



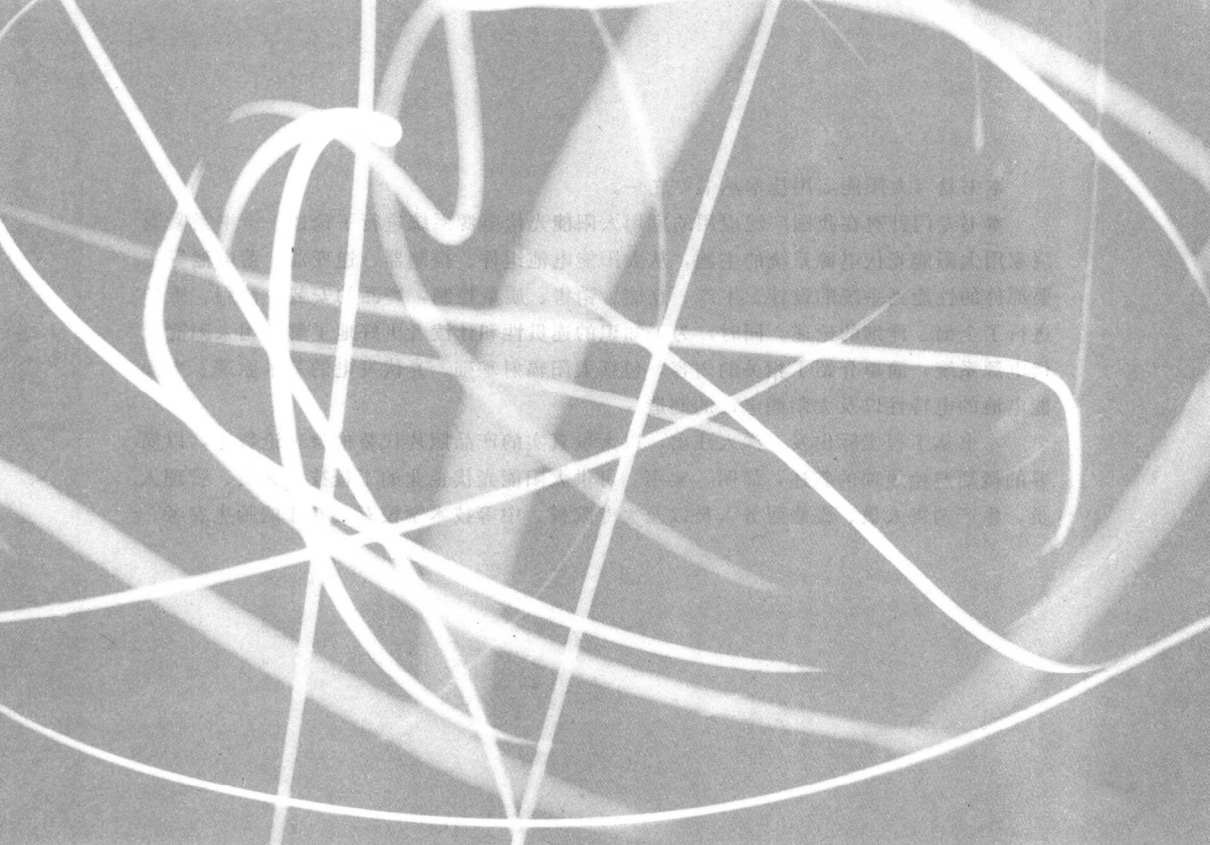
太阳能实用技术丛书

家用太阳能 光伏电源系统

刘宏 吴达成 杨志刚 翟永辉 编著



化学工业出版社
环境·能源出版中心



太阳能实用技术丛书

家用太阳能 光伏电源系统

刘宏 吴达成 杨志刚 翟永辉 编著



化学工业出版社

环境·能源出版中心

·北京·

本书是《太阳能实用技术丛书》之一。

本书专门针对在我国广泛应用的家用太阳能光伏电源系统进行了论述。全书紧紧围绕家用太阳能光伏电源系统的主题,从太阳能电池组件、控制器、逆变器、蓄电池等主要部件的性能到系统的设计、生产、仓储、销售、质量控制,产品的安装、使用、维护进行了全面、详细的论述。同时,为了知识的连贯性和让读者更好地了解家用太阳能光伏电源系统,简单介绍了相关的内容,包括太阳辐射基础、光伏发电的基本原理、太阳能电池的电特性以及太阳能电池的制造。

