

中国电气工程大典编辑委员会



CHINA ELECTRICAL
**中国电气
工程大典**
ENGINEERING CANON

第 **7** 卷

能源发电工程

主编 严陆光 顾国彪 贺德馨
孔力 陈勇



 中国电力出版社
www.cepp.com.cn

CHINA ELECTRICAL

中国电气 工程大典

ENGINEERING CANON

中国电气工程大典编辑委员会

第 7 卷

可再生能源发电工程

主编 严陆光 顾国彪 贺德馨
孔 力 陈 勇



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

《中国电气工程大典》是由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会共同组织全国电气工程各领域的著名专家、学者编纂而成的。它是一部全面系统反映电气工程各领域最新成就和技术水平的综合性工具书。《中国电气工程大典》包括现代电气工程基础、电力电子技术、电气工程材料及器件、火力发电工程、水力发电工程、核能发电工程、可再生能源发电工程、电力系统工程、电机工程、输变电工程、配电工程、船舶电气工程、交通电气工程、建筑电气工程、电气传动自动化15卷。

本书为第7卷，可再生能源发电工程卷。主要内容包括概论、太阳能光伏发电技术、太阳热发电、风力发电、生物质能发电、海洋能发电、地热发电。

本书主要供电气工程领域技术人员和管理人员使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国电气工程大典. 第7卷, 可再生能源发电工程 / 严陆光等主编; 中国电气工程大典编辑委员会编. —北京: 中国电力出版社, 2009
ISBN 978-7-5083-8421-4

I. 中… II. ①严…②中… III. ①电力工程-中国②再生资源: 能源-发电-中国 IV. TM TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 013808 号

中国电力出版社出版发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010年1月第1版 2010年1月北京第1次印刷

880mm×1230mm 1/16 · 42.625印张 · 1893千字 · 1插页

定价 220.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

中国电气工程大典

编辑委员会

- 主 任：**陆燕荪 原机械工业部副部长、教授级高级工程师
中国机械工程学会名誉理事长
- 陆延昌 原电力工业部副部长、教授级高级工程师
中国电机工程学会理事长
- 执行主任：**周鹤良 原机械工业部电工局局长、教授级高级工程师
中国电工技术学会名誉理事长
- 宋天虎 原机械工业部科技司司长、教授级高级工程师
中国机械工程学会常务副理事长
- 副 主 任：**潘崇义 中国电工技术学会副理事长、教授级高级工程师
- 吴玉生 中国电机工程学会秘书长、教授级高级工程师
- 邴凤山 中国水力发电工程学会副理事长、教授级高级工程师
- 严宏强 中国动力工程学会秘书长、教授级高级工程师
- 宗 健 中国电力出版社有限公司董事长、总经理、编审

委 员：(按姓氏笔画排列)

丁 杰	卜广全	于 龙	于坤山	于 明	于新颖	马小亮	马文忠	马伟明	马伟斌
马旭东	马济泉	马晓茜	马隆龙	丰镇平	王之杰	王为民	王正鸣	王占奎	王永骥
王成山	王兆安	王志峰	王作民	王国海	王明渝	王金元	王学伟	王泽忠	王建生
王建华	王绍武	王春华	王厚余	王炳忠	王 勇	王素英	王振铭	王 乘	王维洲
王景芹	王 强	王锡凡	王新新	王黎明	王德宽	王赞基	文习山	文劲宇	方晓燕
方 磊	尹天文	邓长胜	孔 力	孔伯汉	孔昭年	石萍萍	卢 强	卢澎湖	叶奇蓁
田东强	田培斌	史进渊	史毓珍	白少林	白俊光	白晓民	白继彬	冯江华	司马文霞
邢馥吏	戎一农	吕征宇	吕鸿达	朱庆明	朱英浩	朱宝田	朱晓明	朱家驹	朱耀泉
仲明振	任兆宏	任修明	任俊生	危师让	郭 雄	刘大明	刘广峰	刘卫宁	刘友梅
刘公直	刘文华	刘平安	刘 伟	刘仲儒	刘希清	刘 杰	刘尚明	刘国林	刘泽洪
刘建飞	刘建明	刘屏周	刘瑛岩	刘德志	齐剑波	关志成	江秀臣	江哲生	池 涌
汤 涌	汤蕴林	祁恩兰	许江宁	许忠卿	许洪华	阮江军	阮新波	阮 毅	孙才新
孙凤杰	孙成群	孙 林	孙牧海	严宏强	严陆光	严俊杰	严 萍	苏秀苹	杜正春
杜毅威	杨玉岗	杨守权	杨寿敏	杨其国	杨奇逊	杨奇娟	杨怡元	杨俊智	杨 耕
杨维迅	杨 雯	杨道刚	杨德才	李 卫	李文健	李永东	李成榕	李 旭	李兴源
李安定	李 农	李若梅	李杰仁	李宝树	李定中	李 奎	李彦明	李晓明	李颂哲
李朗如	李培植	李盛涛	李崇坚	李道本	李道林	李 鹏	李 新	李肇林	李耀星
酆凤山	肖立业	肖昌汉	肖辉乾	肖湘宁	肖耀荣	吴正国	吴创之	吴运东	吴志坚
吴国平	吴质根	吴晓波	吴培豪	邱爱慈	何木云	何阿平	何金良	何梓年	何湘宁
何瑞华	佟为明	余 志	余贻鑫	邹云屏	邹金昌	邹孟奇	应百川	辛德培	辛耀中
汪继强	汪集阳	汪樨生	汪德良	沈小宇	沈 江	沈 兵	沈邱农	沈梁伟	宋文武
宋汉武	宋哲仁	迟 速	张艺滨	张文才	张玉花	张业广	张乔根	张仲超	张兆鹤
张伯明	张冶文	张启平	张 波	张 亮	张洪钟	张祖平	张勇传	张晓江	张晓锋
张 敏	张 望	张景洲	陆永平	陆宠惠	陆俭国	陆剑秋	陆祖良	陆家榆	陆嘉明
陈汉民	陈伟根	陈 仲	陈众励	陈庆国	陈 坚	陈伯时	陈国柱	陈治明	陈建飏
陈 星	陈思铤	陈 勇	陈哲良	陈恩鉴	陈雪梅	陈清泉	陈超志	陈敬超	陈辉明
陈黎平	陈德昌	陈德胜	陈德桂	邵 岚	苟锐锋	林云生	林公舒	林集明	易学勤
罗永浩	罗景华	金如麟	周小谦	周以国	周双喜	周 平	周仲仁	周远翔	周孝信
周建中	周思刚	周家启	周 娟	周锡生	郑小康	郑云之	郑永红	郑克文	郑明光
宗建华	宓传龙	孟庆东	赵玉文	赵光宙	赵 伟	赵红一	赵昌宗	赵治华	赵宗让
赵荣祥	赵相宾	赵 洁	赵 敏	赵婉君	赵 琨	赵 毅	赵黛青	荣命哲	胡方荪

