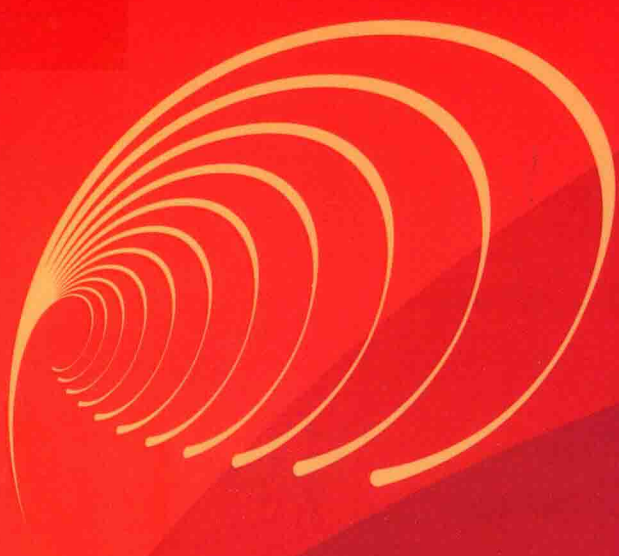




智能电网 关键技术研究与应用丛书

高效可再生能源 发电系统及并网技术

(原书第2版)

Renewable and Efficient
Electric Power Systems,
Second Edition

[美] 吉尔伯特·M. 马斯特斯 (Gilbert M. Masters) 著
王宾 杨尚霖 龚立娇 译

智能电网关键技术研究与应用丛书

高效可再生能源发电系统及 并网技术（原书第2版）

Renewable and Efficient Electric Power Systems, Second Edition

[美] 吉尔伯特·M. 马斯特斯 (Gilbert M. Masters) 著

王宾 杨尚霖 龚立娇 译

机械工业出版社

Copyright © 2013 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Renewable and Efficient Electric Power Systems, Second Edition, ISBN: 978-1-118-14062-8, by Gilbert M. Masters, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copy-rights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2014-2698 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

高效可再生能源发电系统及并网技术: 原书第 2 版/ (美) 吉尔伯特·M. 马斯特斯 (Gilbert M. Masters) 著; 王宾, 杨尚霖, 龚立娇译. —北京: 机械工业出版社, 2019. 6

(智能电网关键技术研究与应用丛书)

书名原文: Renewable and Efficient Electric Power Systems, 2nd Edition
ISBN 978-7-111-62100-3

I. ①高… II. ①吉… ②王… ③杨… ④龚… III. ①再生能源-发电-研究 IV. ①TM619

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 103499 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: 吕 潇

责任校对: 樊钟英 封面设计: 鞠 杨

责任印制: 张 博

北京铭成印刷有限公司印刷

2019 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 29.5 印张 · 609 千字

0 001—1 900 册

标准书号: ISBN 978-7-111-62100-3

定价: 150.00 元

电话服务

网络服务

客服电话: 010-88361066

机 工 官 网: www.cmpbook.com

010-88379833

机 工 官 博: weibo.com/cmp1952

010-68326294

金 书 网: www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版

机工教育服务网: www.cmpedu.com

► 关于本书

本书介绍了高效可再生能源发电系统及并网技术，理论与实用性并重，内容主要包含电力系统、光伏发电和风力发电系统，以及其他可再生能源发电技术三部分。第一部分从电路的基本原理出发，由浅入深地给出了比如功率因数、三相电力系统、电能质量等专业知识点，也特别回顾了现代电力工业的发展历程和相关政策法规的演化史，使读者能尽快地掌握和熟悉电力系统的基本原理和发展历史；第二和第三部分内容主要涉及高效可再生能源发电系统关键技术，包括将太阳能转换为电能的光伏组件及光伏发电、光伏抽水等应用系统技术，风能和风力发电系统的相关技术，以及近年来新兴的光热发电、波浪能发电、潮汐能发电、水力发电、生物质发电、地热发电、抽水蓄能发电等技术。最后以智能电表两侧的可再生能源发电系统与并网电力系统的运行经济性分析为切入点，针对性地介绍了需求侧响应、热电联产、电能储能、燃料电池等关键技术。

