

# 太阳能光伏发电 及智能系统

车孝轩 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

013070806

C13070806

TM615

56

# 太阳能光伏发电 及智能系统

车孝轩 著



北航

C1679032

TM 615  
56



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏发电及智能系统/车孝轩著. —武汉: 武汉大学出版社,  
2013. 8

ISBN 978-7-307-11336-7

I. 太… II. 车… III. 太阳能发电 IV. TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 154665 号

责任编辑:谢文涛      责任校对:刘欣      版式设计:马佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 湖北省荆州市今印印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16      印张: 13.25      字数: 263 千字      插页: 2

版次: 2013 年 8 月第 1 版      2013 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-11336-7      定价: 28.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。



车孝轩，教授、东京理科大学工学博士、武汉大学先进能源研究所副所长，兼任神奈川工科大学客员教授、上海交通大学太阳能研究所顾问等。曾任首都大学教授、大阪大学研究员等职。主要从事太阳能光伏发电、直流系统、储能以及智能系统的教学和研究。出版专著有《太阳能光伏系统概论》、《并网型太阳能光伏发电系统》等。



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 前 言

太阳能作为未来的能源，是一种取之不尽、用之不竭的非常理想的清洁能源，可以用于太阳能光伏发电、太阳热发电等许多领域。如果充分合理地利用太阳能，将会为人类提供充足的能源和美好的环境。近年来由于人们对能源、环境以及科学发展等问题的日益关注，太阳能光伏系统的研究、应用与普及越来越受到人们的高度重视，并取得了很大的发展。

我国的太阳能电池产量和安装量有了较大的发展，太阳能电池产量已占世界总产量的半壁江山，2011年太阳能电池产量约为2100MW，同比增长近一倍，装机容量已达到3500MW，同比增长3.4倍，未来将会得到大力普及并引领世界。由于我国太阳能发电量占总发电量的比例非常低，所以太阳能光伏发电具有较大的发展空间。

我国的电力供给严重依赖煤炭和石油，2011年火电发电量占总发电量的82.5%，造成了资源和环境等问题。为了解决这些问题，我国的能源政策正逐步向可再生能源和核电的方向转换。我国高度重视可再生能源发展，2006年1月制定了《可再生能源法》；2007年9月颁布了《可再生能源中长期规划》，计划到2020年可再生能源的消费比例占一次能源消费的15%；2008年3月颁布了《可再生能源发展十一五规划》；2010年4月对《可再生能源法》进行了修订，制定了一系列支持可再生能源产业发展的政策，并决定了太阳能发电的上网价格。2011年3月，在第十二个五年计划中明确提出到2015年非石化燃料的消费占一次能源消费的比重为11.4%（2011年已达8%），计划实施大型风电厂、大型太阳能光伏电站工程，这些政策为太阳能发电的应用和大量普及提供了保证，必将促使包括太阳能发电在内的可再生能源得到更大发展。

本书介绍了太阳能光伏系统方面的基础知识，国内外的最新技术、最新成果、最新课题以及未来展望。内容包括太阳能，新型太阳能电池及组件，太阳能光伏系统及系统电气设备，太阳能光伏系统的设计、应用、安装、检查与试验、故障诊断，智能系统，太阳能光伏系统的课题和未来展望等，为了便于阅读和参考，加入了英文专业术语和检索。本书作为太阳能方面的系列教材之一，以后还将陆续出版《太阳能电池原理与设计》、《太阳能材料与器件测试技术》、《太阳能电池组件制造技术》等教材。可用于新能源材料与器件、新能源科学与工程等专业的教材或参考书。也可作为大专院校师生、科技工作者以及太阳能爱好者的参考书。

2012年5月30日国家通过了《十二五国家战略性新兴产业发展规划》，明确提出了新能源产业要发展技术成熟的核电、风电、太阳能光伏和热利用、生物质发电、沼气等，2012年11月开始6MW以下的太阳能光伏系统可上网。可以预料，今后我国的太阳能光伏系统的应用与普及将会得到快速发展，特别是并网系统将会大量普及。当今，人们对解决能源、环境以及科学发展等问题尤为关注，希望本书能对人们的关注和行动有所启示和帮助。

