



国际电气工程先进技术译丛



# 太阳能光伏并网 发电系统

## Grid-Connected Solar Electric Systems

(澳) Geoff Stapleton 著  
Susan Neill  
王一波 郭靖 译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

# 太阳能光伏并网发电系统

(澳) Geoff Stapleton 著  
Susan Neill  
王一波 郭 靖 译



机械工业出版社

本书比较全面地介绍了光伏系统的设计基础和实践经验。全书共分16章。第1~6章阐述了太阳能辐射、光伏发电技术、光伏器件及系统部件等基础知识。第7~12章深入探讨并网光伏系统选址、设计、安装、调试、运行和维护等技术细节。第13章详细介绍并网光伏系统的经济性及财政补贴。第14章剖析了7个案例及其考虑因素。第15、16章为读者提供了丰富的在线知识资源和专业术语。

本书可作为高等院校新能源专业和电力专业高年级学生的教材,并可作为光伏系统设计人员和工程人员的参考书。

Grid-Connected Solar Electric Systems, by Geoff Stapleton and Susan Neill.

© 2012 Global Sustainable Energy Solutions Pty Ltd.

Authorized translation from English language edition published by Earthscan, Part of Taylor & Francis Group LLC, All rights reserved.

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 Earthscan 出版公司出版,经其授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

本书中文简体翻译版授权机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2013-0186 号

## 图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏并网发电系统/(澳)斯泰普尔顿(Stapleton, G.), (澳)尼尔(Neill, S.)著;王一波,郭靖译. —北京:机械工业出版社,2014.3

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Grid-connected solar electric systems

ISBN 978-7-111-46067-1

I. ①太… II. ①斯…②尼…③王…④郭… III. ①太阳能发电-系统工程  
IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第043742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:闫洪庆 版式设计:赵颖喆

责任校对:闫玥红 封面设计:马精明 责任印制:乔

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2014年5月第1版第1次印刷

169mm×239mm·12.25印张·242千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-46067-1

定价:58.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmpl952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版



# 译 者 序

世界太阳能光伏发电系统在近五年里保持连续高速增长，到2012年世界光伏发电累积装机容量已经达到102GW，并且成为增长速度最快的发电技术，光伏发电在20多个国家实现平价上网。2012年，我国光伏发电装机容量已经步入世界前列，随着国家关于分布式光伏发电政策的陆续出台，预计不久光伏系统将进入千家万户。

本书是一部适合不同专业水平人员阅读的书籍，全面介绍了光伏系统的电气基础、关键部件、系统设计安装、维护与故障排除、经济性与市场化等方面的相关知识，是一部难得的专业技术书籍。此时把本书翻译成中文版，满足了读者对光伏系统基础知识和专业资料的迫切需求，同时我们希望本书能够填补人们在并网光伏发电系统方面的知识。

本书是受机械工业出版社委托，由王一波和郭靖共同翻译。机械工业出版社付承桂和诸多同志为出版本书付出了辛勤的努力，在此表示诚挚的感谢。

我们希望本书的翻译和出版对于我国光伏系统方面的教学科研和工程实践能有所帮助。由于时间和水平有限，难免存在许多不足之处，敬请读者批评指正。

译 者

# 原书前言和致谢

世界太阳能光伏并网发电系统市场从 2006 年的 1.55GW 增长到了 2010 年的 11.86GW。2010 年的数据代表着在 2006 年数据的基础上增长了 665%。

不难预见，普通公众以及商人、技术人员和其他职业人员将会需要太阳能光伏并网发电系统各个方面的信息，因为他们将会看到在市郊和大型屋顶上架设起的这些系统，还希望了解太阳能发电如何影响他们的生活。

太阳能光伏并网发电系统为什么能工作、如何工作，以及对电网体现出什么价值，在缺乏基础技术和工程信息的背景下，这些问题可能会被误解。正如在不断增长的太阳能光伏并网发电系统市场上可以亲眼所见的，太阳能组件和配套产品（如逆变器、支架结构等）的技术及产业化现在已经成熟。产品需求正在逐年增长，产业也在健康良性地向前发展，因此许多厂商转移到这个技术市场，驱动了价格的下降。世界各国的政府针对可再生能源引入了多种多样的经济驱动政策，影响太阳能发电系统的典型政策有补贴、上网电价和可赎回型可再生能源信用额度。

