

电工高新技术丛书

中国电工技术学会

编

- 太阳能热发电
- 太阳能光伏发电
- 风力发电

第2分册



机械工业出版社
China Machine Press

甲工高新技术丛书



- 太阳能热发电
- 太阳能光伏发电
- 风力发电

中国电力出版社

电工高新技术丛书

第2分册

- 太阳能热发电
- 太阳能光伏发电
- 风力发电

中国电工技术学会 编



机械工业出版社

电工高新技术丛书共有六个分册，本书为第2分册。本分册共有三个专题技术内容，包括太阳能热发电、太阳能光伏发电和风力发电。

随着高新技术对传统的电工技术的渗透，电工技术的更新和创造日新月异，读者可从这套丛书中开拓视野、增长才智、启迪借鉴，并从中汲取营养，以促进电工技术的发展和再创造。

本丛书是一套普及高新技术的读物，其内容新颖、文字深入浅出，适于中级以上的工程技术人员、企事业单位技术管理人员及工科院校的师生阅读和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工高新技术丛书/中国电工技术学会编. —北京: 机械工业出版社, 2000.3

ISBN 7-111-07898-5

I. 电… II. 中… III. 电工技术: 高技术-丛书
IV. TM-51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 03631 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 牛新国 版式设计: 冉晓华 责任校对: 魏俊云

刘思源 封面设计: 姚毅 责任印制: 何全君

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 1 月第 1 版·第 2 次印刷

787mm×1092mm¹/₃₂·9.125 印张·192 千字

2 001—3 500 册

定价: 17.00 元 (全套 6 册, 共 108.00 元)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

《电工高新技术丛书》编辑委员会名单

主 任：赵明生

常务副主任：张林昌

副 主 任：赖 坚 严陆光 姚福生 石定寰

周鹤良 冯冠平 陈瑞藻

委 员：汪 耕 梁维燕 万遇良 吴维韩

王赞基 林良真 陈伯时 吴济钧

罗命钧 李方训 胡必权

主 编：张林昌

副 主 编：万遇良 吴维韩 李方训 满慧文

编辑部主任：王玉洁

编辑部副主任：王琳

前 言

人类历史的发展证明，科学精神、科学思想和科学方法在物质文明和精神文明建设中发挥着先导和支柱的作用。中国电工技术学会受科学技术部高新技术发展及产业化司委托，组织编写《电工高新技术丛书》，以下简称《丛书》。我会一贯具有面向人民群众宣传普及科学知识的光荣传统，最近几年来，我们以《中共中央、国务院关于加强科学普及工作的若干意见》为指导思想，经过各方面专家、教授的努力，着手编辑出版《电工高新技术丛书》（以下简称《丛书》），面向各级领导干部、技术人员普及科学知识，弘扬科学精神，提倡科学态度，传播科学思想。

本套《丛书》分为六个分册，内容包括新能源发电技术、超导技术、智能控制技术、电气设备状态监测技术、电力电子技术、电动车技术等，每个分册约 25 万字，由若干个相近专题组成，内容新颖，通俗易懂，文字精炼，引人入胜。《丛书》的定位为高科技科普读物，包括新理论、新产品、新方法、新技术、新工艺、新材料，主要涉及国际上技术已经成熟，且国内尚未完全掌握或属于世界电工技术的前沿课题，这样，保证了《丛书》普及高新技术的特点。

《丛书》的出版，对宣传电工技术最新发展动态，对加强技术创新，发展高科技，推动生产力跨越式发展，具有十分重要的现实意义和深远影响。《丛书》的出版，为国家公务员、科技人员提供一个了解当今世界先进电工技术的窗

口，使读者开拓视野、增长才智，起到启迪借鉴、触类旁通的作用。

《丛书》的出版，在列选题、写作及编辑过程中得到了清华大学、北京邮电大学、北方交通大学、中国科学院电工研究所、天津电源研究所和文章作者的支持，在《丛书》出版之际，谨向支持的部门、单位和作者致以深切的谢意。