本书从工程实际出发,深入浅出,以大量真实的产品照片代替抽象理论叙述,以简要的概括避免烦琐的叙述,简明、实用。可供太阳能光伏企业的工程技术人员、管理人员、生产销售人员、维修服务人员以及大专院校、中等技术学校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

家用太阳能光伏电源系统/刘宏等编著. —北京:化学工业出版社, 2007. 2
(太阳能实用技术丛书)
ISBN 978-7-5025-9365-0

I. 家… II. 刘… III. 太阳能电池 IV. TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 022892 号

责任编辑:戴燕红 郑宇印
责任校对:凌亚男

装帧设计:胡艳玮

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:北京市彩桥印刷有限责任公司
720mm×1000mm 1/16 印张12 3/4 字数236千字 2007年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

《太阳能实用技术丛书》编委会

主 编：罗运俊

副 主 编：王长贵

编委会成员（按汉语拼音排序）：

陈晓夫 崔容强 戴燕红

季秉厚 刘 宏 罗运俊

任宏琛 陶 桢 田晓红

王长贵 吴达成 薛德千

张璧光

序

能源是人类社会求生存和发展的物质基础。建立在煤炭、石油、天然气等化石燃料基础上的常规能源体系，曾极大地推动、并继续支撑着人类社会的发展。但化石燃料的大规模开采和使用，已使资源日益枯竭、环境不断恶化，还诱发了不少国家之间、地区之间的政治经济纠纷，甚至引起冲突和局部战争。我国的矿物能源资源以煤的储量比较丰富，然而人均能源资源只有世界人均能源资源的二分之一左右。从能源消费结构来看，我国是世界上最大的煤炭消费国，煤炭消费约占总能耗的 67%，这是导致环境严重污染、生态逐年恶化的根本原因之一。因此，大力开拓新能源与可再生能源的实际应用成为我国解决能源紧张和保护生态环境的重要战略任务。

太阳能是新能源与可再生能源的重要组成部分。太阳能属于分布性洁净的自然资源，能就地开发利用，具有取之不尽、用之不竭、不会污染环境和破坏生态平衡等特点。太阳能的开发利用有着巨大的市场前景，不仅带来很好的社会效益、环境效益，而且还有明显的经济价值。

我国地域广阔，是太阳能资源丰富的国家之一，三分之二的地区年辐射总量大于 $5020\text{MJ}/\text{m}^2$ ，年日照时数在 2200h 以上。尤其在大西北，更具有有效开发利用的潜力。为此，化学工业出版社专门组织了一批长期从事太阳能开发利用研究的专家和学者撰写了这套《太阳能实用技术丛书》。全套丛书共 7 册，涉及太阳能实用技术的各个领域。撰写各分册的作者都是相关专业行家，实践经验丰富，学术水平较高。丛书的内容系统全面、实用性和可读性强，对有志开发利用太阳能行业的人员富有参考价值。期望这套丛书的出版会对我国太阳能行业的发展和产品的创新开发提供有益的借鉴，为节约常规能源、减少环境污染、满足人民生活需要作出应有的贡献。



中国科学院院士
清华大学热能工程与热物理研究所所长
原中国太阳能学会理事长

前 言

家用太阳能光伏电源系统（国际上称做 solar home system）是太阳能电池在地面应用最早的领域之一。20 世纪 80 年代初，我国就积极地研究、推广这项技术。截止到 2006 年，已有近 100 万台家用光伏发电系统在居民家庭，特别是牧区牧民的家庭中得到了应用，是光伏技术应用中市场化、商业化发展最为成熟的一类技术产品，在中国农村电力建设中发挥出重要作用，成为解决边远无电地区人民通电问题的一项主要的技术手段。

家用太阳能光伏电源是光伏发电的一种形式，从设计、组装、安装、调试、使用、维护、修理等方面与其他各种用途的光伏系统有共性的方面，但是，作为一种商业化、工业化、标准化的小型独立电源产品，也具有有一些不同于较大型的，如“太阳能光伏独立电站”的特点。本书专门针对 500Wp 以下、以家庭用户为主要服务对象的家用太阳能光伏电源系统进行论述，从工作原理、产品设计、系统部件及其配置，以及产品组装、仓储、销售、使用维护、修理和产品的检测、认证等方面作了较全面的介绍，可供太阳能光伏企业的科研设计人员、管理人员、生产销售人员、维修服务人员以及大专院校、中等技术学校有关专业的师生参考。