车孝轩

2013年6月

# 目 录

05	.....	1.3.3
05	.....	1.3.3
28	.....	1.3.3
30	.....	1.3.3
37	.....	1.3.3
39	.....	1.3.3
44	.....	1.3.10
<b>第1章 总论</b>	.....	<b>1</b>
1.1	能源与需求	1
1.2	能源与环境	1
1.3	世界能源资源的可开采年数	2
1.4	太阳能	3
1.5	太阳能利用的形式	3
1.6	太阳能发电	4
1.7	太阳能发电的现状	4
1.8	太阳能发电的未来	6
<b>第2章 太阳能</b>	.....	<b>9</b>
2.1	太阳能资源	9
2.2	太阳能量的衰减	9
2.3	地表面太阳能量的分布	10
2.4	直达日照、散乱日照与全天日照	12
2.5	日照诸量	13
2.6	太阳光频谱	14
2.7	各种太阳电池的分光感度特性	15
2.8	日照量的分布	16
2.9	太阳能的利用	18
<b>第3章 太阳电池</b>	.....	<b>19</b>
3.1	太阳电池的特点	19
3.2	太阳电池的发电原理及构造	20
3.3	太阳电池的种类	22
3.3.1	单晶硅太阳电池	24
3.3.2	多晶硅太阳电池	25
3.3.3	非晶硅太阳电池	25

3.3.4	化合物太阳电池	26
3.3.5	有机太阳电池	29
3.3.6	薄膜太阳电池	35
3.3.7	透明太阳电池	36
3.3.8	积层太阳电池	37
3.3.9	球状太阳电池	39
3.3.10	量子点太阳电池	41
3.4	太阳电池的特性	45
3.4.1	太阳电池的输入输出特性	45
3.4.2	太阳电池的分光感度特性	48
3.4.3	太阳电池的照度特性	50
3.4.4	太阳电池的温度特性	50
3.5	太阳电池的制造方法	51
3.5.1	单晶硅太阳电池的制造方法	51
3.5.2	多晶硅太阳电池的制造方法	52
3.5.3	非晶硅太阳电池的制造方法	53
3.5.4	化合物半导体太阳电池的制造方法	53
3.5.5	有机薄膜太阳电池的制造方法	54
<b>第4章 太阳电池组件</b>		<b>56</b>
4.1	太阳电池芯片、组件	56
4.2	太阳电池组件及其构造	57
4.2.1	背面衬底型组件	57
4.2.2	表面衬底型组件	57
4.2.3	填充型组件	58
4.2.4	衬底一体表面衬底型组件	58
4.3	太阳电池组件的种类	59
4.3.1	一般常用型直流出力太阳电池组件	59
4.3.2	建材一体型太阳电池组件	59
4.3.3	采光型太阳电池组件	66
4.3.4	新型太阳电池组件	67
4.4	建材一体型太阳电池组件的应用	71
4.4.1	太阳能光伏系统在住宅方面的应用	71
4.4.2	太阳能光伏系统在公共设施方面的应用	72



