

太阳能光伏技术与应用

沈文忠 主编

上海交通大学出版社

版心:132mm×200mm(小16K) 字数:35×36(5号书宋)

责编:徐文洁 校次:三校 日期:2013年09月27日 排版:陆

内 容 提 要

本书在介绍太阳能利用和太阳电池物理的基础上,系统阐述了太阳电池材料、器件及组件工艺,光伏发电系统和检测技术,与光伏发电相关的储能技术、智能电网技术、系统可靠性以及认证和标准等内容。本书力图向读者提供太阳能光伏技术与应用全方位的专业基础理论知识、光伏发电的各种应用与检测认证技术和发展前景。

本书可作为从事太阳能光伏及相关技术领域的研发和工程技术人员的学习参考用书,也可供高等院校的半导体材料与器件、光电子和光学工程等相关专业师生参考。

序

随着我国能源和环境双重压力的日益加剧,太阳能光伏发电因其具有显著的能源、环保和经济效益而将成为我国能源之百年大计,也将是根本上解决雾霾、酸雨和温室气体等生态环境问题的有效手段之一。悉数中国光伏的发展历程,可以从1958年中国研制出了首块单晶硅太阳能电池开始谈起,经历了近半个世纪的发展,太阳能光伏产业目前已经成为我国为数不多的具有国际竞争优势的战略性新兴产业。

十年树木,百年树人。纵观国际太阳能光伏研发和应用强国的经验看来,尽早开展人才的培养积累是行业发展的首要基础。近年来,我国光伏产业也越来越重视技术和管理人才的能力建设。建立相应的、可持续的教育和培训体系,对教材和课程与时俱进的更新完善,师资力量不断提升加强,培训资质和认证体系的逐步建立等系列工作仍需和产业发展同步骤、等重视的进行,才能对光伏产业的可持续健康发展起到人才队伍的支撑作用。

未来的世界,是能源的世界;能源雄于地球,则国雄于地球。无数中国光伏人为之付出了心血,本书倡导者上海交通大学崔容强教授也是其中的身体力行者。我与崔教授相识二十多年,从他身上不仅学到了很多知识,听到了许多真知灼见,更感受到他对我国光伏事业的极大热情和忘我追求。我印象最深的一次是我们在西藏拉萨的大昭寺屋顶上不期而遇,在那里面对雄伟的布达拉宫畅谈西藏光伏事业的美好未来。崔教授不仅毕生致力于中国太阳能光伏的科学研究和应用推广,还孜孜不倦为培养光伏人才做出了巨大贡献,谨以此序,纪念逝者崔容强教授。

本书的编撰,上海市太阳能学会理事长、上海交通大学沈文忠教授组织了行业内有着丰富的知识理论基础和应用实践经验的知名专家团队,全面、系统地阐述了太阳能光伏发电技术与应用技术,并介绍了光伏发电未来的新趋势、新技术和新热



点,是一本兼具全面性、先进性和科学性的太阳能光伏产业学术专著与教育培训教材、指导用书。作为国务院参事和中国可再生能源学会理事长,我非常高兴推荐本书,希望本书能实现授业解惑之理想,惠及千万之光伏从业人员及后来者,意义不凡且深远。

2013年9月

前 言

太阳能光伏发电依靠太阳电池可以把光能直接转变为电能。在过去十年中,光伏电池全球总产量以平均超过 40% 的年增长率增加着,至 2012 年底全球光伏发电系统装机容量已达 100GW_p。预计光伏发电将在 2030 年占到世界能源供给的 10%,对世界的能源供给和能源结构调整做出实质性的贡献。我国太阳电池年产量自 2007 年起一直世界第一,2012 年的太阳电池年产量占全球太阳电池年产量的 50% 以上。很多省市已经把光伏发电作为新能源高科技龙头产业来规划发展;一些大学不仅开设了光伏发电专业课,还专门成立了光伏科学工程系、光伏学院来培养专业人才。