► 本书作者

Gilbert M. Masters 斯坦福大学电气工程专业博士学位，主要从事能源与环境，特别是高效可再生能源方向的相关教学工作。目前他是斯坦福大学土木与环境工程专业的名誉教授，已经出版了多部关于环境工程的著作。

本书介绍了高效可再生能源发电系统及并网技术，理论与实用性并重，内容主要包含电力系统、光伏发电和风力发电系统，以及其他可再生能源、能源效率和智能电网三部分。第一部分内容从电路的基本原理出发，由浅入深地给出了诸如功率因数、三相电力系统、电能质量等专业知识点，也特别回顾了现代电力工业的发展历程和相关政策法规的演化史，使读者能尽快地掌握和熟悉电力系统的基本原理和发展历史；第二和第三部分内容主要涉及高效可再生能源发电系统关键技术，包括将太阳能转换为电能的光伏组件及光伏发电、光伏抽水等应用系统技术，风能和风力发电系统的相关技术，以及近年来新兴的光热发电、波浪能发电、潮汐能发电、水力发电、生物质发电、地热发电、抽水蓄能发电等技术。最后以智能电表两侧的可再生能源发电系统与并网电力系统的运行经济性分析为切入点，针对性地介绍了需求侧响应、热电联产、电能储能、燃料电池等关键技术。

本书可作为电气和机械工程本科生和研究生的教科书，但由于它内容非常丰富，也可以作为相关专业的工程技术人员、研究人员和能源决策人员的参考资料。

译者的话

时光飞梭，十年前翻译原书英文第1版时，以光伏发电、风电为代表的可再生能源新技术研究在国内正如火如荼地进行着，自己也刚刚进入到此领域，初生牛犊不怕虎，执笔完成了第1版的翻译工作。

当时咿呀学语的儿子现在已经长成了一米六的小伙子了，原书也推出了英文第2版。我尤为喜欢国外专著的这种系统全面、娓娓道来、细致入微的感觉，尽管翻译工作困难重重，还是承接了下来。

英文第2版增补了较多的新内容，虽然有第1版译稿作为基础，但仍花费了相当大的精力。感谢石河子大学机械电气工程学院“灵活消纳新能源并网电力系统故障检测与保护”团队的支持与鼓励，一起完成了原书第2版的翻译工作。

清华大学电机系王宾博士提供了第1版的译稿，石河子大学机械电气工程学院龚立姣博士负责翻译了第1~5章初稿，石河子大学机械电气工程学院杨尚霖翻译了第6~9章初稿，最后由王宾负责全文的统稿和校对。此外还要特别感谢我的爱人——清华大学科研院宋洁高级工程师在翻译过程中给予的支持和鼓励，她不仅承担了更多的家务能让我心无旁骛地工作，还从电气工程专业的角度提出了很好的建议。

本书中的物理量、图形符号与文字符号均采用了英文原书中的样式，未必与我国现行标准一致。由于译者水平所限，对部分技术理解也不全面，翻译过程中难免出现差错，敬请读者指正。

王宾

于清华园

2019年7月

原 书 前 言

本书从实用性的角度量化分析、全面介绍了多种不同类型的可再生能源系统。对于每一种可再生能源系统，都会介绍其理论背景，给出与系统设计和性能分析有关的实际工程参数，以及评价该系统效益的经济方法。本书重点介绍了目前发展最快、最有前景的风能和太阳能技术，此外也介绍了潮汐和波浪发电、地热、生物质能、水电和储能等技术。本书的最后一章介绍了连接供需双方需求的智能电网技术。

本书的目标读者是工程技术人员和其他关注该技术的不同类型读者。例如，我在斯坦福大学讲授的该内容课程就没有先修要求，选修该课程的学生中大约一半是本科生，一半是研究生。目前几乎所有学生都来自工科和理科，但是商科学生也越来越多。本书旨在提供大量完整的、贯穿始终的举例，来鼓励读者自学。书中几乎每一种适合定量分析的可再生能源系统都用这样的举例方式进行讲述。

这是本书的第2版，与第1版相比，内容进行了更新和重组，补充了大量新素材，既有以新章节形式出现的，也有在第1版既有章节基础上深化补充的内容。新内容包括了波浪能和潮汐能发电、抽水蓄能、智能电网和地热发电等。本书也增补了电气工程基础知识的介绍，以便于过渡到电气工程领域的其他高级课程，内容包括相量法、无功功率和有功功率、直流-直流变换和直流-交流变换器件，以及发电机等相关技术。可再生能源系统不仅涉及流行的电气及控制技术，而且已经成为了一项庞大的产业。在这一版中，也对大规模常规和可再生能源项目的财务分析进行了更多的深入探讨。

