
4.3.4	不等间距三相输电线路	72
4.3.5	具有导线组的分裂导线输电线路	73
4.3.6	双回路输电线路	75
4.3.7	接地回线	77
4.4	电容	77
4.4.1	双实心导线线路	78
4.4.2	三相导线等间距的输电线路	79
4.4.3	三相导线不等间距的输电线路	80
4.4.4	采用自几何均距 (GMR) 的分裂导线	80
4.4.5	具有中性线和接地回线的输电线路	82
4.4.6	双回路输电线路	87
	思考题	88
	参考文献	88
<b>第5章</b>	<b>输电线路模型</b>	<b>89</b>
5.1	引言	89
5.2	二端口网络表示输电线路的方法	89
5.3	短输电线路模型	90
5.4	中等长度输电线路	95
5.5	长输电线路	98
5.5.1	采用指数形式表示	98
5.5.2	采用双曲函数形式表示	100
5.5.3	$\pi$ 形等效电路	105
5.6	输电线路潮流分布	105
5.6.1	最大潮流	106
5.6.2	波阻抗负载	106
5.6.3	费兰梯 (Ferranti) 效应	109
5.6.4	输电线路负载能力	111
	思考题	113
	参考文献	114
<b>第6章</b>	<b>交流输电线路潮流分析迭代法</b>	<b>115</b>
6.1	引言	115
6.2	电力潮流问题	115
6.3	高斯-塞德尔分析方法	117

6.4	牛顿-拉夫逊法 .....	127
6.5	解耦牛顿-拉夫逊潮流功率 .....	136
6.6	快速解耦牛顿-拉夫逊潮流功率 .....	137
	思考题 .....	140
	参考文献 .....	141
<b>第7章</b>	<b>对称性故障分析 .....</b>	<b>142</b>
7.1	引言 .....	142
7.2	R-L 串联电路故障 .....	142
7.3	连接单台同步发电机的空载线路故障 .....	146
7.4	连接单台同步发电机的带负载线路故障 .....	151
7.5	电网系统故障 .....	154
7.5.1	采用同步发电机电动势计算电网系统故障 .....	154
7.5.2	采用戴维南等效电路计算网络系统故障 .....	157
7.5.3	利用母线节点阻抗矩阵 $Z_{bus}$ 计算电网系统故障 .....	158
	思考题 .....	165
	参考文献 .....	166
<b>第8章</b>	<b>非对称性故障 .....</b>	<b>167</b>
8.1	引言 .....	167
8.2	非对称性故障的类型 .....	167
8.3	采用序网路互连的故障计算方法 .....	168
8.3.1	单相接地(线对地)短路故障 .....	171
8.3.2	两相或线对线短路(L-L)故障 .....	175
8.3.3	两相短路接地(L-L-G)故障 .....	177
8.3.4	开路故障 .....	180
	思考题 .....	182
	参考文献 .....	183
<b>第9章</b>	<b>电压与潮流控制 .....</b>	<b>184</b>
9.1	引言 .....	184
9.2	无功功率的产生与吸收 .....	184
9.2.1	负载 .....	184
9.2.2	架空输电线路 .....	184
9.2.3	地下电缆 .....	185
9.2.4	电力变压器 .....	185
9.2.5	电容器组 .....	185

## XII 架空输电线路电气设计

9.2.6 并联电抗器	185
9.2.7 同步电机	185
9.3 串联补偿	186
9.4 并联补偿	190
9.4.1 并联电容器	191
9.4.2 并联电抗器	193
9.5 电压控制方法	195
9.5.1 发电机励磁控制系统	195
9.5.2 无功功率注入	196
9.5.3 可调分接头的变压器	197
思考题	202
参考文献	203
<b>第10章 交流电网的稳定性</b>	<b>204</b>
10.1 引言	204
10.2 同步电机动力学特性及其转子运动方程	204
10.3 静态稳定性	209
10.4 暂态稳定性	213
10.4.1 等面积法则	214
10.4.2 转子运动方程数值解	228
10.5 提高系统稳定性的措施	233
10.5.1 快速重合闸	233
10.5.2 断路器的单极运行	233
10.5.3 静态稳定性极限的提高	233
10.5.4 快速切除故障	233
10.5.5 快速励磁系统	233
10.5.6 快速调阀	233
10.5.7 HVDC 连接	234
思考题	234
参考文献	234
<b>第11章 高压直流输电系统及柔性输电装置</b>	<b>235</b>
11.1 引言	235
11.2 高压直流输电的历史	235
11.3 特性与缺陷	237
11.4 换流器	238
11.4.1 整流器	239