然而我们仍然清楚地看到,在光伏产业高歌猛进的同时,由于太阳能光伏技术是一门综合性的高技术行业,涉及多个交叉学科(基础理论与技术科学,主要有物理特别是半导体物理、光学、电子学及电工学等,此外与化学、材料科学等也密切相关),国内全方位的光伏应用技术专业人才严重缺乏。为缓和光伏领域专业人才匮乏的局面,全面提高我国太阳能光伏应用技术人才的培养质量和教学水平,早在 2009 年崔容强教授应上海交通大学出版社邀请有意编写本书,定下了本书的主旨和章节框架,后由于身体原因没有开展编撰工作。崔容强教授对我国太阳能光伏科学与技术的进步做出了突出的贡献,为了表达我们的敬意,编者代表上海市太阳能学会邀请 20 多位在太阳能光伏发电技术各个方面长期从事相关研究和产业的知名专家(同时也是崔教授的同事、朋友和学生),组织编写了这本涵盖面广阔的太阳能光伏发电与应用专著。

本书是国内第一本全面反映太阳能光伏发电技术与应用的学术专著。全书共分 20 章,从内容上可以分为四个层面:①太阳能利用以及太阳电池物理(第 1~4 章);②太阳电池材料、器件及组件工艺(第 5~9、15 章);③光伏发电系统和检测技术(第 10~14 章);④与光伏发电相关的储能技术、智能电网技术、系统可靠性以及认证、标准和展望(第 16~20 章)。本书的另一个特点是专业性强。作者既有来自



高校和科研院所的知名光伏技术科研工作者,又有来自知名光伏企业的主要技术负责人,他们在太阳能光伏发电整个产业链积累了丰富的专业基础理论知识和应用实践能力,通过总结研究成果并结合各自的应用经验,本书反映了当前太阳能光伏发电科研和生产的最先进水平和技术,力求成为一本具有重要实际指导意义和实用价值的参考用书。

本书可作为从事太阳能光伏及相关技术领域的研发和工程技术人员的学习参考用书,也可供高等院校的半导体材料与器件、光电子和光学工程等相关专业师生参考。本书的主旨是向有关研究人员和从业人员提供太阳能光伏技术与应用全方位的专业基础理论知识、光伏发电的各种应用与检测认证技术和发展前景。编者期望,随着掌握太阳能光伏技术与应用专业知识的人才逐年增加,能够为社会提供更多优秀的工程师,以参与推进全球光伏产业的快速发展。

本书的编写工作一直得到国务院参事、中国可再生能源学会石定寰理事长的关心和指导,石理事长在百忙之中亲自为本书作序;本书的出版工作也得到上海市科技专著出版基金、江西赛维 LDK 太阳能高科技有限公司和苏州中来光伏新材股份有限公司的资助,特此感谢。

本书在编写过程中力求工艺技术介绍全面、应用信息量大、表述清晰、文字叙述流畅。限于编者学识和水平,加之时间仓促,本书存在的缺点和错误,恳请读者和同行批评指正。

编者

2013年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 太阳能技术分类 / 1	
1.2 光伏效应与太阳电池 / 8	
1.3 能源革命前夜 / 19	
1.4 光伏发电的战略地位和实施步骤 / 23	
1.5 太阳电池的发展 / 27	
参考文献 / 35	
第 2 章 太阳与太阳能	39
2.1 引言 / 39	
2.2 太阳结构 / 39	
2.3 日地运动规律 / 40	
2.3.1 地球的自转和公转 / 40	
2.3.2 太阳的视运动 / 41	
2.3.3 斜面上的太阳辐射 / 42	
2.4 到达大气层外的太阳辐射能 / 42	
2.4.1 太阳常数 / 42	
2.4.2 大气质量 / 43	
2.5 太阳光谱 / 43	
2.5.1 黑体辐射 / 43	
2.5.2 标准太阳光谱 / 44	
2.6 到达地面的太阳辐射能 / 45	
2.7 中国和世界的太阳辐射能 / 46	