胡安	胡学浩	胡振岭	胡鉴清	段善旭	段献忠	侯子良	俞忠德	俞智斌	饶芳权
施围	施鹏飞	洪元颐	姚本荣	姚尔昶	姚家祎	姚福生	贺建华	贺益康	贺湘琨
贺德馨	骆仲决	秦和	秦裕碧	袁余军	袁建生	袁建敏	都兴有	耿英三	莫会成
贾东旭	夏立	夏祥贵	顾四行	顾国彪	钱昌燕	钱宝良	钱照明	倪维斗	徐元辉
徐凤刚	徐永法	徐兆丰	徐国政	徐洪海	徐殿国	徐铎	徐德鸿	殷禄祺	奚大华
高子瑜	高文胜	高庆国	高京生	高理迎	高培庆	郭天兴	郭国顺	郭保良	郭洁
郭振岩	郭灏	唐任远	唐炬	唐春潮	陶星明	黄少锋	黄仁乐	黄妙庆	黄其励
黄国治	黄学清	黄宝生	黄晓丽	黄崇祺	黄景湖	梅生伟	曹一家	曹惠彬	戚庆成
崔志强	崔翔	康勇	章名耀	章定邦	梁维宏	梁维燕	梁曦东	彭宗仁	葛大麟
葛少云	葛诗慧	葛蓉生	葛溪亭	葛增茂	董卫国	蒋洪德	蒋善定	韩民晓	韩英铎
惠世恩	覃大清	程天麟	程均培	程时杰	程树康	程浩忠	傅书遏	焦侬	焦树建
舒惠芬	曾文星	曾正中	曾明富	曾南超	曾雁鸿	曾嵘	游亚戈	谢开贵	谢秋野
雷银照	雷清泉	满慧文	蔡崇积	管瑞良	廖胜松	廖瑞金	缪鸿兴	黎晓晖	颜渝坪
薛以太	戴先中	戴庆忠	戴慧珠	魏光辉					

序

电气工程包括发电工程、输配电工程和用电工程，是为国民经济发展提供电力能源及其装备的战略性产业，是国家工业化和国防现代化的重要技术支撑，是国家在世界经济发展中保持自主地位的关键产业之一。电气工程的产业关联度高，对从原材料工业、机械制造业、装备工业以及电子、信息等一系列产业的发展均具有推动和带动作用，对提高整个国民经济效益，促进经济社会可持续发展，提高人民生活质量有显著影响。

经过改革开放 30 年来的发展，我国电气工程已经形成了较完整的科研、设计、制造、建设、运行体系，成为世界电力工业大国之一。至 2007 年底，我国发电装机容量达 7.13 亿 kW，三峡水电及输变电工程、百万千瓦级超超临界火电工程、百万千瓦级核电工程，以及正在建设的交流 1000kV、直流 ±800kV 特高压输变电工程等举世瞩目；大电网安全稳定控制技术、新型输电技术的推广，大容量电力电子技术的研究和应用，风力发电、太阳能光伏发电等可再生能源发电技术的产业化及规模化应用，超导电工技术、脉冲功率技术、各类电工新材料的探索与应用取得重要进展。特别是进入 21 世纪以来，电气工程领域全面贯彻科学发展观，新原理、新技术、新产品、新工艺获得广泛应用，拥有了一批具有自主知识产权的科技成果和产品，自主创新已成为行业的主旋律。我们的电气工程技术和产品，在满足国内市场需求的基础上已经开始走向世界。