<b>第5章 太阳能光伏系统概要</b> .....	75
5.1 太阳能光伏系统的种类及用途 .....	75
5.2 独立系统 .....	76
5.2.1 独立系统的用途 .....	77
5.2.2 独立系统的构成及种类 .....	77
5.3 并网系统 .....	79
5.3.1 有反送电并网系统 .....	79
5.3.2 无反送电并网系统 .....	79
5.3.3 切换型并网系统 .....	80
5.3.4 独立运行切换型太阳能光伏系统(防灾型) .....	80
5.3.5 直、交流并网型太阳能光伏系统 .....	81
5.3.6 地域并网型太阳能光伏系统 .....	82
5.3.7 太阳能直流系统 .....	84
5.4 混合系统 .....	86
5.4.1 光、热混合太阳能系统 .....	87
5.4.2 太阳能光伏、燃料电池系统 .....	87
5.5 储能系统 .....	88
5.5.1 储能问题 .....	88
5.5.2 电能供求关系 .....	89
5.5.3 储能方式 .....	91
5.5.4 蓄能系统 .....	93
5.6 小规模新能源电力系统 .....	96
5.7 聚光式太阳能光伏系统 .....	97
5.7.1 聚光比与转换效率 .....	97
5.7.2 聚光式太阳电池的构成及发电原理 .....	98
5.7.3 聚光式太阳能光伏系统的特点 .....	99
5.7.4 跟踪式太阳能光伏系统 .....	99
5.7.5 聚光式太阳能光伏系统的应用 .....	100
<b>第6章 太阳能光伏系统的基本构成</b> .....	102
6.1 太阳能光伏系统的特点 .....	102
6.2 太阳能光伏系统的基本构成 .....	102
6.3 太阳电池芯片、组件及方阵 .....	104
6.3.1 太阳电池芯片 .....	104
6.3.2 太阳电池组件 .....	104

6.3.3	太阳电池方阵	104
6.3.4	太阳电池方阵的电路构成	105
6.4	功率控制器	106
6.4.1	逆变器	107
6.4.2	逆变器的绝缘方式	116
6.4.3	滤波器	118
6.4.4	系统并网保护装置	119
6.4.5	孤岛运行检测	119
6.4.6	升压式功率控制器	123
6.4.7	多功能功率控制器	124
6.5	其他设备	124
<b>第7章 太阳能光伏系统的设计</b>		<b>127</b>
7.1	太阳能光伏系统设计的诸因数	127
7.1.1	太阳能光伏系统设计时的调查	127
7.1.2	太阳能光伏系统设置的用途、负载情况	127
7.1.3	系统的类型、构成的选定	128
7.1.4	设置场所、设置方式的选定	128
7.1.5	太阳电池的方位角、倾斜角的选定	129
7.1.6	可设置的面积	129
7.1.7	太阳电池方阵的设计	130
7.2	太阳能光伏系统的设计步骤	130
7.3	太阳能光伏系统设计方法概要	131
7.3.1	参数分析法	131
7.3.2	计算机仿真法	134
7.4	独立型太阳能光伏系统的设计	137
7.4.1	使用参数分析法设计独立型太阳能光伏系统	137
7.4.2	使用计算机仿真方法设计独立型太阳能光伏系统	145
7.5	住宅用太阳能光伏系统的设计	147
7.5.1	设计步骤	147
7.5.2	设计条件	148
7.5.3	太阳电池方阵的设计	148
7.6	太阳能光伏系统成本核算	149

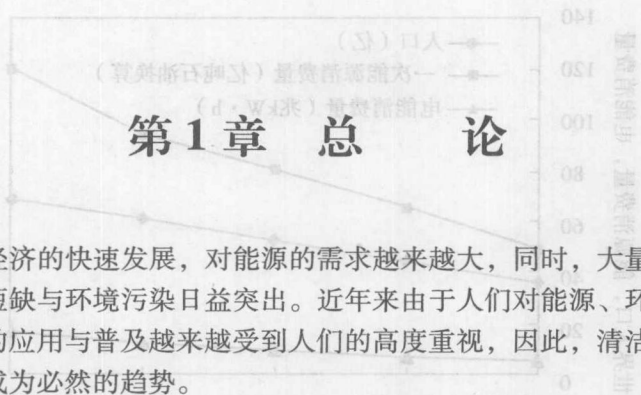
<b>第 8 章 太阳能光伏系统的应用</b> .....	151
8.1 民用太阳能光伏系统 .....	151
8.1.1 太阳能计算器 .....	151
8.1.2 太阳能钟表 .....	152
8.1.3 太阳能充电器 .....	153
8.1.4 交通指示用太阳能光伏系统 .....	154
8.1.5 防灾、救助太阳能光伏系统 .....	154
8.1.6 其他应用 .....	155
8.2 住宅用太阳能光伏系统 .....	155
8.3 大楼用太阳能光伏系统 .....	156
8.4 集中并网型太阳能光伏系统 .....	158
8.5 大型太阳能光伏系统的应用 .....	158
<b>第 9 章 智能系统</b> .....	160
9.1 智能电表 .....	160
9.1.1 智能电表 .....	160
9.1.2 智能电表的构成 .....	160
9.1.3 智能电表的功能 .....	161
9.1.4 智能电表的应用 .....	161
9.2 智能房 .....	162
9.2.1 智能房 .....	162
9.2.2 智能房的构成 .....	162
9.2.3 智能房的功能 .....	162
9.2.4 智能房的应用 .....	163
9.3 智能微网 .....	163
9.3.1 智能微网的构成 .....	164
9.3.2 智能微网的特点 .....	164
9.3.3 智能微网的应用 .....	165
9.4 智能电网 .....	165
9.4.1 智能电网 .....	165
9.4.2 智能电网构成 .....	166
9.4.3 智能电网的特点 .....	167
9.4.4 智能电网的应用 .....	168
9.5 智能城市 .....	169
9.5.1 智能城市 .....	169