- 2.7.1 全球太阳能资源分布 / 46
- 2.7.2 中国的太阳辐射能 / 46
- 参考文献 / 49

第3章 半导体物理基础 50

- 3.1 引言 / 50
- 3.2 半导体中的电子与空穴 / 50
- 3.3 半导体掺杂效应 / 53
 - 3.3.1 n型掺杂、p型掺杂与电离 / 53
 - 3.3.2 掺杂半导体的载流子浓度 / 54
 - 3.3.3 半导体中不同类型杂质的相互补偿作用 / 55
- 3.4 半导体中载流子的输运 / 56
 - 3.4.1 半导体中载流子的漂移 / 56
 - 3.4.2 半导体中载流子的扩散 / 57
 - 3.4.3 半导体中的电流 / 58
- 3.5 半导体中的非平衡载流子 / 58
 - 3.5.1 非平衡载流子的产生与复合 / 59
 - 3.5.2 载流子复合机制 / 60
 - 3.5.3 表面复合与其他结构缺陷复合 / 63
 - 3.5.4 陷阱效应 / 63
- 3.6 p-n结 / 64
 - 3.6.1 p-n结内建电场的形成 / 65
 - 3.6.2 p-n结 I-V 特性 / 67
- 3.7 半导体与光的相互作用 / 69
 - 3.7.1 半导体的基本光学性能 / 69
 - 3.7.2 半导体的光吸收机制 / 70
- 3.8 结语 / 72
- 参考文献 / 72

第4章 光伏发电原理与效率控制因素 74

- 4.1 引言 / 74
- 4.2 晶体硅太阳电池基本结构与原理 / 75
 - 4.2.1 晶体硅太阳电池基本构成、功能与工艺概述 / 75
 - 4.2.2 半导体太阳电池发电原理 / 76
- 4.3 太阳电池输出性能参数 / 78

4.3.1	太阳电池等效电路与基本参数 / 78	
4.3.2	太阳电池 I - V 特性与其他性能参数 / 80	
4.4	太阳电池计算模拟原理与应用—PC1D 软件介绍 / 83	
4.4.1	半导体器件物理基本方程与太阳电池边界条件 / 83	
4.4.2	PC1D 操作和应用介绍 / 85	
4.5	太阳电池能量转换效率的局限与损失 / 88	
4.5.1	太阳电池效率的自然局限 / 88	
4.5.2	太阳电池效率的技术性因素损失 / 90	
4.5.3	太阳电池效率优化分析 / 92	
4.6	结语 / 94	
	参考文献 / 95	
第 5 章	晶体硅材料	96
5.1	引言 / 96	
5.2	太阳能级多晶硅 / 97	
5.2.1	太阳能级多晶硅的特征 / 98	
5.2.2	多晶硅的生产技术选择 / 102	
5.2.3	多晶硅西门子生产技术 / 108	
5.2.4	低成本太阳能级多晶硅生产方法 / 112	
5.3	硅晶体生长技术 / 114	
5.3.1	直拉硅单晶生长 / 114	
5.3.2	铸造多晶硅生长 / 120	
5.3.3	铸造硅单晶生长 / 124	
5.3.4	硅晶体的掺杂 / 127	
5.3.5	硅晶体中的杂质 / 129	
5.3.6	硅晶体中的缺陷 / 132	
5.4	硅晶体加工技术 / 135	
5.4.1	直拉硅单晶的切断和切方 / 135	
5.4.2	铸造多晶硅的切方 / 135	
5.4.3	硅晶体切片 / 136	
5.5	结语 / 137	
	参考文献 / 137	
第 6 章	晶体硅光伏电池的制备	140
6.1	引言 / 140	