电气工程技术的快速发展和巨大成就，要求对原有知识的不断更新，广大电气工程领域的工作者们对新的知识愈加渴求。在原机械工业部陆燕荪、电力工业部陆延昌两位老部长的倡议和领导下，由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个全国性学会，联合组织了电气工程各领域近 2000 位专家和学者，历



时4年多，编撰的《中国电气工程大典》现在出版了。这套内容新颖实用的巨著是电气工程领域一项重要的基础性工作，也是我国电气工程技术人员对社会的公益奉献。这部鸿篇巨著不仅具有电气工程技术的知识魅力，同时也具有鲜明的时代特色，相信会为广大读者营造一个开卷有益的氛围。

电能作为目前使用最方便的二次能源，在推动社会进步、促进科学技术发展和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。随着社会的不断进步和人民生活水平的不断提高，电气工程任重而道远，需要依靠科技进步，并用更新的科学知识武装每一位电气工作者，所以，希望这套著作能对电气工程的教学、科研、设计和管理人员有所裨益。

徐匡迪

二〇〇八年八月十二日



前言

电的产生和应用是人类有史以来最伟大的科学技术成就之一。电力作为目前最清洁和使用最方便的二次能源，在推动社会发展、促进科学技术进步和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。一个多世纪以来，电气技术的不断发展，电力生产及应用的日益增长，迅速改变了人类社会的面貌，也深深影响着人们的生活方式。电气化的程度已成为国家文明程度的重要标志之一。

改革开放 30 年来，我国科学技术取得了突飞猛进的发展，科技创新已成为国家发展的重要战略。在电气工程领域，新原理、新技术、新工艺、新材料得到了广泛应用，涌现出一大批具有自主知识产权的科研成果和产品。三峡电站的建设，大容量高效清洁超临界和超超临界压力机组的迅速发展，特高压交直流输电技术和灵活交流输电技术的发展和运用，先进的核能发电厂及可再生能源发电厂的成功建造，大电网智能化动态稳定监控系统与信息管理系统的应用，具有先进水平的电气装备制造业的高速发展，大容量电能变换与节能节电技术，风力发电、太阳能光伏发电等资源节约、环境友好的新技术的大量应用，计算机和信息网络技术在电气领域的普及，明显改变着电气工程领域技术发展状况。超导电工技术、脉冲功率技术，纳米材料、永磁材料、有机硅材料等各类电工新技术和新材料的探索与应用，都充分展示了中国电气工程领域所取得的骄人业绩，引起了世界的高度关注。其中许多科研成果和产品，已达到国际先进水平。

电气工程从业人员多，涉及面广，技术进步快，科研成果多，许多科研成果需要总结和积累，许多新的知识需要普及和传播。盛世修典，素有遗风。为反映电气工程领域最新的发展成就，总结已有的科研成果，传播工程领域最新的科学技术知识，中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个学会，联合组织了电气工程各领域的约 2000 位专家和学者，编撰了《中国电气工程大典》。



本套书的编写工作于 2004 年开始启动,编委会多次召开工作会议,精心组织,按照“取材突出新原理、新技术、新工艺、新材料;内容体现新颖性、先进性、实用性;表达力求简明扼要、深入浅出、直观易懂”的原则,反复讨论并修改编写大纲,确定编写内容。经过 4 年磨砺,数易其稿,终于付梓出版。《中国电气工程大典》共 15 卷约 5000 万字,包括《现代电气工程基础》、《电力电子技术》、《电气工程材料及器件》、《火力发电工程》、《水力发电工程》、《核能发电工程》、《可再生能源发电工程》、《电力系统工程》、《电机工程》、《输变电工程》、《配电工程》、《船舶电气工程》、《交通电气工程》、《建筑电气工程》和《电气传动自动化》。

所有组织者和编著者都把编撰本套书当作电气工程领域建设的一项重要的基础性工作,他们认真负责,辛勤耕耘,倾注了大量心血。本套书在编写出版过程中,得到参与编写的各科研院所、企业、高等院校等单位的大力支持,还得到业内有关院士和专家、学者的热心帮助。正是大家的积极参与和无私奉献,才使得这部大典能顺利编写出版,编委会对他们的奉献和支持表示衷心感谢。

这部鸿篇巨著,涉及电气工程设计制造、建设施工、生产运行、科研教学、工程管理等领域,总结了改革开放 30 年来电气工程各领域的技术发展与成功经验,展示了各专业领域的最新技术数据、设计经验、科技成果和发展动态,汇集了国内外相关的先进理念和成熟经验,体现了科学性、先进性和实用性的结合,是一套可供电气工程领域专业技术人员和管理人员使用的综合性工具书,也可供高等院校相关专业师生参考。