本书由三部分组成：

- I. 电力工业背景介绍（第1~3章）；
- II. 光伏发电和风力发电系统（第4~7章）；
- III. 其他可再生能源、能源效率和智能电网（第8、9章）。

I. 电力工业背景介绍（第1~3章）：主要介绍了电力工业相关技术（第1章），包括常规发电厂技术、电网的监管和运行技术，以及核准发电成本等财务知识。对于刚接触基础电气元件和电路的读者，或者需要快速复习该部分知识的读者，请参阅第2章，可以让具备中专水平的读者快速掌握这些电气基本知识。

对于已经掌握了电气基础知识的学生，可跳过第2章，直接学习第3章，第3章为非电气工程专业的学生提供了电气工程高级课程的相关知识。目前，许多以往不太重视电气工程专业的学校对这一领域的关注度也日益增长。

II. 光伏发电和风力发电系统（第4~7章）：这部分内容是本书的核心。第4章介绍了太阳能资源，包括太阳高度角、日照遮蔽问题、晴天日照强度、直接和间

接太阳辐射（集中式太阳能技术），以及针对某一地点，如何用典型气象年的每小时太阳能数据来开展分析工作。

第5章介绍了光伏材料以及电池、模块和阵列的电气特性。有了这些背景知识，读者可以理解云遮对光伏性能产生的巨大影响，以及如何使用现代电力电子技术来降低这些影响。

第6章介绍的是光伏发电系统，包括与公共电网并网运行的可独立电量计量的屋顶光伏发电系统，以及带有电池储能的离网运行光伏发电系统。目前，市场上占主导地位的是并网型的光伏发电系统，但是具备微网运行能力的离网式光伏发电系统开始对供电市场产生越来越大的影响。这两种类型的光伏发电系统的经济性都受到了很大的关注。

第7章介绍了风力发电系统，包括风资源的统计特性、风力发电技术的最新进展以及如何有效地结合两者来实现优异的风力发电出力特性。风力发电目前在可再生能源市场占据着主导地位，数十亿美元的投资资金流入到了该领域，因此本章对此类投资的财务分析给予了重点关注。

Ⅲ. 其他可再生能源、能源效率和智能电网（第8、9章）：第8章介绍了包含蓄热装置的聚焦式太阳能发电系统，可真正意义上实现电力输出可调控。还介绍了两种新兴的海洋发电技术：潮汐能发电和波浪能发电。它们在一定程度上表现出了相当可观的应用前景，原因是它们的功率输出变化比风能和太阳能更易预测。这一章还介绍了水力发电，包括微型水力发电系统（同样适用于新兴市场）和抽水蓄能系统，它们可为其他类型出力波动的可再生能源提供备用电力。在这一章的最后，介绍了生物质发电和地热发电系统。

第9章以计量电表的两侧为分界，描述了可再生能源的出力变化与具备需求响应能力的可控负荷相互作用时遇到的系列问题。本章先介绍了智能电网相关知识，随后介绍了电网高级控制所需要的先进计量设施和技术，以及如何有效控制负荷的需求响应以应对可再生能源出力的变化。本章还介绍了蓄电池在电动汽车中的作用，并阐明了需求侧管理、电能高效使用、燃料电池和热电联产系统都是未来供需平衡的关键技术。

本书已经写了四十多年，从丹尼斯·海耶斯和1970年首次确立的“地球日”对我的影响开始，我的职业生涯从半导体和计算机技术转变为了环境工程。后来，阿莫里·洛文斯的开创性论文《软能源之路：未走的道路？》（Foreign Affairs, 1976）使我对学术的关注集中到了能源与环境之间的关系，以及可再生能源和效率在迎接未来挑战中必须发挥的重要作用。加州大学伯克利分校的阿特·罗森菲德的深入分析，以及自然资源保护委员会的拉尔夫·卡瓦纳赫敏锐的观点，一直是指导我和我灵感的源泉。这些人和其他的先驱们照亮了这条道路，但这些年来，一直是斯坦福大学课堂上那些勇于挑战、执着、充满热情的学生们让我精力充沛、兴奋并充满力量，我对他们的激励和友谊深表感激。最后，我要特别感谢我的老朋友