Global Sustainable Energy Solutions 公司很荣幸在此刻受到 Earthscan 出版社邀请来编写本书，因为各种产品的市场需求清晰表明一种对不同层次信息的需求。

本书适合想要了解太阳能光伏并网发电系统的任何人。本书从太阳辐射及其起源开始，介绍了光伏组件、太阳能发电系统、系统组成、系统安装，直到这些系统的经济性。

感谢在本书完成过程中贡献了时间和/或信息的许多人：Caitlin Trethewy 从撰写本书第一天起就从事收集信息、研究、撰写内容和各章统稿的工作，直到本书终稿；Global Sustainable Energy Solutions 私人有限公司的员工们为本书做出了贡献；Pamela Silva 的贡献在于从美国来到澳大利亚的这段时间；Anthony Allen 的贡献在于技术性图纸；我们信任所有图片提供者，并致以谢意；给我们提供案例研究信息和照片的公司及个人如下：Blair Reynolds, BMC Solar 公司 ([www.bmc solar.com](http://www.bmc solar.com))；Briana Green 和 Green Solar 集团公司 ([www.greensolargroup.com.au](http://www.greensolargroup.com.au))；Frank Jackson、Paul Barwell、Tony J. Almond 和 Planet Energy Solutions 公司 ([www.planetenergy.co.uk](http://www.planetenergy.co.uk))。

# 目 录

译者序

原书前言和致谢

<b>第 1 章 太阳能发电介绍</b> .....	1
1.1 为什么使用太阳能发电 .....	1
1.2 什么是太阳能发电系统 .....	2
1.2.1 离网系统 .....	3
1.2.2 并网系统 .....	3
1.3 其他太阳能技术 .....	5
1.3.1 太阳能热发电 .....	5
1.3.2 太阳能热水 .....	6
1.3.3 聚光太阳能发电 .....	6
1.3.4 被动式太阳能设计 .....	7
1.4 如何使用本书 .....	8
<b>第 2 章 太阳能资源和太阳辐射</b> .....	11
2.1 太阳能资源 .....	11
2.2 太阳辐射的量化 .....	12
2.3 地球大气层对太阳辐射的影响 .....	14
2.4 太阳的几何学 .....	18
2.5 光伏阵列安装的几何学 .....	20
备注 .....	23
<b>第 3 章 光伏产业和技术</b> .....	24
3.1 半导体器件 .....	24
3.2 主流技术 .....	24
3.2.1 单晶硅电池 .....	25
3.2.2 多晶硅电池 .....	25
3.2.3 薄膜太阳电池 .....	26
3.2.4 接触 .....	27
3.2.5 采购光伏组件 .....	28

## VI 太阳能光伏并网发电系统

3.3 新兴技术	30
3.3.1 染料敏化太阳电池	30
3.3.2 含银电池	30
3.3.3 含本征薄层的异质结 (HIT) 光伏电池	31
3.3.4 III-V 族半导体	31
3.3.5 太阳能聚光技术	32
<b>第4章 光伏电池、组件和阵列</b>	<b>33</b>
4.1 光伏电池的特性	34
4.1.1 光伏电池性能的图形化表示	34
4.2 将光伏电池连接成组件	36
4.2.1 规格表	36
4.2.2 光伏组件串	37
4.2.3 阵列的形成	38
4.3 光伏阵列性能	40
4.3.1 辐照度	40
4.3.2 温度	41
4.3.3 遮挡	42
<b>第5章 逆变器和其他系统元件</b>	<b>44</b>
5.1 逆变器	45
5.1.1 蓄电池逆变器	45
5.1.2 电网交互型逆变器	45
5.2 变压器	46
5.3 主流逆变器技术	48
5.3.1 支路逆变器	49
5.3.2 多支路逆变器	49
5.3.3 集中型逆变器	49
5.3.4 组件逆变器	51
5.4 逆变器保护系统	53
5.4.1 自保护	53
5.4.2 电网保护	53
5.5 电缆	56
5.6 光伏汇流箱	56
5.7 组件接线盒	57
5.8 断路器和熔断器	58