《中国电气工程大典》的编撰出版工作涉及面广,参与人员多,写作难度大。尽管编撰人员尽心尽力,倾注了无数心血,但书中难免存在缺点和不足之处,恳请读者指正。

中国电气工程大典编辑委员会主任

陆燕荪 陆延昌



本 卷 前 言

整个 20 世纪是化石能源世纪，与此相适应，发电也以煤、气与石油发电为主。随着化石能源开始耗竭，以及使用化石能源引起的环境污染与气候变暖日益严重，人们已普遍认识到，必须最大限度地提高能源生产与利用效率，清洁、高效地利用各种能源，尽快地沿着减小化石能源份额，增大可再生能源与核能份额的方向，逐步建立能源可持续发展体系，有关工作应立即积极推进，力争 21 世纪上半叶能取得明显进展。为此，大力发展大规模可再生能源发电，提高它们的份额的迫切任务已提上了日程。

可再生能源是经利用消耗后可以自然得到不断补充的一次能源，包括太阳能、风能、生物质能、水能、海洋能与地热能六大类，它们广泛存在，取之不尽，用之不竭，是人类可持续依赖的初级能源。可再生能源发电是可再生能源利用的重要方向，经过长期、持续的多方面努力，各种能源均已发展了相应的发电方式，并得到了实际应用，成为电气工程的一个重要的新兴方面。

鉴于水力发电已经成为大规模产业化与应用的领域，我国水电总装机容量已达 1.45 亿 kW，占全国发电总装机容量 7 亿 kW 的 20%，在本《中国电气工程大典》中，另有第六卷《水力发电工程》进行论述，根据分工，本卷《可再生能源发电工程》仅涉及非水能的可再生能源发电，包括太阳能光伏发电、太阳热发电、风力发电、生物质能发电、海洋能发电、地热发电六个部分。这些新兴发电方式充分利用已有的发电技术基础，如在化石能源热发电基础上，发展了地热发电、生物质能燃烧发电、太阳热发电与海洋温差发电。在水力发电基础上，发展了潮汐发电、波浪发电与海流发电，同时也积极发展了一些新型发电技术，如光伏发电、风力发电、海水盐差能发电等。

总的来说，非水能可再生能源发电尚处于初始阶段，在高效、低成本技术的



研发,应用市场的开拓及规模产业的形成等方面近年来已取得了可喜的进展,奠定了较好基础。从20世纪70年代起,以为我国边远无电地区提供电力为重点,小型离网发电装置实现了产业化。90年代初开始,多种联网电站蓬勃发展进入了电力系统,为我国电力发展做出了贡献。但离成为占有重大份额的电源系统的需求尚有很大差距,必须采取有力措施来保证其大规模,持续稳定,快速成长。

由于整个领域处于快速发展时期,虽由较长时期从事有关工作的专家编写了有关篇章,难免会有一些不足,恳望广大读者能就所发现的问题及时提出己见与指正,以便进一步改进完善。