- 6.2 常规晶体硅光伏电池的制造方法 / 140
 - 6.2.1 表面制绒 / 141
 - 6.2.2 p-n 结扩散 / 142
 - 6.2.3 边缘隔离刻蚀—去除磷硅玻璃 / 143
 - 6.2.4 淀积 SiN_x 减反射膜 / 144
 - 6.2.5 丝网印刷正、背面金属 / 145
 - 6.2.6 金属烧结 / 145
 - 6.2.7 测量光电性能 / 146
- 6.3 常规晶体硅光伏电池制造方法的提高 / 146
 - 6.3.1 正面金属化技术的改进 / 147
 - 6.3.2 选择性发射极(selective emitter, SE)电池技术 / 148
 - 6.3.3 离子注入发射极电池技术 / 149
 - 6.3.4 MWT 电池技术 / 150
- 6.4 高效晶体硅光伏电池的制造方法 / 150
 - 6.4.1 高效电池对晶体硅材料的要求——高载流子寿命 / 151
 - 6.4.2 表面钝化技术 / 153
 - 6.4.3 高效晶硅电池金属化技术 / 155
 - 6.4.4 陷光效应与背面光反射镜 / 156
 - 6.4.5 高效电池结构的设计 / 159
- 6.5 一些高效晶硅光伏电池的结构 / 159
 - 6.5.1 PERL 电池 / 160
 - 6.5.2 PERC 电池和 LFC 电池 / 163
 - 6.5.3 n 型衬底电池及其 p 型发射区表面的钝化技术 / 164
 - 6.5.4 IBC(背面接触电池) / 165
 - 6.5.5 HIT(Heterojunction with intrinsic thin layer)
异质结电池 / 167
 - 6.5.6 其他结构的高效晶硅太阳电池 / 167
- 6.6 结语 / 168
- 参考文献 / 168

第 7 章 硅基薄膜太阳电池 173

- 7.1 引言 / 173
- 7.2 非晶硅材料与微晶硅材料 / 174
 - 7.2.1 非晶硅材料($\alpha\text{-Si:H}$)的结构特点 / 174
 - 7.2.2 非晶硅材料($\alpha\text{-Si:H}$)的光学、电学性质 / 176

7.2.3	微晶硅($\mu\text{c-Si:H}$)材料及特性 / 178	
7.2.4	硅基合金薄膜及特性 / 181	
7.3	非晶硅和微晶硅薄膜材料的生长 / 183	
7.3.1	非晶硅和微晶硅薄膜的沉积 / 183	
7.3.2	微晶硅薄膜生长模型 / 184	
7.3.3	工艺参数对微晶硅薄膜材料的影响 / 186	
7.4	非晶硅太阳能电池与微晶硅太阳能电池 / 186	
7.4.1	非晶硅太阳能电池特点 / 186	
7.4.2	非晶硅太阳能电池和微晶硅太阳能电池结构 / 187	
7.4.3	玻璃衬底非晶硅和微晶硅太阳能电池制造技术 / 191	
7.5	柔性硅基薄膜太阳能电池 / 195	
7.5.1	ECD & Uni-Solar 不锈钢柔性衬底三结叠层硅基 薄膜太阳能电池 / 196	
7.5.2	FUJI 公司塑料衬底双结叠层硅基薄膜太阳能电池 / 198	
7.6	结语 / 199	
	参考文献 / 200	
第 8 章	化合物薄膜光伏电池	202
8.1	引言 / 202	
8.2	CdTe 薄膜太阳能电池 / 203	
8.2.1	CdTe 薄膜太阳能电池的发展历程 / 203	
8.2.2	CdTe 薄膜太阳能电池的结构与特点 / 204	
8.2.3	CdTe 薄膜材料物性 / 205	
8.2.4	CdTe 薄膜制备工艺 / 205	
8.2.5	CdTe 薄膜太阳能电池的发展趋势 / 208	
8.3	CIGS 薄膜太阳能电池 / 209	
8.3.1	CIGS 薄膜太阳能电池的发展历程 / 210	
8.3.2	CIGS 薄膜太阳能电池的结构与特点 / 212	
8.3.3	CIGS 材料物性 / 214	
8.3.4	CIGS 薄膜工艺 / 217	
8.3.5	CIGS 太阳能电池窗口层材料的制备工艺 / 222	
8.3.6	CIGS 薄膜太阳能电池产业化的发展趋势 / 223	
8.4	结语 / 224	
	参考文献 / 224	