5.9	雷击和浪涌保护	61
5.10	系统监控	62
5.11	计量	62
5.11.1	净电能计量	64
5.11.2	总电能计量	64
<b>第6章</b>	<b>安装系统</b>	<b>67</b>
6.1	屋顶安装系统	67
6.1.1	倾斜屋顶安装方式	68
6.1.2	支架安装方式	70
6.1.3	直接安装方式	72
6.1.4	建筑一体化系统	72
6.2	地面安装系统	74
6.2.1	地面支架安装方式	75
6.2.2	杆式安装方式	76
6.2.3	太阳跟踪系统	76
6.3	风载荷	77
6.4	雷击保护	78
<b>第7章</b>	<b>现场评估</b>	<b>79</b>
7.1	光伏阵列的位置	79
7.1.1	屋顶规格	79
7.1.2	现场是否无遮挡	80
7.1.3	有效面积	86
7.2	能源效率的主动提示	88
7.3	健康、安全和环境 (HSE) 风险	88
7.4	当地环境	88
7.5	系统平衡部件的安装位置	88
7.6	现场规划	89
<b>第8章</b>	<b>并网光伏系统的设计</b>	<b>92</b>
8.1	设计简述	92
8.2	现有系统评估	92
8.3	系统元件选型	92
8.3.1	光伏组件	92
8.3.2	安装结构	93



8.3.3	逆变器	93
8.3.4	电缆	94
8.3.5	监控	95
8.3.6	系统保护	96
<b>第9章</b>	<b>光伏系统的容量配置</b>	<b>100</b>
9.1	电压匹配的规定	100
9.2	电流匹配的规定	108
9.3	组件与逆变器额定功率的匹配	108
9.3.1	电网交互式光伏系统的损耗	110
9.3.2	光伏组件的温度	110
9.3.3	灰尘和污染	111
9.3.4	厂商提供的容限	111
9.3.5	遮挡	112
9.3.6	组件朝向和倾角	112
9.3.7	电压降	112
9.3.8	逆变器效率	113
9.4	计算系统输出	113
<b>第10章</b>	<b>并网光伏系统的安装</b>	<b>117</b>
10.1	光伏阵列安装	117
10.2	直流布线	117
10.2.1	电缆路径和所需长度	117
10.2.2	电缆规格	119
10.2.3	光伏汇流箱	122
10.3	系统接地	122
10.4	逆变器的安装	122
10.5	安装检查清单	123
10.6	公共电网接入系统	123
10.7	安装工程的信息要求	126
10.8	安全性	127
<b>第11章</b>	<b>系统试运行</b>	<b>129</b>
11.1	系统安装的最终检查	129
11.2	测试	132
11.3	试运行	135

11.4	系统文档	136
<b>第 12 章</b>	<b>系统的运行与维护</b>	<b>138</b>
12.1	系统维护	138
12.1.1	光伏阵列的维护	138
12.1.2	逆变器的维护	140
12.1.3	系统的完整性	141
12.2	故障排除	141
12.2.1	识别问题	141
12.2.2	光伏阵列故障排除	142
12.2.3	系统性能过低的故障排除	142
12.2.4	逆变器的故障排除	143
12.3	其他常见问题	143
<b>第 13 章</b>	<b>并网光伏系统的市场化与经济性</b>	<b>145</b>
13.1	光伏系统成本	146
13.1.1	确定光伏系统的价值	147
13.1.2	静态投资回收期和财政补贴	147
13.1.3	贷款	150
13.1.4	可再生能源配额制和可再生能源证书	150
13.2	市场化	152
13.3	保险	153
<b>第 14 章</b>	<b>案例研究</b>	<b>155</b>
14.1	案例 A	155
14.1.1	系统	155
14.1.2	经济性	158
14.2	案例 B	158
14.2.1	系统	158
14.2.2	经济性	159
14.3	案例 C	160
14.3.1	系统	160
14.3.2	经济性	162
14.4	案例 D	163
14.4.1	系统	164
14.4.2	经济性	165