严陆光



目 录

序	
前言	
本卷前言	
第 1 篇 概论	1
第 1 章 概述	3
1.1 可再生能源	3
1.2 可再生能源资源	3
1.3 可再生能源发电技术	7
第 2 章 开发现状和发展趋势	13
2.1 风力发电	13
2.2 光伏发电	16
2.3 太阳热发电	20
2.4 生物质能发电	24
2.5 海洋能发电	26
2.6 地热发电	27
参考文献	29
第 2 篇 太阳能光伏发电技术	31
第 1 章 太阳能辐射原理	33
1 太阳辐射的基本定律	33
1.1 直散分离原理	33
1.2 布格—朗伯定律 (Bouguer-Lambert Low)	33
1.3 余弦定律	33
2 太阳电池方阵不同运行方式的数学模型	34
2.1 辐射量计算的一般方法	34
2.2 固定安装时的模型	35
2.3 极轴跟踪时的模型	35
2.4 全跟踪时的模型	35
3 太阳电池方阵面所接收到的太阳辐射的计算	35
3.1 倾斜面上太阳辐射的软件辅助计算	35
3.2 倾斜面上太阳辐射的估算	35
4 中国的太阳能资源	35
第 2 章 晶体硅太阳电池	37
1 硅的晶体结构	37
1.1 化学键	37
1.2 硅的晶体结构	37
1.3 硅晶体的表面与界面	38
2 晶体硅的基本物理与化学性质	38
2.1 硅的电学性质	39
2.2 硅的化学性质	39
2.3 硅的光学性质	39
2.4 硅的力学和热学性质	40
2.5 硅的相图	40
3 硅的半导体性质	40
3.1 晶体硅的能带结构	40
3.2 半导体的能带模型	40
3.3 硅晶体的能带结构	41
3.4 本征半导体硅与非本征半导体硅	41
3.5 n 型晶体硅和 p 型晶体硅	42
3.6 掺杂半导体的载流子浓度	42
3.7 载流子的输运性质	43
3.8 非平衡载流子	44
4 晶体硅太阳电池物理基础	45
4.1 半导体 pn 结	45
4.2 非平衡状态下的 pn 结	46
4.3 pn 结电容	47
4.4 浓度结	47
4.5 硅太阳电池构造和工作原理	47
5 晶体硅太阳电池的性质	47
5.1 光电流和光电压	47
5.2 等效电路、输出功率和填充因子	48
5.3 太阳电池的效率	49
5.4 晶体硅太阳电池效率极限	49
5.5 影响太阳电池效率的因素	49
5.6 硅太阳电池的光谱特性	51
5.7 硅太阳电池的温度特性和光照特性	51
6 晶体硅太阳电池的制造	51
6.1 硅材料的制备	51
6.2 单晶硅锭的制备	52
6.3 多晶硅锭的制备	53
6.4 硅片的加工	54
6.5 带硅的制备	54
6.6 太阳电池的制造	54
6.7 太阳电池组件的封装	57
6.8 太阳电池和组件性能检测	58
7 肖特基结太阳电池	58
7.1 肖特基结	59
7.2 肖特基结太阳电池的结构和工作原理	60
7.3 斜向蒸发电极 (OEEO) 太阳电池	60
8 异质结太阳电池	60
8.1 异质结	61
8.2 异质结太阳电池结构和工作原理	61
8.3 a-Si/c-Si 异质结 (HIT) 太阳电池	61
9 高效太阳电池	62
9.1 发射极钝化及背面局部扩散 (PERL) 太阳电池	62
9.2 刻槽埋栅太阳电池 (BCSC)	62
9.3 叉指式背接触电极太阳电池 (IBC)	62
9.4 双面太阳电池	62
9.5 高效低阻硅太阳电池 (RESC)	62
9.6 背表面反射层 (BSR) 太阳电池	63
9.7 黑硅太阳电池	63
10 晶体硅太阳电池的发展趋势	63
第 3 章 薄膜太阳电池	64
1 多晶硅薄膜太阳电池	64
1.1 概述	64
1.2 多晶硅薄膜电池发展概况	64
1.3 薄膜硅太阳电池设计概念	69
2 非晶硅薄膜太阳电池	77
2.1 概述	77
2.2 掺氢非晶硅的原子和电子结构	79

2.3 非晶硅沉积	81	4.3 逆变器的控制电路	150
2.4 pin 结非晶硅电池物理基础	84	4.4 逆变器功率器件的选择	150
2.5 多结太阳电池	88	4.5 逆变器的主要技术性能指标	150
2.6 组件制造	91	4.6 并网逆变器	151
2.7 非晶硅电池未来展望	93	4.7 PWM 方波逆变器产品实例	
3 CdTe 太阳电池	93	——JKFN-2430 型方波逆变器	153
3.1 概述	93	4.8 SPWM 正弦波逆变器产品实例	
3.2 CdTe 性能和薄膜制造方法	95	——JKSN-1000 型正弦波逆变器	154
3.3 CdTe 薄膜太阳电池	98	4.9 可调度型并网逆变器 (3kW)	155
3.4 CdTe 组件	102	5 光伏电站交流配电系统	156
3.5 CdTe 电池未来发展趋势	103	5.1 光伏电站交流配电装置基本原理结构	156
4 硒铜太阳电池	103	5.2 对光伏电站交流配电装置的一般要求	156
4.1 引言	103	5.3 对光伏电站交流配电装置的技术要求	157
4.2 材料性质	104	第 6 章 光伏系统应用	158
4.3 沉积方法	106	1 光伏发电系统的主要应用	158
4.4 结和器件的形成	108	1.1 光伏直流照明系统	158
4.5 器件运行	110	1.2 光伏交流户用电源	158
4.6 制造问题	112	1.3 光伏卫星电视系统	158
4.7 CIGS 电池未来展望	114	1.4 集中型光伏村落电站	159
第 4 章 其他太阳电池	115	1.5 风光互补发电系统	159
1 染料敏化电池	115	1.6 直流光伏水泵系统	160
1.1 概述	115	1.7 交流光伏水泵系统	160
1.2 基础与理论	115	1.8 太阳能路灯	160
1.3 电池制造	119	1.9 与建筑结合的并网光伏发电系统	161
1.4 最近的研究动态	120	1.10 大型并网光伏电站	161
1.5 DSSCs 的商业化途径	122	2 光伏发电应用系统的设计	161
1.6 展望	123	2.1 独立光伏发电系统设计	161
2 聚光太阳电池组件	124	2.2 交流总线独立混合发电系统介绍	164
2.1 引言	124	2.3 并网光伏发电系统设计	165
2.2 光伏聚光组件的基本概念	124	2.4 光伏水泵系统设计	167
2.3 光伏聚光技术的发展历程和经验	126	2.5 太阳能路灯的设计	169
2.4 聚光器光学	129	参考文献	173
2.5 目前的聚光器开发活动	135	第 3 篇 太阳热发电	177
第 5 章 光伏发电系统	136	第 1 章 概述	179
1 太阳电池组件及方阵	136	1 太阳热利用及发电	179
1.1 太阳电池组件的 $I-V$ 特性和相关参数	136	2 太阳热发电系统的类型和特点	179
1.2 温度和光强对太阳电池组件输出特性的影响	137	3 太阳热发电进程	180
1.3 太阳电池的热斑效应	137	第 2 章 太阳辐射能	183
2 储能蓄电池	138	1 太阳能的源泉	183
2.1 铅酸蓄电池的分类、命名和一些常用术语	138	1.1 太阳的构造	183
2.2 VRLA 电池的结构和工作原理	139	1.2 太阳辐射的起源	183
3 充放电控制器	141	1.3 太阳与地球	184
3.1 充放电控制器的功能	141	2 地球上的太阳能	185
3.2 蓄电池过放电保护基本原理	142	2.1 地球大气层上界的太阳能	186
3.3 充放电控制器的基本技术参数	144	2.2 地球表面上的太阳能	186
3.4 充放电控制器的分类	144	3 斜面上的太阳辐射能	188
3.5 并联型和串联型控制器基本电路与工作原理	144	3.1 斜面上的太阳总辐照度	188
3.6 脉宽调制 (PWM) 三阶段充电控制器	145	3.2 水平面上太阳辐射转化成斜面上太阳辐射	189
3.7 多路控制器	146	4 太阳辐射的测量和资源计算	190
3.8 智能型控制器	146	4.1 太阳辐射测量和标准	190
3.9 最大功率跟踪控制器	147	4.2 太阳能资源计算与分区	193
4 直流—交流逆变器	148	第 3 章 太阳热发电基础	195
4.1 光伏发电系统对逆变器的技术要求	148	1 聚光集热	195
4.2 逆变器的分类和电路结构	149	1.1 聚光基础	195