9.5.2	智能城市的构成	169
9.5.3	智能城市的应用	169
<b>第10章 太阳能光伏系统的安装</b> 170		
10.1	太阳电池的设置场所、安装方法概要	170
10.2	住宅用太阳能光伏系统屋顶安装方法	170
10.2.1	屋顶安装型太阳电池方阵	170
10.2.2	拉紧固定线方式	171
10.2.3	支撑金具方式	172
10.2.4	建材一体型太阳电池组件的安装方法	172
10.3	电气设备的安装、配线以及接地	173
10.3.1	电气设备的安装	173
10.3.2	太阳电池组件与功率控制器之间的配线	174
10.3.3	功率控制器与分电盘之间的配线	175
10.3.4	太阳电池方阵的检查	175
10.3.5	接地施工	175
10.3.6	防雷措施	175
<b>第11章 太阳能光伏系统的试验与故障诊断</b> 177		
11.1	太阳能光伏系统的检查种类	177
11.2	太阳能光伏系统的检查	177
11.3	太阳能光伏系统的试验方法	178
11.3.1	绝缘电阻试验	178
11.3.2	绝缘耐压试验	180
11.3.3	接地电阻试验	180
11.3.4	太阳电池方阵的出力试验	180
11.3.5	系统并网保护装置试验	181
11.4	太阳能光伏系统的故障诊断	181
11.4.1	太阳能光伏系统常见故障	181
11.4.2	故障诊断方法	183
11.4.3	故障诊断事例	184
<b>第12章 太阳能发电的课题与展望</b> 186		
12.1	太阳电池	186
12.2	功率控制器	188

---

12.3	太阳能光伏系统·····	188
12.4	储能系统·····	190
12.5	太阳能光伏系统出力预测·····	190
12.6	产能、蓄能和节能·····	191
12.7	智能系统·····	191
12.8	地球规模的太阳能光伏系统·····	191
12.9	宇宙太阳能光伏系统·····	193
索 引·····		194
参考文献·····		200

# 第 1 章 总 论



随着我国经济的快速发展，对能源的需求越来越大，同时，大量化石能源的使用导致能源的短缺与环境污染日益突出。近年来由于人们对能源、环境问题的日益关注，太阳能的应用与普及越来越受到人们的高度重视，因此，清洁、可再生的新能源的应用已成为必然的趋势。

本章主要介绍能源与需求、人口、环境之间存在的问题，可供开采的能源资源，以及对太阳能发电的现状与未来的展望。

## 1.1 能源与需求

能源是人类赖以生存的基础，从日常生活所必需的电、水、气到人们所利用的交通、通信、娱乐等都与能源息息相关，人类为了生存需要利用诸如石油、煤炭、电能等能源。在现代社会中，随着世界人口的增加，能源的需求也在不断地增加。其中电能也是如此，从图 1.1 可以看出，从 1970 年到 2010 年的 40 年间，世界人口从 37 亿增加到了 69 亿，即人口在 40 年间增加了 1.86 倍，一次能源消费量在过去的 40 年间增加了 2.45 倍。而电能消费量则由 1970 年的 5.4 兆 kW·h 增加到 2010 年的 16.82 兆 kW·h，增加了 3.11 倍。可见，随着世界人口的不断增加，电能的需求也在不断地增加，特别是人类进入 21 世纪高度信息化社会后更是如此。