11.4.2 逆变器 .....	248
11.5 高压直流输电线路 .....	249
11.5.1 基本结构配置 .....	249
11.5.2 运行与控制 .....	251
11.5.3 滤波器和电容器组 .....	253
11.5.4 背靠背换流站 .....	254
11.6 柔性交流输电系统 (FACTS) .....	254
11.6.1 晶闸管控制器 .....	255
11.6.2 基于变流器的控制器 .....	256
思考题 .....	258
参考文献 .....	259
<b>第 12 章 输电线路的电晕效应及电场效应</b> .....	<b>260</b>
12.1 引言 .....	260
12.2 电晕特性 .....	260
12.3 单根导线初始电晕的计算 .....	262
12.4 分裂导线表面电位梯度的计算 .....	267
12.5 电晕损失 .....	269
12.6 电磁干扰 .....	272
12.6.1 无线电干扰 .....	272
12.6.2 电视干扰 .....	274
12.6.3 数字无线电系统的干扰 .....	276
12.7 可听噪声 .....	276
12.8 电晕风及其振动效应 .....	278
12.9 电晕试验 .....	278
12.10 超高压与特高压输电系统的发展 .....	279
思考题 .....	280
参考文献 .....	281
<b>第 13 章 输电线路的雷击特性</b> .....	<b>282</b>
13.1 引言 .....	282
13.2 雷电冲击特性 .....	282
13.3 雷电冲击电流幅值的统计特性 .....	284
13.4 输电线路的雷击 .....	287
13.5 雷电防护 .....	290
13.6 输电线路的架空地线防雷 .....	292
13.6.1 架空地线 .....	294

13.6.2	绕击率计算	295
13.6.3	绕击闪络率计算方法	299
13.6.4	采用避雷器降低绕击闪络率	300
13.7	杆塔结构的接地	303
13.7.1	跨步电压与接触电压	304
13.7.2	三端接地电阻测试: 电位降法	305
13.7.3	三端接地电阻测试: 斜探针法	306
13.7.4	土壤电阻率与电阻的关系	307
13.8	反击跳闸率的计算方法	310
13.8.1	绝缘相耦合电压的计算	310
13.8.2	杆塔电感电位升高的计算	312
13.8.3	塔基阻抗电位升高的计算	313
13.8.4	雷电反击率计算	315
	思考题	317
	参考文献	318
<b>第14章 输电线路绝缘配合</b>		<b>319</b>
14.1	引言	319
14.2	绝缘配合的统计特性	319
14.2.1	数据分布的分类方法	319
14.2.2	单串绝缘子闪络的正态分布	321
14.2.3	并联绝缘子串闪络的正态分布	323
14.2.4	对数分布	326
14.2.5	威布尔(Weibull)分布	328
14.2.6	干布尔(Gumbel)分布	329
14.3	电气强度的统计特性	331
14.3.1	空气中的闪络过程	331
14.3.2	空气间隙的操作冲击闪络强度	331
14.3.3	电力系统中空气间隙闪络电压强度	335
14.3.4	绝缘子串的雷电冲击闪络强度	336
14.3.5	湿润污秽绝缘子表面的交流闪络过程	338
14.3.6	覆冰污秽绝缘子表面的交流闪络过程	341
14.4	电气强度和环境影响因素的统计特性	342
14.4.1	操作冲击	342
14.4.2	雷电冲击	344
14.4.3	绝缘子表面污染	347
14.4.4	湿沉降的电导率	347



14.4.5 气候因素 .....	348
14.5 绝缘配合 .....	349
14.5.1 绝缘配合的惯用法: 污秽地区绝缘子泄漏距离选择 .....	349
14.5.2 单因素作用的统计方法——操作过电压 .....	351
14.5.3 双因素作用的惯用/统计方法——风偏摆动与操作过电压 .....	354
14.5.4 非直接相关的双因素统计方法——接地电阻和雷电流峰值 .....	359
14.5.5 非直接相关的三因素统计方法——绝缘子污秽、冰水电导率与冰厚 .....	361
思考题 .....	363
参考文献 .....	364
<b>第 15 章 架空输电线路导线的载流特性 .....</b>	<b>365</b>
15.1 引言 .....	365
15.2 架空输电线路导线材料 .....	365
15.3 输电线路绞线 .....	367
15.4 钢芯铝绞线 (ACSR) 的截面积 .....	368
15.5 钢芯铝绞线 (ACSR) 的直流电阻 .....	370
15.6 钢芯铝绞线的交流电阻 .....	371
15.7 钢芯铝绞线 (ACSR) 的机械性能 .....	374
15.8 单档导线弧垂与张力的关系 .....	379
15.9 温度对导线弧垂和张力的影响 .....	382
15.10 多档线路导线弧垂与张力的关系 .....	384
15.11 线路运行状态与额定容量 .....	389
15.12 输电线路导线载流量的计算方法 .....	391
15.13 大载流量导线 .....	395
思考题 .....	396
参考文献 .....	397