1.2 集热理论	198	第3章 风力发电机组	263
1.3 聚光集热器及材料	203	1 风力发电机组分类	263
2 热力循环	209	1.1 按运行方式分类	263
2.1 热力学第二定律和卡诺循环	209	1.2 按风轮形式分类	263
2.2 热力发电的基本循环	210	1.3 按功率调节方式分类	263
2.3 现代热力发电循环	211	2 风力发电机组总体布局	264
2.4 新型动力循环	212	2.1 风力发电机组基本方案	264
3 太阳能储存	213	2.2 风力发电机组总体参数	267
3.1 蓄热储能	213	3 风力发电机组设计基础	268
3.2 化学储能	215	3.1 风力发电机组空气动力基础	268
3.3 浓度差蓄热	216	3.2 风力发电机组气动力性能计算	272
第4章 太阳热发电系统	218	3.3 风力发电机组载荷计算	275
1 槽式太阳热发电系统	218	3.4 风力发电机组安全系数	280
1.1 工作原理及系统组成	218	3.5 风力发电机组结构强度分析	281
1.2 典型槽式热发电系统	219	3.6 风力发电机组结构动力特性	282
1.3 槽式系统的设计要点	220	4 风力发电机组部件	285
2 塔式太阳热发电系统	223	4.1 风轮系统	285
2.1 系统组成及相关术语	224	4.2 传动系统	289
2.2 典型塔式太阳热发电系统	225	4.3 电气系统	296
2.3 塔式系统的设计要点	230	4.4 偏航系统	299
3 碟式聚光太阳热发电系统	234	4.5 控制系统	301
3.1 碟式聚光太阳热发电系统的组成及相关术语的定义	235	4.6 安全系统	302
3.2 碟式聚光太阳热发电的国内外发展现状和趋势	235	4.7 液压系统	303
3.3 碟式系统关键组件的主要参数和方程	239	4.8 塔架	305
4 其他太阳热发电方式	241	4.9 底座与机舱	306
4.1 太阳池系统	241	第4章 离网型风力发电	307
4.2 CENICOM 太阳热发电系统	242	1 离网型风力发电系统	307
4.3 太阳热气流发电系统	243	1.1 离网型风力发电系统组成	307
第5章 前景展望	244	1.2 离网型风力发电系统设计	307
参考文献	246	1.3 离网型风力发电系统实例	309
第4篇 风力发电	247	2 风—光互补发电系统	309
第1章 概述	249	2.1 风—光互补发电系统组成	309
1 风力发电原理	249	2.2 风—光互补发电系统设计	309
2 风力发电特点	249	2.3 风—光互补发电系统实例	310
3 风力发电现状	249	3 风—柴互补发电系统	310
3.1 风电产业现状	249	3.1 风—柴互补发电系统组成	310
3.2 风电技术现状	250	3.2 风—柴互补发电系统设计	312
4 风力发电趋势	250	3.3 风—柴互补发电系统实例	313
第2章 风特性与风能资源	252	4 风力发电储能	314
1 风特性	252	4.1 化学储能	314
1.1 大气边界层	252	4.2 机电储能	315
1.2 平均风特性	252	4.3 其他储能	315
1.3 脉动风特性	255	第5章 并网型风力发电	317
1.4 极端风特性	257	1 风电并网系统	317
1.5 地貌、地形对风特性影响	258	1.1 风电并网系统组成	317
2 风特性测量	259	1.2 风电场与电网	317
2.1 测量系统	259	1.3 风电并网前期工作	318
2.2 测量方法	260	2 风电与电网相互影响	318
2.3 数据处理	260	2.1 风电对电网频率和有功功率的影响	318
3 风能资源	261	2.2 风电对电网电压和无功功率的影响	319
3.1 风能资源计算	261	2.3 风电对电网谐波、闪变和电压波动的影响	319
3.2 风能资源评估	261	2.4 电网故障对风电的影响	320
3.3 风能资源分布	262	3 风电并网分析计算	320
		3.1 并网线路电压等级	320
		3.2 风电备用容量	320
		3.3 潮流及无功补偿计算	321