## 1.2 能源与环境

能源问题可以追溯到 50 万年前人类发现火的时代。人类使用石油、煤炭作为能源也已有相当长的历史了，这些能源虽然为人类的生存和发展以及社会的进步提供了很大的支持，但这些能源的使用同时也给人类自身带来了很大的问题，使地球的环境（如空气、气候等）受到了很大的影响，已经直接危及人类的生活、生存条件。因此必须解决使用化石能源给人类带来的问题。

环境问题主要表现为地球温室效应和酸雨。地球温室效应是由于二氧化碳、氟利昂等温室效应气体使地球吸收的太阳能量不易散发到大气圈所致，使地球的温度在最近 100 年里上升了约 1℃。二氧化碳是由于使用化石能源而产生的，化石能源

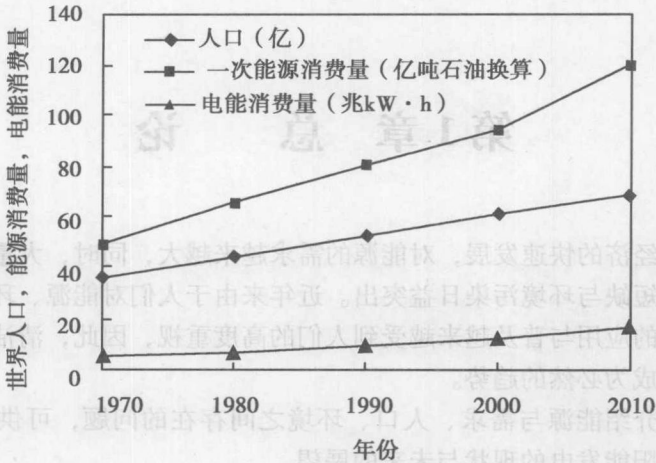


图 1.1 世界人口、能源消费量以及电能消费量

除了产生二氧化碳外，还排出硫磺氧化物、氮氧化物等，由此形成酸雨。

21 世纪人类的文明如何发展，面临诸多的问题。人口的增加、经济的发展必然会导致能源需求的增加。化石能源的开采与使用，一是会出现化石能源的短缺，二是化石能源的使用必然会导致环境的污染、破坏，即经济 (Economy) 的发展使能源 (Energy) 的需求增加，从而导致环境问题 (Environment Problem) 出现。三者之间形成一个链环，要想独立解决其中的任何一个问题并非易事。解决这些问题的办法之一是尽量减少化石能源的消费，大力推广如太阳能等清洁能源的应用。

### 1.3 世界能源资源的可开采年数

现代社会一直以化石燃料作为能源，随着工业化、文明化以及人口的增加，能源需求正在大幅度地增加。图 1.2 所示为世界能源资源的可开采年数 (2005 年末)。由图可知，以后的几十年到 200 年左右资源将会枯竭，可见人类所利用的石油、天然气、煤炭等资源的开采量是有限的。根据估算，石油的开采年数大约为 39 年，煤炭的开采年数大约为 230 年，天然气为 57 年，铀 235 为 67 年。尽管最近发现了页岩气、燃冰等能源，但这些能源终究是有限的，会被开发利用直至枯竭的。因此，为了维持人类的生存与发展，使用包含太阳能发电在内的可再生能源以解决未来人类对能源的需求是必由之路。