由于时间所限，还有其他一些电工高新技术没有编入本丛书，编写中也难免会出现某些差错，欢迎读者给予批评指正。

中国电工技术学会

2000年3月

序

能源是人类社会赖以生存和发展的物质基础。当前，包括我国在内的绝大多数国家都以石油和煤炭等矿物燃料为主要能源。随着矿物燃料的日益枯竭和全球环境的日益恶化，很多国家都在认真探索能源多样化的途径，积极开展新能源和可再生能源的研究开发工作。太阳能和风能被看作是最有代表性的新能源和可再生能源，作为这两种能源的高级利用，太阳能发电和风力发电技术受到世界各国的高度重视。近 10 多年来，现代风力发电技术和太阳能发电技术日臻完善，成本日趋下降，市场不断扩大，在一些地区已成为对常规能源具有一定竞争力的新能源发电方式。特别是在边远的没有电网的地区，正在发挥着其独特的作用。1996 年 9 月在津巴布韦首都哈拉雷召开了有各国国家元首和政府首脑参加的世界太阳能高峰会议，会议发表的宣言指出：“太阳能和其他可再生能源（如太阳热能、光电能、风能、地热、水能、生物燃料、海洋能等）以及能源效率在提供能源和持久使用环境资源为人类造福方面应起巨大作用”；“每个国家都应应将太阳能的作用纳入其国家能源政策并作出明确规定”；“呼吁所有国家参加《世界太阳能计划 1996~2005 年》的制定和实施”。可以预见，一个开发利用太阳能和风能等可再生能源的新时期即将到来。

我国的太阳能、风能资源丰富，利用太阳能、风能有悠久的历史，但现代风力发电、太阳能发电事业基本上开始于

70年代。从80年代初起,国家计委和国家科委一直将风力发电和太阳能发电技术列入国家重点科技攻关计划,十几年来取得了长足的进展。在风力发电方面,全国共研制出从50W到200kW的风力发电机型40多种,推广户用微型(百瓦级)风力发电机组14万多台;与此同时,并网型的风电场逐步发展并日益受到重视,目前全国有19个风力发电场投入运行,总装机容量达22.35万kW[⊙]。在太阳光发电方面,太阳电池的年生产能力达到4.5MW,应用领域不断扩大,已遍及农牧业、交通、通信、气象、医疗卫生、军事国防及农村用户等,光伏发电在解决边远无电网地区的供电及许多特殊场合的用电上,正发挥着越来越大的作用。目前,西藏已建成10kW以上的光伏电站7个,提前完成西藏无水力资源无电县独立光伏电站的建设任务。在太阳能热发电方面,“八五”、“九五”期间,国家科委均将太阳能热发电的关键技术列入了国家重点科技攻关计划。可以说,现在我国风力发电和太阳能发电事业正处于一个大发展的前期。

本书是为适应我国太阳能发电和风力发电事业的需要而编写的,全书包括太阳能热发电、太阳能光伏发电和风力发电三个专题,分别介绍太阳能热发电、太阳光伏发电和风力发电的工作原理、结构组成、系统类型、关键技术、运行方式和应用领域,以及国内外状况与发展趋势等。本书在论述有关知识的同时,尽量反映该领域的最新技术进展和国内外发展动态及趋势,力求作到内容新颖、简明扼要、深入浅出、通俗易懂。本书的对象是从事太阳能利用和风能利用的研究人员和工程技术人员以及有关国家机关和企事业单位的

⊙ 此数据统计到1998年底。

技术管理人员，也可供大专院校的师生参考。

本书太阳能热发电专题和风力发电专题由倪受元编写，太阳光伏发电专题由孔力编写，由于编写者水平有限，缺点、错误在所难免，谨请读者批评指正。

编者

1999 年 10 月

目 录

前言 序

I 太阳能热发电

第1章 太阳能热发电的基本工作原理和系统组成 3

- 1.1 太阳能热发电的基本工作原理 3
- 1.2 太阳能热发电系统的组成 4
 - 1.2.1 集热系统 5
 - 1.2.2 热传输系统 7
 - 1.2.3 蓄热和热交换系统 8
 - 1.2.4 动力机-发电机系统 11