## X 太阳能光伏并网发电系统

14.5 案例 E .....	165
14.5.1 系统 .....	165
14.5.2 经济性 .....	167
14.6 案例 F .....	168
14.6.1 系统 .....	168
14.6.2 经济性 .....	169
14.7 案例 G .....	171
14.7.1 系统 .....	171
14.7.2 经济性 .....	174
<b>第 15 章 并网光伏系统和太阳能资源 .....</b>	<b>176</b>
15.1 光伏和可再生能源新闻 .....	176
15.2 光伏技术的深入阅读资料 .....	176
15.3 主要英语国家的光伏资源 .....	177
15.4 光伏组件和系统元件的标准及认证机构 .....	179
15.5 安装规范和导则 .....	179
15.6 风载荷规范和导则 .....	180
15.7 太阳能资源数据和仿真软件 .....	181
<b>第 16 章 名词术语 .....</b>	<b>182</b>

# 第 1 章 太阳能发电介绍

现代生活的方方面面几乎都要依靠电力。随着技术的进步，从烹饪和洗碗机到运动器械、娱乐设施，几乎我们使用的所有东西都包含电子电路。然而，社会对电力的依赖性也逐渐带来问题：常规化石燃料储备正在消逝，气候变化危害越来越实际，史无前例地出现对替代能源的迫切需求。太阳能发电从太阳获得能量用来发电，这是一种很有吸引力的发电方式，可以转移我们对化石燃料发电的依赖性。

本书探讨如何把太阳能转换成电力，并用于向家庭、城市供电。本书首先介绍太阳能资源，包括地球表面的太阳能、太阳能资源的量化描述和太阳能发电系统的能量捕获。本书还探讨了把阳光转换成电力的不同技术，以及如何进行建筑并网光伏系统的设计、安装和发电。

## 1.1 为什么使用太阳能发电

自从工业革命以来，发达国家使用化石燃料的数量始终在增长。然而，在过去的 20 年里，两个重要问题已经出现。第一个问题是关于化石燃料资源不足和能源安全。人们已经接受当前世界石油储备是一种限制性资源，并且随着印度等国家需要更多电力来提高工业化程度和促进中产阶级萌芽，石油需求还将增长。这种增长将产生对有限资源的巨大需求。另外，这些资源价格变化频繁。太阳能发电等可再生能源技术的驱动力正是增长的能源需求以及持续上升的石油价格脱钩的需要。

太阳能发电的魅力是它几乎不需要运行费用：在完成初期投资以后，能源几乎是免费的，而化石燃料必须长期采购，并且各种迹象表明价格将持续走高。

第二个问题是人为导致的气候变化（也有人称作全球变暖），燃烧化石燃料将把二氧化碳、甲烷等温室气体释放到大气中，这引起地球

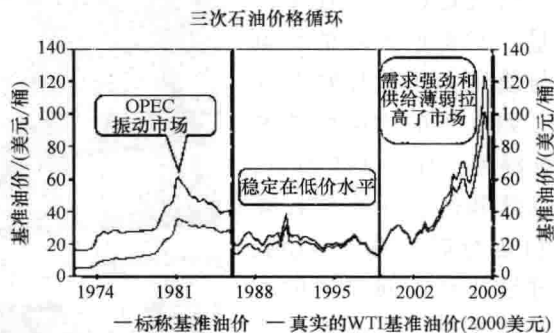


图 1-1 在过去 30 年里原油价格持续上涨，并且预期将持续增长  
(来源：Chris Laughton，数据来自 IEA)