刘宏、吴达成为本书主要编著者。吴达成编写了第 1 章、第 2 章 2.2 节、第 4 章 4.2、4.3、4.4 节；刘宏编写了第 2 章 2.1 节、第 3 章、第 4 章 4.1 节、第 5 章，并负责全书的统稿；杨志刚编写了第 4 章 4.5、4.6、4.7 节、第 6 章、第 8 章、第 9 章；翟永辉参与了第 4 章的编写并撰写了第 7 章、附录 1、附录 2；其他附录由吴达成、刘宏、杨志刚共同完成；青海光明工程公司的曹明哲、李治明参与了第 2 章～第 5 章的部分编写工作，史晋参与了这几章的图、表绘制工作，这三位同志夜以继日地为全书的统稿和排版做了大量的工作。

书稿的完成，得益于国家发改委/全球环境基金/世界银行中国可再生能源发展项目办公室的大力支持，本书的编写也得到了北京新能源和可再生能源协会王长贵老师的帮助，特别表示衷心的感谢。

书中参考了国内外光伏发电及相关技术领域的许多文献，在此谨向相关作者深表谢意。

在写作过程中，青海省太阳能电力有限公司、青海天普太阳能科技有限公司、西宁新能源开发有限公司提供了大量图片资料。感谢各企业给予的帮助。

虽经历近一年的写作，但由于编者工作繁忙，时间和水平有限，书稿中疏漏和错误之处在所难免，敬请读者不吝赐教、指正。

编者

2006 年 12 月

目 录

第 1 章 太阳辐射基础及我国太阳能资源简况	1
1.1 太阳的辐射能	1
1.2 太阳辐射的计量	1
1.3 中国太阳能资源状况	2
1.4 获取和处理太阳能资源数据	3
第 2 章 家用太阳能光伏电源系统的应用状况	5
2.1 光伏发电及其应用简介	5
2.2 家用太阳能光伏电源系统的含义和特点	11
2.3 家用太阳能光伏电源系统推广应用的历史和现状	12
第 3 章 太阳能电池基础	15
3.1 半导体基础知识	15
3.2 太阳能电池发电原理	22
3.3 太阳能电池的物理模型	24
3.4 太阳能电池的电性能参数	25
3.5 太阳能电池的主要影响因素	27
3.6 太阳能电池的种类	30
3.7 太阳能电池的制造工艺简介	30
第 4 章 家用太阳能光伏电源系统主要部件	35
4.1 太阳能电池组件	35
4.2 蓄电池	51
4.3 控制器	60
4.4 逆变器	66
4.5 家用太阳能光伏电源系统用直流照明灯具	70
4.6 家用太阳能光伏电源系统专用 LED 直流灯具	76
4.7 家用太阳能光伏电源系统用交流荧光灯	90
第 5 章 家用太阳能光伏电源系统的设计	107
5.1 设计基本思路	107
5.2 容量设计	112
5.3 系统配置及部件的设计、选用	119
第 6 章 家用太阳能光伏电源系统的生产	131
6.1 生产准备	131

6.2	家用太阳能光伏电源系统生产	136
6.3	家用太阳能光伏电源系统生产工艺简介	138
6.4	家用太阳能光伏电源系统生产工艺实例简介	148
第7章	家用太阳能光伏电源系统的质量控制	157
7.1	家用太阳能光伏电源系统技术标准	157
7.2	家用太阳能光伏电源系统的质量控制和产品质量认证	166
第8章	家用太阳能光伏电源系统产品及其销售	172
8.1	西部六省区概况	172
8.2	家用太阳能光伏电源系统在西部各省区的销售状况	173
第9章	系统的安装、使用及维护	179
9.1	系统安装	179
9.2	使用方法	182
9.3	系统维护要点	184
9.4	常见故障及处理	187
附录		189
附录1	家用太阳能光伏电源系统相关标准的目录	189
附录2	国内、外产品认证的介绍	190
附录3	家用太阳能光伏电源系统产品系列一览表	191
参考文献		193