第 9 章 太阳电池组件	231
9.1 引言 / 231	
9.2 太阳电池组件的分类 / 231	
9.3 晶硅太阳电池组件 / 232	
9.3.1 晶硅太阳电池组件的发展历史 / 232	
9.3.2 晶硅太阳电池组件的原材料 / 232	
9.3.3 晶硅太阳电池组件的制造工艺 / 237	
9.3.4 晶硅太阳电池组件的焊接技术 / 242	
9.3.5 晶硅太阳电池组件封装的功率损失 / 245	
9.3.6 晶硅太阳电池组件的技术要求及定型试验 / 248	
9.4 刚性薄膜太阳电池组件 / 250	
9.5 BIPV 光伏组件 / 253	
9.5.1 薄膜电池 BIPV 组件 / 253	
9.5.2 晶硅电池 BIPV 组件 / 254	
9.6 非标准条件下太阳电池组件的发电模型 / 255	
9.6.1 非标准条件下太阳电池组件最佳工作电流 / 255	
9.6.2 非标准条件下太阳电池组件最佳工作电压 / 255	
9.6.3 非标准条件下太阳电池组件的工作温度 / 255	
9.6.4 非标准条件下太阳电池组件的输出功率 / 256	
9.7 结语 / 256	
参考文献 / 256	
第 10 章 逆变器、控制器等配套部件及主要材料	258
10.1 引言 / 258	
10.2 离网型逆变器 / 259	
10.2.1 离网型逆变器的基本概念 / 259	
10.2.2 离网型逆变器的常见拓扑 / 260	
10.2.3 离网型逆变器的控制策略 / 261	
10.2.4 离网型逆变器的主要技术性能及评价选用 / 262	
10.3 并网逆变器 / 264	
10.3.1 并网系统的体系结构 / 264	
10.3.2 并网逆变器的常见拓扑 / 265	
10.3.3 并网逆变器的控制策略 / 272	
10.3.4 并网逆变器的技术性能 / 276	
10.4 控制器 / 277	

10.4.1	控制器的基本原理和要求 / 278	
10.4.2	充放电控制器的设计 / 279	
10.5	支架 / 279	
10.5.1	太阳能光伏支架的要求 / 280	
10.5.2	太阳能光伏支架的分类 / 280	
10.5.3	太阳能光伏支架的材质 / 282	
10.5.4	太阳能光伏支架系统的技术难点 / 282	
10.5.5	太阳能光伏支架的成本分析 / 283	
10.6	电线电缆 / 283	
10.6.1	电线电缆的基本概念 / 283	
10.6.2	电线电缆命名 / 283	
10.6.3	电线电缆型号 / 285	
10.6.4	电线电缆的应用分类 / 285	
10.6.5	电线电缆的产品分类 / 286	
10.6.6	电线电缆的选择 / 287	
10.7	接线及开关 / 287	
10.7.1	太阳电池组件与并网逆变器间接线 / 288	
10.7.2	太阳能电池阵列侧开关 / 289	
10.7.3	主开关 / 289	
10.7.4	避雷装置 / 289	
10.7.5	接地施工 / 290	
10.7.6	并网逆变器与配电箱接线 / 291	
10.8	最大功率点跟踪(MPPT)及孤岛效应问题 / 292	
10.8.1	最大功率点跟踪概述 / 293	
10.8.2	孤岛效应概述 / 300	
10.9	结语 / 303	
	参考文献 / 304	
第 11 章	光伏发电系统及应用	305
11.1	引言 / 305	
11.2	光伏系统的内部构成及其作用 / 306	
11.2.1	太阳电池 / 306	
11.2.2	汇流箱 / 306	
11.2.3	蓄电池 / 307	
11.2.4	逆变器 / 307	