## 2 太阳能光伏并网发电系统

气候的变化和天气模式的改变，这一理论已被人们广泛接受。科学家预测受气候变化影响，将会出现洪水、干旱等更加极端的天气，全球平均温度也将升高。这自然会影响到地球上生存的植物和动物。发达国家和发展中国家的各级政府已经认识到亟须采取国际行动来消除人为导致气候变化的影响。这些行动包括减少化石燃料的使用，从而减少温室气体的排放。为了使这些行动成功，使用更清洁、排放更低的技术来代替化石燃料是一种重要贡献。因此，风力发电、太阳能发电等可再生能源技术将在减少全球温室气体排放的过程中扮演重要角色，并且有可能成为未来世界能源供应结构的重要部分。

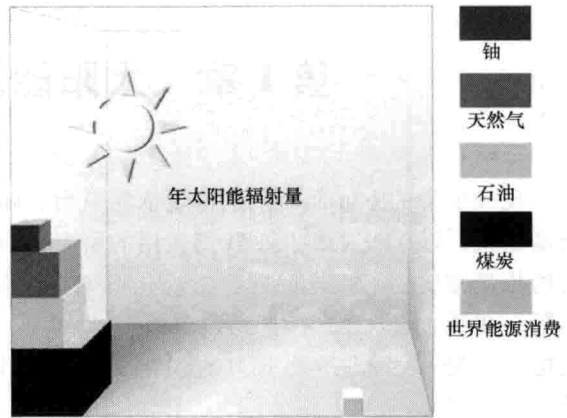


图 1-2 每年地球接收到大量的太阳辐射，足以满足当前能源消耗量的 1000 倍（来源：www.solarpraxis.com）

## 1.2 什么是太阳能发电系统

太阳能发电系统用来获取太阳能，也称为光伏（Photovoltaic，简称为 PV）系统。“Photovoltaic”一词来源于拉丁语 photo（光）和 voltaic（能量）。光伏器件捕获阳光中的能量，并转换成电力，也就是说它们使用阳光能量。不要把太阳能发电系统与使用太阳能加热其他物质（如水）的太阳能热利用系统混淆。如图 1-3 所示，发电系统和热利用系统在外表和运行时有很大差别。下面讨论几种不同类型的太阳能发电系统，本书重点介绍向电网馈送电力的太阳能发电系统（即并网太阳能发电系统）。



图 1-3 一名电气工程师正在安装太阳能系统，左侧是太阳能热水系统，右侧是太阳能发电系统（来源：Global Sustainable Energy Solutions）

### 1.2.1 离网系统

离网（或独立）太阳能发电系统被设计来替代或者补充常规供电电源，通常用在农村或边远地区，这些地区由于电网延伸成本太高而缺少供电电源。离网系统使用太阳能电力向蓄电池充电，在需要时再使用存储的电力。然后，使用蓄电池向灯具、水泵、冰箱等家用电器供电，蓄电池可以直接向低压电器（如 12V 直流电灯）供电，或者通过连接在蓄电池上的逆变器把蓄电池电压转换成等效交流电，用于常规交流电器（如计算机、电视机、收音机等）。

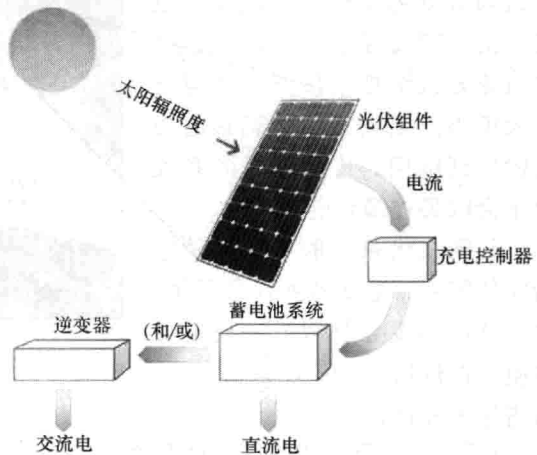


图 1-4 某离网系统的布局（来源：Global Sustainable Energy Solutions）

离网系统规模可以小到单块光伏组件、蓄电池和控制器组成的系统，大到与复杂控制设备和大型备用发电机组配合使用的价格不菲的大型系统。第 15 章将深入介绍离网系统。



图 1-5 对于生活在类似西撒哈拉（该系统所在地）的发展中国家农村地区的人们来说，小型离网太阳能发电系统通常是最便捷、最具成本效益的供电方式（来源：Global Sustainable Energy Solutions）