第2章 太阳能热发电系统的核心——聚光集热器 14

- 2.1 聚光集热器的工作性能 14
 - 2.1.1 太阳张角与聚光焦像 14
 - 2.1.2 聚光比 15
 - 2.1.3 槽形抛物面反射镜的聚光性能 16
 - 2.1.4 吸收器的集热性能 18
 - 2.1.5 选择性涂层 20
- 2.2 几种典型的聚光集热器 21
 - 2.2.1 盘形抛物面镜聚光集热器 22
 - 2.2.2 中心接收定日镜阵聚光集热系统 24
 - 2.2.3 菲涅尔 (Fresnel) 透镜聚光集热器 26

2.3 聚光集热器的跟踪方式	27
2.3.1 太阳的位置	28
2.3.2 一维聚光跟踪方式	30
2.3.3 二维聚光跟踪方式	33
第3章 太阳能热发电系统的主要类型	36
3.1 塔式太阳能热发电系统	36
3.2 槽形抛物面镜分散集热式太阳能热发电系统	40
3.3 盘式抛物面镜太阳能热发电系统	45
第4章 太阳能热发电的现状和展望	51
4.1 抛物面槽式太阳能热发电的现状	51
4.2 塔式太阳能热发电的现状	56
4.3 太阳能热发电的近期展望	63
4.4 未来的空间太阳能发电	69
参考文献	73

II 太阳能光伏发电

第1章 太阳电池原理	77
1.1 半导体	77
1.1.1 物体的导电性能	77
1.1.2 原子结构与晶格结构	79
1.1.3 能带图与禁带宽度	81
1.2 半导体中的光吸收	81
1.2.1 光吸收与载流子产生	81
1.2.2 载流子的复合	84
1.3 PN结	86
1.3.1 半导体材料的掺杂与导电类型	86
1.3.2 多数载流子和少数载流子	87

1.3.3 非平衡载流子	88
1.3.4 载流子的运动	89
1.3.5 PN 结	90
1.3.6 PN 结的能带	92
1.3.7 PN 结的特性	94
1.4 光伏效应与太阳电池	97
1.4.1 光伏效应	97
1.4.2 太阳电池的基本结构和工作原理	98
第 2 章 太阳电池的制造工艺	101
2.1 拉制单晶棒材	101
2.2 掺杂及 PN 结的制作	102
2.3 制作上、底电极	103
2.4 蒸镀减反射膜	104
2.5 太阳电池组件	105
第 3 章 太阳电池的特性和主要参数	108
3.1 太阳电池的典型工作状态	108
3.1.1 电池两端开路	108
3.1.2 电池两端短路	108
3.1.3 电池两端接入负载	110
3.2 太阳电池的输出特性	110
3.2.1 $I-V$ 特性曲线	110
3.2.2 等效电路	112
3.3 太阳电池的主要参数	113
3.3.1 开路电压	113
3.3.2 短路电流	114
3.3.3 峰值功率	114
3.3.4 填充因子	115
3.3.5 效率	117

3.4 环境对太阳能电池性能的影响	117
3.4.1 太阳能辐射强度的影响	118
3.4.2 温度的影响	119
第4章 太阳能光伏发电系统	121
4.1 不同类型的太阳能光伏发电系统	122
4.1.1 独立运行光伏发电系统 (Stand-alone System)	122
4.1.2 并网型光伏发电系统	123
4.1.3 混合型光伏发电系统	124
4.2 太阳能电池阵列	125
4.3 储能系统	128
4.3.1 铅酸蓄电池	129
4.3.2 镉镍蓄电池	132
4.3.3 安全性	133
4.3.4 储能蓄电池的几个重要参数	134
4.4 直流控制系统	137
4.4.1 太阳能电池阵列与直流系统的连接与匹配	137
4.4.2 最大功率跟踪 (MPPT)	140
4.4.3 充放电控制器	141
4.5 逆变器	144
4.5.1 基本逆变电路	145
4.5.2 脉宽调制 (PWM)	147
4.5.3 效率	147
第5章 太阳能光伏发电的发展与前景	150
5.1 国外光伏发电技术的发展	150
5.2 我国光伏发电技术的发展	155
5.2.1 我国的太阳能资源	155
5.2.2 我国光伏发电技术的发展历程	155
5.2.3 我国太阳能电池的技术发展状况	157