11.2.5	保护开关箱和配电柜 / 307
11.2.6	运行监控系统 / 308
11.3	光伏系统 / 309
11.3.1	离网型光伏系统 / 309
11.3.2	并网型光伏系统 / 312
11.3.3	光伏系统效率 / 319
11.3.4	光伏微电网 / 319
11.3.5	全球光伏联网系统 / 322
11.4	光伏与建筑的结合 / 323
11.4.1	建筑结合式光伏方阵(BAPV) / 324
11.4.2	建筑一体化光伏方阵(BIPV) / 325
11.5	结语 / 330
	参考文献 / 330
第 12 章	空间光伏电池及空间发电系统 331
12.1	引言 / 331
12.2	空间用晶体硅光伏电池 / 333
12.2.1	空间用晶体硅光伏电池概述 / 333
12.2.2	空间用晶体硅光伏电池的制造 / 337
12.3	空间用砷化镓光伏电池 / 344
12.3.1	空间用砷化镓光伏电池概述 / 344
12.3.2	空间用砷化镓光伏电池制备 / 353
12.4	空间用薄膜光伏电池 / 359
12.4.1	空间用薄膜电池的发展前景 / 359
12.4.2	空间用薄膜电池分类 / 360
12.4.3	空间薄膜太阳电池应用 / 362
12.5	空间用光伏发电系统 / 364
12.5.1	概述 / 364
12.5.2	太阳电池阵构型与组成 / 364
12.5.3	太阳电池阵设计 / 368
12.5.4	太阳电池阵的制造 / 371
12.5.5	太阳电池阵的试验、储存及运输 / 372
12.6	空间太阳能电站 / 373
12.6.1	概述 / 373
12.6.2	国外空间太阳能电站设计方案 / 374

12.6.3	我国发展空间太阳能电站的基本构想 / 379	
12.7	结语 / 381	
	参考文献 / 381	
第 13 章	聚光光伏电池及聚光光伏发电系统	383
13.1	聚光光伏分类 / 383	
13.2	低倍聚光电池及系统 / 388	
13.3	高倍聚光电池及系统 / 390	
13.4	跟踪系统 / 396	
	参考文献 / 400	
第 14 章	光伏检测技术及检测仪器	401
14.1	引言 / 401	
14.2	光伏 I - V 特性检测技术与太阳模拟器 / 401	
14.2.1	光伏 I - V 特性检测技术面临的问题 / 402	
14.2.2	标准测试条件(STC)与太阳模拟器等级 / 403	
14.2.3	太阳电池的 I - V 特性测试原理 / 404	
14.2.4	太阳模拟器光学性能对检测结果的影响 / 406	
14.3	标准电池的标定 / 410	
14.3.1	空间标定法 / 410	
14.3.2	综合法 / 411	
14.3.3	二级工作标准电池 / 412	
14.4	光伏性能的评定 / 412	
14.4.1	替代峰值功率的光伏性能评价方法 / 412	
14.4.2	基于能量的光伏性能评价方法 / 413	
14.4.3	转换到标准条件下的方程 / 415	
14.5	光伏缺陷检测方法与仪器 / 416	
14.5.1	易导致电池缺陷的工艺 / 417	
14.5.2	太阳电池缺陷检测方法 / 418	
14.6	量子效率(QE)测量技术与仪器 / 425	
14.7	少子寿命测试分析技术与仪器 / 427	
14.7.1	光电导衰减法 / 427	
14.7.2	准稳态光电导衰减法 / 428	
14.7.3	微波反射光电导衰减法 / 429	
14.8	结语 / 430	