第1章 太阳辐射基础及我国太阳能资源简况

太阳能光伏发电的能源来自于太阳的辐射。对于太阳辐射、日地关系、资源分布等方面的知识已有许多专著进行论述, 为了保持本书的完整性, 本章仅对设计计算必须涉及的太阳辐射基础知识和我国的太阳能资源分布情况进行简单归纳和描述。

1.1 太阳的辐射能

太阳发出的能量大约只有二十二亿分之一能够到达地球的范围, 约为 173×10^4 亿千瓦。经过大气的吸收和反射, 到达地球表面的约占 51%, 大约为 88×10^4 亿千瓦。而能够到达陆地表面的只有到达地球范围辐射能量的 10% 左右, 约为 17×10^4 亿千瓦。尽管如此, 把这些能量利用起来, 也能够相当目前全球消耗能量的 3.5 万倍。

由于地球自转和公转以及大气层的影响, 对于地球陆地的某一点来说, 太阳辐射不仅取决于该地点的纬度, 还要受到当地地理条件和气象条件的影响。所以, 辐射资源在各地的分布呈现出不规则性。

1.2 太阳辐射的计量

在单位时间内, 太阳以辐射形式发射的能量称为太阳辐射功率或辐射通量, 单位为瓦 (W); 太阳投射到单位面积上的辐射功率 (辐射通量) 称为辐射度或辐照度, 单位为瓦/平方米 (W/m^2)。该物理量通常表征的是太阳辐射的瞬时强度; 而在一段时间内, 太阳投射到单位面积上的辐射能量称为辐射量或辐照量, 单位为千瓦时/[平方米·年(或月、日)]。该物理量表征的是辐射总量, 通常测量累积值。



1.3 中国太阳能资源状况

我国地处北半球，土地辽阔，国土总面积达 $960 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。南从北纬 4° ，北到北纬 52.5° ，西自东经 73° ，东至东经 135° ，距离都在 5000 km 以上。在我国广阔的陆地上，有着丰富的太阳能资源。全国各地的年太阳辐射总量为 $930 \sim 2333 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ，中值为 $1626 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。如图 1-1 所示。

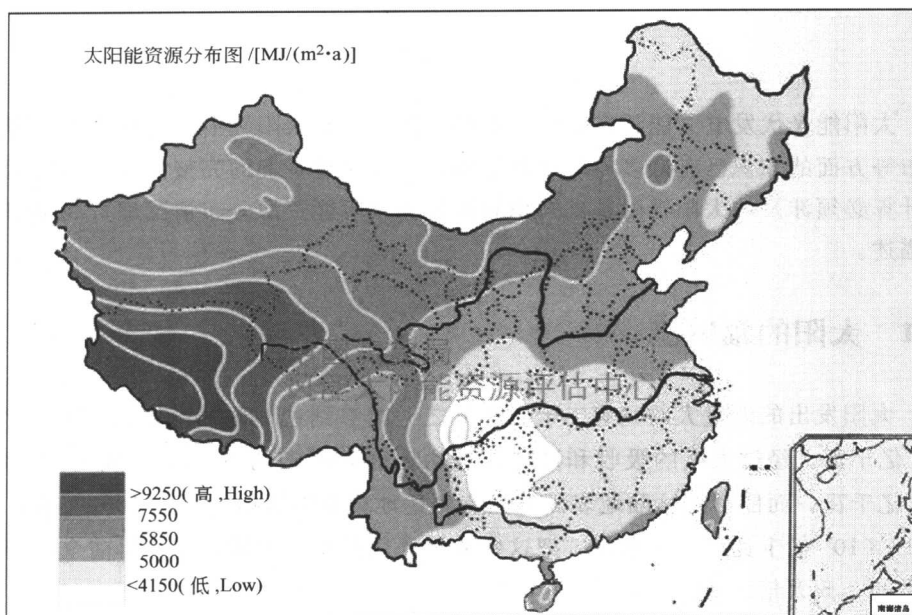


图 1-1 我国太阳能资源分布图

$[1 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) = 0.2778 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$,下同]