图 1-6 独立太阳能发电系统中的蓄电池组（来源：Global Sustainable Energy Solutions）

### 1.2.2 并网系统

并网或电网交互太阳能发电系统是本书的重点。与离网系统不同，并网系统并非用来替代电网。并网系统通常出现在电网已经覆盖的城镇地区，光伏系统发出的电力馈入电网，而不是存储在蓄电池里。在这种系统中，电网作为一种储能介质，当建筑物需要电力时，电网可以注入电力。这种系统的一个重要好处是不用像离网

#### 4 太阳能光伏并网发电系统

系统那样，要为了完全满足建筑物的电力需求而提供全部电力。建筑物可以由光伏系统供电，也可以由电网或两者组合起来供电，这意味着系统规模按照业主需要可大可小。光伏系统的剩余电力将输出到电网，许多地区的系统业主会购买这部分电力。

并网光伏系统的主要元件包括光伏阵列、逆变器和计量系统。除了这些主要元件以外，还需要电缆、汇流箱、保护设备、开关、雷击保护和标识。

##### 1.2.2.1 集中式并网光伏系统

现有电力系统由使用煤炭、天然气、水或柴油等不同能源资源的集中式发电站组成，通过输电线路和配电系统向终端用户供电。发电站直接接入输电线路，而发电站发出电力的消费却在终端用户所在的工厂、商店和家庭等实际地点。

集中式并网光伏系统的运行方式与此相同。大型光伏电站直接接入输电线路。并网集中式光伏系统可以小到50kW<sub>p</sub>，但是近年来欧洲已经建成了60MW<sub>p</sub>的大型系统。也有公司计划建设1GW<sub>p</sub>以上的并网光伏发电厂，不久还将有许多光伏发电厂建成。

##### 1.2.2.2 分布式并网光伏系统

正如名称所指，这类并网光伏系统分布在电网当中。这是最常见的光伏系统类型，因此也是本书的重点。这有两种典型系统：商业化系统和居民住宅系统。

商业化系统一般大于10kW<sub>p</sub>，建设在工厂、商业设施、办公楼、购物中心等建筑物上。在典型情况下，这类系统所发电量被建筑物内部负荷消耗，因此不向电网输出剩余电力。

居民住宅系统指那些家庭安装的系统，一般小于商业化系统，典型规模在1~

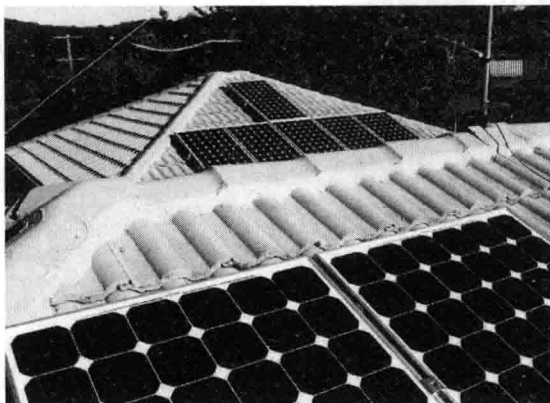


图 1-7 并网光伏系统在城镇地区更加普遍  
(来源: Green Solar Group)

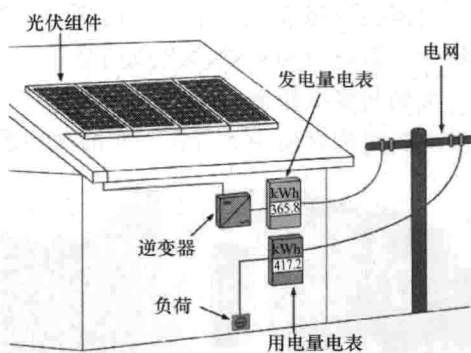


图 1-8 典型的小型并网光伏系统（总电量计量的案例）。并网光伏系统使用照射光伏阵列的阳光产生直流功率，再通过逆变器转换成交流功率，交流功率通过电表馈送给电网  
(来源: Global Sustainable Energy Solutions)