和同事——简·伍德沃德，她的慷慨支持使我能够继续在这个喜欢的领域中耕耘。我还要特别感谢一些人，他们对本书第2版的部分章节提供了帮助。卡迪夫大学的尼克·詹金斯教授在斯坦福大学教授的课程使我提升了对电力系统相关知识的理解。博士生（现已毕业）埃里克·斯托滕堡、伊莱恩·哈特和迈克·德沃夏克为我提供了关于风力、潮汐和波浪动力的有益见解。来自国际太阳系公司的埃里克·扬伦提供的设计指南，帮助我了解了离网光伏系统的实际情况。罗伯特·康罗伊和亚当·拉乌多尼斯两名学生，开发了我用来制作阴影图的网站。我的老朋友，如今在SunPower公司工作的鲍勃·雷丁格，一直是我在可再生能源金融和商业方面的专家。弗雷德·泽西斯仔细核对了手稿，把我从许多尴尬的小错误中拯救了出来，非常感谢他。最后，让我举起酒杯，就像四年来几乎每天晚上做的那样，敬我的妻子玛丽，她是我生命中的阳光。

吉尔伯特·M. 马斯特斯

斯坦福大学

2013年4月

目 录

译者的话

原书前言

第1章 美国电力工业史	1
1.1 电磁学：电力基本知识	1
1.2 爱迪生和西屋的早期之争	2
1.3 电力公司的监管制度	4
1.3.1 1935年公用事业控股公司法案	4
1.3.2 1978年公用事业管理政策法案	5
1.3.3 公用发电与自用发电	5
1.3.4 向非公用事业发电厂开放电网	6
1.3.5 竞争性市场的出现	7
1.4 电力基础设施：电网	11
1.4.1 北美电网	11
1.4.2 电力供需平衡	13
1.4.3 电网稳定性	16
1.4.4 行业数据	17
1.5 电力基础设施：发电	20
1.5.1 基荷蒸汽发电厂	21
1.5.2 燃煤蒸汽发电厂	22
1.5.3 燃气轮机发电	25
1.5.4 联合循环发电厂	26
1.5.5 综合气化联合循环发电厂	26
1.5.6 核能发电	28
1.6 常规发电厂相关财务知识	31
1.6.1 年度固定成本	31
1.6.2 均化发电成本	33
1.6.3 筛选曲线	35
1.6.4 负荷时间曲线	36
1.6.5 碳成本和其他外部费用	39
1.7 小结	40
参考文献	40
第2章 电路、磁路基础	42
2.1 电路简介	42
2.2 重要电气量定义	43
2.2.1 电荷	43

2.2.2	电流	43
2.2.3	基尔霍夫电流定律	44
2.2.4	电压	46
2.2.5	基尔霍夫电压定律	46
2.2.6	功率	47
2.2.7	功(能量)	47
2.2.8	小结	48
2.3	理想电压源、电流源	48
2.3.1	理想电压源	48
2.3.2	理想电流源	49
2.4	电阻	49
2.4.1	欧姆定律	49
2.4.2	电阻串联	50
2.4.3	电阻并联	51
2.4.4	分压器	52
2.4.5	导线电阻	53
2.5	电容	57
2.6	磁路简介	59
2.6.1	电磁变换	59
2.6.2	磁路	60
2.7	电感	62
2.7.1	电感的物理特性	62
2.7.2	电感的电磁特性	64
2.8	变压器	66
2.8.1	理想变压器	67
2.8.2	励磁损耗	69
第3章	电力系统基础	72
3.1	电压和电流有效值	72
3.2	正弦电压激励下的理想元件	74
3.2.1	理想电阻	74
3.2.2	理想电容	76
3.2.3	理想电感	78
3.2.4	阻抗	79
3.3	功率因数	82
3.3.1	功率三角形	83
3.3.2	功率因数调整	85
3.4	单相三线制居民供电	86
3.5	三相供电系统	89
3.5.1	对称性Y联结供电系统	89