3.4	短路电流计算	321
3.5	暂态稳定计算	323
3.6	谐波与闪变计算	323
4	风电并网技术规定	324
4.1	频率	324
4.2	电压	325
4.3	有功功率	325
4.4	无功功率	325
4.5	其他	326
5	风力发电短期预测	327
5.1	预测目的	327
5.2	预测系统	328
5.3	预测方法	329
5.4	预测精度	329
6	风电并网系统实例	329
6.1	电网结构	329
6.2	风电场布局	329
6.3	风电机组的模型	330
6.4	数值仿真	331
第6章	风电场	333
1	风电场项目前期工作	333
1.1	风电场项目前期工作流程	333
1.2	风能资源评估	333
1.3	风电场项目规划	333
1.4	风电场项目预可行性研究	333
1.5	风电场项目可行性研究	334
2	风电场选址	334
2.1	风电场宏观选址	334
2.2	风电场微观选址	335
2.3	风电场选址软件	336
3	风电场设计	336
3.1	风电场电气系统设计	336
3.2	风电场工程设计	338
4	风电场建设	339
4.1	风电场建设准备	339
4.2	风电场工程施工	340
4.3	风电场项目调试	341
4.4	风电场工程验收	341
5	风电场运行与维护	342
5.1	风电场运行	342
5.2	风电场维护	343
6	风电场项目评估	344
6.1	技术性能评估	344
6.2	财务评价	345
6.3	环境影响评价	345
6.4	社会效益评估	346
7	近海风电场	346
7.1	近海风电场前期工作	347
7.2	近海风电场建设	349
7.3	近海风电场接入系统	351
7.4	近海风电场运行和维护	351
7.5	近海风电场项目投资	352
8	风电场实例	352
8.1	陆上风电场实例	352
8.2	近海风电场实例	353
第7章	风力发电标准、检测和认证	355

1	风力发电标准	355
1.1	风力发电标准化体系	355
1.2	国际风力发电标准	355
1.3	中国风力发电标准	356
2	风力发电设备认证	357
2.1	认证体系	358
2.2	整机型式认证	358
2.3	风电场项目认证	362
2.4	认证证书	362
3	风力发电设备检测	363
3.1	检测体系	363
3.2	安全与功能检测	363
3.3	功率特性检测	364
3.4	载荷检测	365
3.5	噪声检测	368
3.6	电能品质检测	369
3.7	叶片特性检测	372
	参考文献	374

第5篇 生物质能发电 377

第1章 综述 379

1	生物质能源在我国地位	379
1.1	国外生物质能发展趋势	379
1.2	生物质能对我国的重要性	379
2	生物质发电的意义	380
2.1	较少污染和温室气体排放	380
2.2	发展接近终端用户的分布式电力系统	380
2.3	发展农业生产和农村经济	381
3	生物质发电的技术现状	381
3.1	生物质直接燃烧发电	381
3.2	生物质混合燃烧发电	381
3.3	生物质气化发电	381
3.4	生物质沼气发电	382
3.5	生物质气化燃料电池一体化发电	382
4	生物质发电面临的主要问题	382
4.1	生物质供应成本较高	382
4.2	自主核心技术严重缺乏	383
4.3	投资渠道和投资资金缺乏	383
5	生物质发电技术的发展趋势	383
5.1	生物质发电利用模式多样化	383
5.2	生物质发电技术多样性	383
5.3	生物质发电投资主体多元化	384

第2章 生物质资源 385

1	生物质能的物质基础及特点	385
1.1	生物质原料的分类	385
1.2	生物质的主要化学组成与结构	386
1.3	生物质燃料的热值	386
2	中国的传统生物质资源现状及潜力预测	387
2.1	农业生物质资源	387
2.2	林业生物质资源	390
2.3	城市生活垃圾资源	394
2.4	传统生物质资源量的潜力预测	398
3	中国的能源植物资源现状及潜力预测	399
3.1	能源植物的概念及特点	399
3.2	能源植物的种类	399
3.3	能源植物的培育技术	402