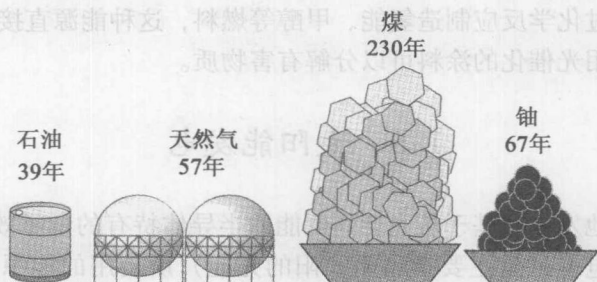


图 1.2 世界能源资源的可开采年数

## 1.4 太阳能

太阳能 (Solar Energy) 是由太阳的氢经过核聚变而产生的一种能源。在它的表面所释放出的能量如果换算成电能则大约为  $3.8 \times 10^{19} \text{ MW}$ 。到达地球的能量中约 30% 反射到宇宙, 剩下的 70% 的能量被地球接收。太阳照射地球一个小时的能量相当于世界一年的总消费能量。可见来自太阳的能量有多么巨大。

人们推测太阳的寿命至少还有几十亿年, 因此对于地球上的人类来说, 太阳能是一种无限的能源。另外, 太阳能不含有害物质, 不排出二氧化碳, 即使地域不同也不会出现不均匀性。

可见太阳能具有能量巨大、非枯竭、清洁、不存在不均匀性问题等特点, 作为未来的能源是一种非常理想的清洁能源。如果合理地利用太阳能, 将会为人类提供充足的能源。

## 1.5 太阳能利用的形式

如上所述, 由于能源需求、人口的增加、环境污染以及可供开采的能源资源的减少等问题, 人们不得不寻求解决这些问题的办法, 而利用清洁、可再生的能源 (Renewables Energy) 可以解决这些问题。太阳能的利用就是其中之一。

太阳能利用的形式多种多样, 如热利用、照明、电力等。热利用就是将太阳能转换成热能, 供热水器、冷热空调系统等使用。利用太阳光给室内照明, 或通过光导纤维将太阳光引入地下室等进行照明。在电力方面的应用主要是利用太阳的热能和光能。一种是利用太阳的热能进行发电, 这种方法是利用聚光得到高温热能, 将其转换成电能的发电方式; 另一种是利用太阳的光能进行发电, 即利用太阳能电池将太阳的光能转换成电能的发电方式。其他方面的应用有: 使用太阳的热能和光能,



通过催化作用经过化学反应制造氢能、甲醇等燃料，这种能源直接利用方式的效率较高。另外，使用光催化的涂料可以分解有害物质。

## 1.6 太阳能发电

利用太阳电池发电是基于从光能到电能的半导体特有的量子效应（光伏效应）原理。太阳能发电（这里主要指利用太阳的光能）所使用的能源是太阳能，而由半导体器件构成的太阳电池是太阳能发电的重要部件。太阳电池可以利用太阳的光能，将光能直接转换成电能，以分散电源系统的形式向负载提供电能。

太阳能发电具有如下的特点：

### 1. 在利用太阳能方面

- (1) 能量巨大、非枯竭、清洁；
- (2) 到处存在、取之不尽、用之不竭；
- (3) 能量密度低、出力随气象条件而变；
- (4) 直流电能、无蓄电功能。

### 2. 将光能直接转换成电能方面

- (1) 阴天、雨天可利用散乱光发电；
- (2) 结构简单、无可动部分、无噪音、无机械磨损、管理和维护简便、可实现系统自动化、无人化；
- (3) 可以方阵为单位选择容量；
- (4) 重量轻、可作为屋顶使用；
- (5) 制造所需能源少、建设周期短。

### 3. 构成分散型电源系统

- (1) 适应发电场所的负载需要、不需输电线路等设备；
- (2) 适应昼间的电力需要、减轻峰电；
- (3) 电源多样化、提供稳定电源。

## 1.7 太阳能发电的现状

太阳能发电正得到越来越广泛地应用，应用范围已遍及民用、住宅、产业等众多领域。2011年世界的太阳电池年生产量已达到37GW，我国已达15GW；2011年世界的太阳能光伏系统的年安装量为27.4GW，我国为2.2GW。

### 1. 太阳电池生产量

图1.3为太阳电池生产量，由曲线可见，生产量呈指数函数增加。2001年世界的太阳电池累计生产量为0.87GW，2011年为89.81GW，是10年前的103.2倍。