3.5.2 Δ 联结三相供电系统	94
3.6 同步发电机	95
3.6.1 旋转磁场	96
3.6.2 同步发电机相量模型	98
3.7 输电和配电	99
3.7.1 输电网损	99
3.7.2 输电系统中的无功功率 Q	102
3.7.3 有功功率和无功功率对线路压降的影响	103
3.8 电能质量	106
3.8.1 谐波简介	107
3.8.2 总谐波畸变	109
3.8.3 谐波与中线过载	110
3.8.4 变压器内部谐波	112
3.9 电力电子学	112
3.9.1 交流-直流变换	112
3.9.2 直流-直流变换	115
3.9.3 直流-交流逆变	119
3.10 背靠背电压源变换器	121
参考文献	122
第4章 太阳能资源	123
4.1 太阳光谱	123
4.2 地球轨道	126
4.3 正午太阳高度角	128
4.4 一天中任意时刻的太阳位置	131
4.5 用于遮蔽分析的太阳轨迹图	134
4.6 利用阴影图进行遮蔽分析	136
4.7 太阳时与时钟时	139
4.8 日升日落	141
4.9 晴天太阳直射	143
4.10 晴天日照强度	146
4.10.1 直射辐射	146
4.10.2 散射辐射	147
4.10.3 反射辐射	149
4.10.4 太阳跟踪系统	150
4.11 月均晴天日照强度	155
4.12 太阳辐射测量	159
4.13 正常环境下日照强度	162
4.13.1 太阳能采集板上的典型气象年日照强度	162
4.14 月均日照强度	165

参考文献	172
第5章 光伏材料及电气特性	173
5.1 简介	173
5.2 半导体基本原理	174
5.2.1 带隙能	175
5.2.2 带隙能对光伏效率的影响	178
5.2.3 PN 结	180
5.2.4 PN 结二极管	182
5.2.5 通用光伏电池	184
5.3 光伏材料	185
5.3.1 晶体硅	185
5.3.2 非晶硅	188
5.3.3 砷化镓	189
5.3.4 碲化镉	190
5.3.5 铜铟镓硒	191
5.4 光伏电池的等效电路	192
5.4.1 光伏电池的简化等效电路	192
5.4.2 光伏电池的精确等效电路	194
5.5 从电池单元到模块、阵列	197
5.5.1 从电池单元到电池模块	198
5.5.2 从光伏电池模块到光伏阵列	200
5.6 标准测试条件下的光伏电池电流-电压曲线	201
5.7 温度和日照强度对电流-电压曲线的影响	204
5.8 遮蔽对电流-电压曲线的影响	206
5.8.1 光伏电池被遮蔽的物理原理	206
5.8.2 采用旁路二极管和阻流二极管改善遮蔽影响	209
5.9 最大功率点跟踪器	212
5.9.1 降压-升压变换器	212
5.9.2 最大功率点跟踪控制器	216
参考文献	219
第6章 光伏发电系统	220
6.1 简介	220
6.2 电表用户侧的并网光伏发电系统	220
6.2.1 并网光伏发电系统组件	220
6.2.2 微型逆变器	222
6.2.3 净电能计量和上网电价	224
6.3 光伏发电系统性能预测	225
6.3.1 与温度无关的光伏发电功率降额	225
6.3.2 与温度相关的光伏发电功率降额	229

6.3.3 光伏发电系统运行的“峰值小时”预测方法	232
6.3.4 估算光伏电池标准化发电量	234
6.3.5 光伏并网系统的容量系数	235
6.3.6 实际设计中需考虑的相关事项	236
6.4 光伏发电系统相关经济问题	239
6.4.1 光伏发电系统成本	239
6.4.2 摊销成本	241
6.4.3 现金流分析	244
6.4.4 居民的电费费率结构	246
6.4.5 商业和工业的电费费率结构	248
6.4.6 商业建筑光伏发电系统的经济性	250
6.4.7 购电协议	251
6.4.8 具备公网供电容量的光伏发电系统	252
6.5 带储能的独立光伏发电系统	253
6.5.1 独立光伏发电系统相关组件	254
6.5.2 自控式光伏电池模块	255
6.5.3 负荷预测	257
6.5.4 假设带有最大功率点跟踪器开始光伏电池阵列设计	260
6.5.5 电池	262
6.5.6 铅酸电池基本原理	263
6.5.7 电池存储容量	265
6.5.8 用库仑效率代替能量效率	268
6.5.9 电池容量设计	269
6.5.10 不带最大功率点跟踪器的光伏电池阵列设计	272
6.5.11 简单的设计模板	274
6.5.12 独立光伏发电系统的成本	277
6.6 光伏抽水系统	279
6.6.1 光伏抽水系统的电气部分	280
6.6.2 液压泵特性曲线	281
6.6.3 液压系统特性曲线	284
6.6.4 综合性能预测	287
参考文献	289
第7章 风力发电系统	291
7.1 风力发电的发展史	291
7.2 风力机技术：风轮	295
7.3 风力机技术：风力发电机	298
7.3.1 定速同步发电机	298
7.3.2 笼型感应发电机	299
7.3.3 双馈感应发电机	301