根据各地接受太阳总辐射量的多少，可将全国划分为五类地区。

一类地区为我国太阳能资源最丰富的地区，年太阳辐射总量为 $1889 \sim 2334 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ，相当于日辐射量 $5.1 \sim 6.4 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。这些地区包括宁夏北部、甘肃北部、新疆东部、青海西部和西藏西部等地。尤以西藏西部最为丰富，最高达 $2333 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ （日辐射量 $6.4 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ），居世界第二位，仅次于撒哈拉大沙漠。

二类地区为我国太阳能资源较丰富地区，年太阳辐射总量为 $1625 \sim 1889 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ，相当于日辐射量 $4.5 \sim 5.1 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。这些地区包括河北西北部、山西北部、内蒙古南部、宁夏南部、甘肃中部、青海东部、西藏东南部和新疆南

部等地。

三类地区为我国太阳能资源中等类型地区，年太阳辐射总量为 $1389 \sim 1625 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ，相当于日辐射量 $3.8 \sim 4.5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。主要包括山东、河南、河北东南部、山西南部、新疆北部、吉林、辽宁、云南、陕西北部、甘肃东南部、广东南部、福建南部、苏北、皖北、中国台湾西南部等地。

四类地区是我国太阳能资源较差地区，年太阳辐射总量为 $1167 \sim 1389 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ，相当于日辐射量 $3.2 \sim 3.8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。这些地区包括湖南、湖北、广西、江西、浙江、福建北部、广东北部、陕南、苏北、皖南以及黑龙江、中国台湾东北部等地。

五类地区主要包括四川、贵州两省，是我国太阳能资源最少的地区，年太阳辐射总量为 $930 \sim 1167 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ，相当于日辐射量只有 $2.5 \sim 3.2 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。

从全国来看，我国是太阳能资源相当丰富的国家，绝大多数地区年平均日辐射量在 $4 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 以上，西藏最高达 $7 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。与同纬度的其他国家相比，和美国类似，比欧洲、日本优越得多。上述一、二、三类地区约占全国总面积的 $2/3$ 以上，年太阳辐射总量高于 $1389 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ，年日照时数大于 2000 h ，具有利用太阳能的良好条件。特别是一、二类地区，正是我国人口稀少、居住分散、交通不便的偏僻、边远的广大西北地区，经济发展较为落后。可充分利用当地丰富的太阳能资源，采用太阳光发电技术解决人民生活、生产用电问题。

1.4 获取和处理太阳能资源数据

在进行光伏系统设计和评估时，总是希望得到应用地区的太阳能资源和气象条件的各种数据。太阳能辐射数据可以从气象台站得到，也可以从省气象部门或国家气象局取得，从气象部门得到的数据是水平面的数据，包括水平面直接辐射和散射辐射，从而得到水平面上总辐射量数据。但是，在太阳能光伏发电的实际应用中，为了得到更多的发电量和电池组件自清洁的需要，固定安装的方阵通常是倾斜的，这就需要计算出倾斜面上的太阳总辐射量（通常要高于水平面上的辐射量）。但是，这一计算过程非常复杂，所以人们常常直接采用水平面上的数据，或者采用经验系数的方法进行简单换算，这对计算的精度产生了影响。

近年来，已经开发了一些软件，不但可以方便地解决这些计算问题，其数据库中还往往储存大量不同地区的太阳辐射资料，有些还具有光伏系统分析设计功能。例如，上海电力学院电气久能太阳能研究所的计算软件，可以方便地算出不同方位、各种倾斜面上的月平均太阳总辐射量。软件中已储存了全国 595 个地区的太阳辐射资料，可直接调用、计算当地各种倾斜面上的太阳辐射量，可直接计



算当地全年或某月份的最大太阳辐射所对应的倾角大小。同类的软件还有中科院电工所的《光伏/风力发电系统优化配置与补贴测算工具》和加拿大太阳能公司的 RETSCREEN 软件。

在优化设计光伏系统时，通常要得到总辐射量的各月的日平均数据。当全年负载基本恒定时，则将辐射量最低的月份作为“设计月”来采用。

还有一个光伏设计和估算中最常用到的重要概念是“峰值太阳小时 (Peak-sun-hours)”。这是一个等效的概念，也就是将太阳辐射度等于 $1\text{kW}/\text{m}^2$ （为太阳能电池测试的标准光强）的每天日照小时数称为“峰值太阳小时”。它在数值上等于平均日辐射量除以标准光强，其单位为 h/d（小时/天）。