3.4 我国能源植物发展现状	404	1 垃圾发电原理及其现状	452
3.5 能源植物资源的发展潜力	408	1.1 垃圾发电基本原理	452
第3章 生物质燃烧发电	412	1.2 垃圾发电现状	452
1 生物质燃烧原理与技术	412	2 垃圾焚烧发电设备	453
1.1 生物质燃料的性质	412	2.1 垃圾焚烧炉	453
1.2 生物质的燃烧	416	2.2 焚烧炉及余热锅炉高温腐蚀	455
1.3 生物质的焦渣与灰熔融特性	417	2.3 垃圾仓	456
1.4 生物质燃烧的腐蚀问题	418	2.4 垃圾起重机	456
1.5 生物质燃烧排放与控制	418	2.5 垃圾焚烧发电厂汽轮机及其系统	457
2 生物质燃烧锅炉	419	2.6 垃圾焚烧发电厂调速技术	458
2.1 生物质火床燃烧设备	419	3 自动控制系统	459
2.2 生物质火室燃烧设备	419	3.1 DCS 中央控制系统	459
2.3 生物质流化床燃烧设备	419	3.2 集散控制系统	459
2.4 生物质旋风燃烧设备	420	3.3 备用系统	459
3 生物质直接燃烧发电系统	420	3.4 先进控制技术	460
3.1 常规蒸汽朗肯循环发电	420	4 垃圾焚烧的污染排放与控制	460
3.2 生物质直接燃烧发电系统的预处理系统	420	4.1 垃圾焚烧污染物及其控制标准	460
3.3 生物质直接燃烧热电联供系统	421	4.2 垃圾焚烧中 CO、NO _x 、SO ₂ 、HCl 的 排放与控制	461
3.4 生物质直接燃烧发电系统的经济性分析	422	4.3 垃圾焚烧中二噁英的产生与控制	462
4 生物质混合燃烧发电系统	422	4.4 垃圾焚烧废水的处理	464
4.1 生物质直接混合燃烧发电系统	422	4.5 垃圾焚烧灰渣处理	465
4.2 生物质气化混合燃烧发电系统	423	5 垃圾卫生填埋场沼气发电	466
4.3 生物质混合燃烧发电技术的研究应用状况	423	5.1 垃圾填埋气 LFG 的产生	466
4.4 生物质混合燃烧发电存在的问题	424	5.2 LFG 收集与处理	467
5 生物质燃烧发电的案例介绍	424	5.3 发电系统	467
5.1 生物质直接燃烧发电案例	424	6 垃圾发电工程实例	467
5.2 生物质直接混合燃烧发电案例	426	6.1 垃圾焚烧发电工程实例	467
5.3 生物质气化混合燃烧发电案例	426	6.2 LFG 发电工程实例	471
第4章 生物质气化发电	428	6.3 大型垃圾焚烧工程循环半干式 尾气净化技术应用	472
1 生物质气化特性	428	第6章 生物质发电的环境性和经济性	473
1.1 生物质气化原理	428	1 生物质发电的全生命周期评价	473
1.2 气化介质	429	1.1 全生命周期评价的意义	473
1.3 气化过程的反应动力学	429	1.2 生命周期评价方法学	473
2 生物质气化设备	431	1.3 生物质发电系统的生命周期评价	475
2.1 上吸式固定床气化炉	431	2 生物质发电的经济性	482
2.2 下吸式固定床气化炉	432	2.1 影响生物质发电技术经济性的主要因素	482
2.3 层式下吸式气化炉	433	2.2 降低生物质发电成本的主要措施	483
2.4 单流化床气化炉	433	2.3 生物质直接燃烧发电经济分析实例	484
2.5 循环流化床气化炉	433	2.4 生物质气化发电经济分析实例	485
2.6 双流化床气化炉	434	2.5 生物质混合燃烧发电经济分析实例	486
3 生物质燃气的净化	434	参考文献	488
3.1 燃气净化的目的及意义	434	第6篇 海洋能发电	491
3.2 燃气净化方法和净化设备	435	第1章 总论	493
4 生物质燃气的发电技术与设备	444	1 海洋能的分类	493
4.1 内燃机/发电机发电系统	444	1.1 潮汐能	493
4.2 燃气轮机/发电机发电系统	444	1.2 波浪能	493
4.3 燃料电池/燃气轮机发电系统	445	1.3 潮流能	493
5 生物质气化联合循环发电系统	445	1.4 温差能	493
5.1 生物质气化联合循环系统介绍	445	1.5 盐差能	493
5.2 关键技术	446	2 海洋能利用的基本原理与关键技术	493
5.3 示范工程	447	2.1 潮汐能发电的原理与技术	493
6 应用实例分析	448	2.2 波浪能的转换原理与技术	494
6.1 小型生物质气化发电系统	448	2.3 海洋温差能的转换原理与技术	494
6.2 中型生物质气化发电系统	449		
6.3 大型生物质气化发电技术的应用	451		
第5章 垃圾发电	452		