5.2.4 光伏发电产业的发展状况	158
5.2.5 光伏发电技术应用及市场开发状况	158
5.3 太阳能光伏发电技术的发展前景	160
参考文献	163

Ⅲ 风 力 发 电

第 1 章 风力机的类型与结构	167
1.1 风力机的类型	167
1.1.1 水平轴风力机	167
1.1.2 垂直轴风力机	168
1.2 风力机的结构和组成	171
1.2.1 风轮	171
1.2.2 调速或限速装置	174
1.2.3 调向装置	178
1.2.4 传动机构	180
1.2.5 塔架	181
第 2 章 风力机的工作原理和气动力特性	182
2.1 空气动力学的基本知识	182
2.1.1 升力和阻力	182
2.1.2 影响升力系数和阻力系数的因素	184
2.2 风力机的工作原理	188
2.2.1 风轮在静止情况下叶片的受力情况	188
2.2.2 风轮在转动情况下叶片的受力情况	189
2.3 风力机的气动力特性	192
2.3.1 贝兹 (Betz) 理论	192
2.3.2 风能利用系数	195
2.4 风力机的输出功率	196

第 3 章 风力发电用的发电机及风力发电系统	202
3.1 对发电机及发电系统的一般要求	202
3.2 恒速恒频发电机系统	202
3.2.1 同步发电机	203
3.2.2 感应发电机	205
3.3 变速恒频发电机系统	210
3.3.1 不连续变速系统	211
3.3.2 连续变速系统	212
3.4 小型直流发电系统	219
3.4.1 交流永磁发电机	219
3.4.2 无刷爪极自励发电机	221
第 4 章 风力发电机组的并网运行	223
4.1 恒速恒频风力发电机的并网运行	223
4.1.1 同步发电机的并网运行	223
4.1.2 感应发电机的并网运行	228
4.2 变速恒频风力发电机的并网运行	233
4.2.1 同步发电机交-直-交系统的并网运行	233
4.2.2 磁场调制发电机系统的并网运行	235
4.2.3 双馈发电机系统的并网运行	237
第 5 章 风力发电机组的独立运行及与其他发电 装置互补运行	239
5.1 风力-柴油联合发电系统	239
5.1.1 基本型风力-柴油发电系统及其改进型式	240
5.1.2 交替运行的风力-柴油发电系统	241
5.1.3 具有蓄电池储能的风力-柴油发电系统	243
5.1.4 交-直-交型变速风力发电机组与柴油发电 机组联合发电系统	244

5.1.5 磁场调制型变速风力发电机组与柴油发电机组 联合发电系统	245
5.1.6 风力-柴油联合发电系统的实用性评价	246
5.2 风-光联合发电系统	247
5.2.1 风-光互补联合发电的优点	247
5.2.2 交-直-交型变速风电机组与太阳光电 联合运行	248
5.2.3 采用感应发电机的恒速风电机组与太阳光电 联合运行	249
5.3 风力发电机组的独立运行	251
5.3.1 配以蓄电池储能的独立运行方式	251
5.3.2 采用负载自动调节法的独立运行方式	252
5.3.3 多台风力发电机组并联运行的独立供电系统	254
第6章 风力发电的现状和展望	255
6.1 世界风电发展概况	255
6.1.1 世界风力发电的装机容量	255
6.1.2 风力发电机组的单机容量	256
6.1.3 商用风电机组的技术与产品可靠性	260
6.1.4 风力发电的经济性	261
6.2 中国风电发展概况	262
6.2.1 中国风电利用的特点	262
6.2.2 中国风电的发展与现状	263
6.3 风力发电的展望	267
6.3.1 商品化风电机组的单机容量的发展	268
6.3.2 变速恒频风电机组的开发和商品化	268
6.3.3 机械方面的改进	270
6.3.4 空气动力方面的改进	271
参考文献	272