参考文献 / 431

第 15 章 新型光伏电池与技术 436

15.1 引言 / 436

15.2 有机薄膜太阳电池 / 436

15.2.1 有机薄膜太阳电池的发展 / 436

15.2.2 卷对卷技术 / 439

15.2.3 有机太阳电池的产业化 / 442

15.3 染料敏化太阳电池与量子点太阳电池 / 442

15.3.1 染料敏化太阳电池 / 443

15.3.2 量子点太阳电池 / 446

15.4 硅纳米结构太阳电池 / 450

15.4.1 硅纳米线太阳电池 / 450

15.4.2 纳米硅薄膜太阳电池 / 458

15.5 等离子体技术在太阳能光伏上的应用 / 462

15.6 多重激子效应及其在太阳电池上的应用 / 467

15.7 结语 / 470

参考文献 / 470

第 16 章 储能技术 479

16.1 引言 / 479

16.2 机械储能技术 / 481

16.2.1 抽水蓄能 / 481

16.2.2 压缩空气储能 / 486

16.2.3 飞轮储能 / 489

16.3 电磁储能技术——超导储能 / 495

16.4 化学储能技术 / 500

16.4.1 钠硫电池储能技术 / 500

16.4.2 锂离子电池储能技术 / 506

16.4.3 液流电池储能技术 / 518

16.4.4 超级电容器储能 / 525

16.4.5 制氢储能 / 530

16.5 结语 / 538

参考文献 / 538

第 17 章 智能电网与光伏发电技术	548
17.1 引言 / 548	
17.2 智能电网 / 549	
17.2.1 智能电网的战略意义与发展现状 / 549	
17.2.2 智能电网的定义与主要特征 / 552	
17.3 智能电网的技术组成 / 554	
17.3.1 智能电网技术 / 554	
17.3.2 微电网与微能源网 / 558	
17.4 光伏发电并网技术 / 562	
17.4.1 集中式光伏发电集群并网技术 / 563	
17.4.2 分布式光伏发电并网技术 / 565	
17.5 结语 / 570	
参考文献 / 571	
第 18 章 光伏发电系统的可靠性及权威认证	574
18.1 引言 / 574	
18.2 光伏组件可靠性 / 575	
18.2.1 光伏组件常见问题及主要影响 / 577	
18.2.2 主要原因及质量控制 / 578	
18.3 光伏部件的可靠性分析 / 584	
18.3.1 光伏逆变器 / 584	
18.3.2 光伏汇流箱 / 590	
18.4 光伏电站的可靠性分析 / 595	
18.4.1 主要故障及原因 / 595	
18.4.2 提高光伏电站可靠性的措施 / 599	
18.5 权威标准、检测和认证 / 599	
18.5.1 国际光伏产品认证体系 / 599	
18.5.2 国内光伏产品标准测试认证体系 / 604	
18.6 结语 / 616	
参考文献 / 617	
第 19 章 光伏发电国际标准及中华人民共和国国家标准目录	619
19.1 引言 / 619	
19.2 光伏发电国际标准 / 619	
19.2.1 国际主要光伏技术委员会 / 619	



- 19.2.2 光伏发电国际标准目录 / 620
- 19.3 光伏发电中华人民共和国国家标准 / 631
 - 19.3.1 我国太阳光伏能源系统标准体系 / 631
 - 19.3.2 自 2012 年以来新发布的中国国家标准概述 / 632
 - 19.3.3 光伏发电中国国家标准目录 / 632
- 19.4 光伏发电行业标准和地方标准 / 636
 - 19.4.1 光伏发电行业标准和地方标准概述 / 636
 - 19.4.2 光伏发电行业标准和地方标准目录 / 636
- 参考文献 / 638

- 第 20 章 结语——挑战与机遇** 640
 - 20.1 光伏发电的研究课题 / 640
 - 20.1.1 新型太阳电池技术 / 640
 - 20.1.2 光伏产业技术发展 / 644
 - 20.2 对光伏技术的综合评价 / 649
 - 20.2.1 太阳电池的生产成本 / 649
 - 20.2.2 光伏技术的环境问题 / 651
 - 20.2.3 光伏技术的经济问题 / 653
 - 20.2.4 光伏技术的社会效益 / 653
 - 20.3 光伏技术前景展望 / 654
 - 参考文献 / 657

- 索引** 659