7.3.4 变速同步发电机	301
7.4 风能	302
7.4.1 空气密度的温度和高度校正	304
7.4.2 塔筒高度的影响	306
7.5 风力机输出功率曲线	309
7.5.1 贝茨极限	309
7.5.2 理想风电机组输出功率曲线	311
7.5.3 实际功率曲线	312
7.5.4 国际电工委员会对风电机组的分类	315
7.5.5 风速测量	316
7.6 平均风功率密度	317
7.6.1 离散风速直方图	317
7.6.2 风电概率密度函数	320
7.6.3 威布尔和瑞利统计	321
7.6.4 利用瑞利统计计算平均风功率密度	322
7.6.5 风力分级	324
7.7 风电机组发电量估算	325
7.7.1 风速累积分布函数	326
7.7.2 实际功率曲线的威布尔统计	328
7.7.3 一种估算容量系数的简便方法	333
7.8 风电场	337
7.8.1 陆上可开发利用的风能	337
7.8.2 海上风电场	343
7.9 风力发电的经济效益	348
7.9.1 风力发电的年均电价	348
7.9.2 带有改进的加速成本回收系统和生产税抵减的平准化能源成本	351
7.9.3 风电系统的债务与股权融资	354
7.10 风力发电对环境的影响	356
参考文献	357
第8章 更多类型可再生能源发电系统	358
8.1 引言	358
8.2 聚焦式光热发电系统	358
8.2.1 热机的卡诺效率	359
8.2.2 直接日照强度	360
8.2.3 聚焦式光热发电系统的冷凝器冷却	362
8.2.4 聚焦式光热发电系统的热能存储	364
8.2.5 线性槽式光热发电系统	366
8.2.6 塔式光热发电系统	368
8.2.7 线性菲涅耳反射式光热发电系统	370

8.2.8 碟式斯特林光热发电系统	371
8.2.9 聚焦式光热发电系统技术总结	374
8.3 波浪能发电	376
8.3.1 波浪能源	376
8.3.2 波浪能发电技术	380
8.3.3 波浪能发电性能预测	381
8.3.4 波浪能发电的未来	383
8.4 潮汐能发电	384
8.4.1 潮汐能发电基本原理	384
8.4.2 引发潮汐的原因	385
8.4.3 估算潮汐功率	387
8.4.4 估算潮汐能发电功率	390
8.5 水力发电	391
8.5.1 水力发电系统结构	392
8.5.2 水力发电的基本原理	393
8.5.3 水轮机	395
8.5.4 损耗计算	397
8.5.5 微型水电系统的流量测量	398
8.5.6 微型水轮机的电气特性	399
8.6 抽水蓄能发电	400
8.7 生物质发电	402
8.8 地热发电	404
参考文献	407
第9章 以计量电表为分界的两侧系统	408
9.1 引言	408
9.2 智能电网	409
9.2.1 配电自动化系统	409
9.2.2 电压/无功功率优化	410
9.2.3 电网控制优化	411
9.2.4 智能电表	413
9.2.5 需求侧响应	414
9.2.6 动态调度	415
9.3 电能存储	417
9.3.1 固定式蓄电池存储	417
9.3.2 电动汽车与移动式电池存储	419
9.4 需求侧管理	421
9.4.1 传统电价定价模式导致的不利影响	422
9.4.2 有效需求侧管理的必要条件	423
9.4.3 需求侧管理的成本-效益措施	425