5kWp 之间。这类系统所发电力首先被日间房屋内的负荷消耗，剩余电力馈入电网，向附近建筑物供电。



图 1-9 西班牙阿里坎特 5.6MWp 集中式光伏系统（来源：SMA Solar Technology AG）



图 1-10 位于加利福尼亚州圣迭戈的一个 40kWp 商业化并网光伏系统。由于屋顶用作停车场，光伏组件垂直安装（来源：Global Sustainable Energy Solutions）



图 1-11 一个居民住宅光伏系统（来源：Green Solar Group）

## 1.3 其他太阳能技术

太阳能发电系统只是当前用于获取太阳能的诸多技术中的一种。下面介绍其他主要技术。尽管它们均使用太阳能，但每种技术在运行、设计和安装上存在很大差别。

### 1.3.1 太阳能热发电

太阳能热发电通过多种不同途径使用太阳热量，而不是使用阳光。由于太阳能热发电在某些应用情况下对常规发电具有成本竞争力，无论其小型应用还是大型应用都变得非常突出。



### 1.3.2 太阳能热水

太阳能热水是太阳能的最常用形式之一。太阳能通过“太阳能集热器”来加热水。太阳能集热器放置在屋顶上，可能还包括存储热水的屋顶水箱，不要把它和用来发电的光伏组件相互混淆。

太阳能热水集热器有两种主要类型。最常见的是平板式，一块深色的大平板收集热量，而水从下面的管道流过。热量从深色平板传递给水，足够热的情况下在水箱中加热成蒸汽。

最近，真空管（另一种集热器）逐渐普及，这种集热器使用圆柱管道，水从中流过。管道有一个内管和一个外管，两者之间抽成真空，从而保证绝热，减少水到周围的热量损失。第 15 章将深入介绍太阳能热水系统。

### 1.3.3 聚光太阳能发电

聚光太阳能发电（Concentrated Solar Power, CSP）是一种大规模太阳能热发电形式。然而，CSP 是一种高效率的发电厂，发出电力并送入电网，而不是用来生产热水。CSP 使用大型镜面把太阳光线聚焦到一个中心点（通常是一根管子），聚集热量用来加热水，产生的蒸汽用来驱动蒸汽机发电。CSP 在大规模应用时具有很好的经济性，通常作为发电厂，向电网馈送电力。这种技术已经在美国加利福尼亚州莫哈韦沙漠使用多年，如今出现在西班牙等许多地区。

国际上对 CSP 技术的兴趣非常强烈，并且出现了用熔融盐替代水作为储热介质的新潮流。太阳能发电的一个主要问题是电力存储非常昂贵，然而熔融盐能够存储 CSP 系统的能量长达数小时，因此即使在太阳不再提供能量的夜间也能够发出电力。这种储能形式要比通常用于存储光伏能量的蓄电池明显便宜。

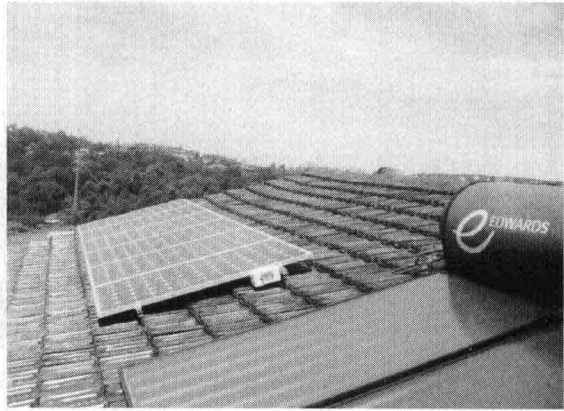


图 1-12 该系统包括太阳能发电系统（后面）和带储水箱的平板太阳能热水系统（前面）  
（来源：Green Solar Group）



图 1-13 一个带真空管集热器的太阳能热水系统（来源：Global Sustainable Energy Solutions）