第2章 家用太阳能光伏电源系统的应用状况

2.1 光伏发电及其应用简介

2.1.1 光伏发电及光伏系统

1839年，法国物理学家 A. E. 贝可勒尔 (A. E. Becquerel) 在实验时意外地发现：用两片金属浸入溶液构成的伏打电池，当受到光照时会产生额外的伏打电动势，他把这种现象称为“光生伏打效应” (Photovoltaic effect)，简称“光伏效应”。1883年，美国发明家查勒斯·福瑞茨 (Charles Fritts) 在半导体硒和金属接触处发现了固体伏打效应。此后，人们把能够产生光生伏打效应的器件称为“光伏器件”。半导体 p-n 结器件在太阳光照射下，光电转换效率最高，通常把这类光伏器件称为“太阳能电池” (Solar cell)。1954年，恰宾 (Charbin) 等在美国贝尔实验室第一次做出了光电转换效率为 6% 的实用的单晶硅太阳能电池，开创了太阳能电池研究的新纪元。我国于 1958 年开始太阳能电池的研究工作。

光伏发电系统基于光伏效应，其基本构成见图 2-1。光伏发电系统的核心部件是太阳能电池组件，它将太阳的光能直接转化为电能。太阳能电池产生的电流为直流电，可以直接以直流电的形式应用，也可以用逆变器将其转换成为交流电，加以应用。从另一个角度来看，对于光伏系统产生的电能可以即发即用，

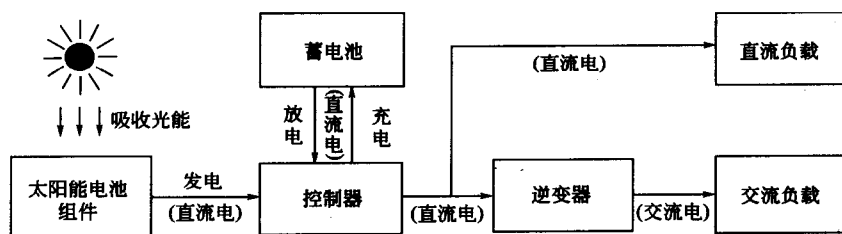


图 2-1 光伏发电系统基本构成图



也可以用蓄电池等储能装置将电能存放起来,按照需要随时释放出来使用。

2.1.2 光伏发电的主要优点

(1) 太阳能资源取之不尽,用之不竭 照射到地球上的太阳能要比人类目前消耗的能量大 6000 倍。另外,根据太阳产生的核能计算,太阳还要照耀地球 600 多亿年。

(2) 绿色环保 光伏发电本身不需要燃料,没有 CO_2 的排放,不污染空气,不产生噪声。

(3) 应用范围广 只要有光照的地方就可以使用光伏发电系统,它不受地域、海拔等因素限制。

(4) 无机械转动部件,操作、维护简单,运行稳定可靠 一套光伏发电系统只要有太阳,电池组件就会发电,加之现在均采用自动控制技术,基本不用人工操作。

(5) 使用寿命长 晶体硅太阳能电池寿命可长达 20~35 年。在光伏发电系统中,只要设计合理、选型适当,蓄电池的寿命也可长达 10 年。

(6) 太阳能电池组件结构简单,体积小且轻,便于运输和安装,光伏发电系统建设周期短。

(7) 系统组合容易 若干太阳能电池组件和蓄电池单体组合成为系统的太阳能电池方阵和蓄电池组;逆变器、控制器也可以集成。所以光伏发电系统可大可小,极易组合、扩容。

2.1.3 光伏发电的主要缺点

(1) 能量密度低 尽管太阳投向地球的能量总和极其巨大,但由于地球表面积也很大,致使单位面积上能够直接获得的太阳能量却较小。通常以太阳辐照度来表示,地球表面最高值约为 $1.2\text{kW}/\text{m}^2$ 左右,绝大多数地区和大多数的日照时间内都低于 $1\text{kW}/\text{m}^2$ 。太阳能的利用实际上是低密度能量的收集、利用。

(2) 占地面积大 由于太阳能能量密度低,这就使得光伏发电系统的占地面积会很大,1MW 光伏电站占地约需 1 万平方米。有人计算过,需把美国道路面积全部覆盖上太阳能电池,才能满足美国的电力需要。

(3) 间歇性 在地球表面,光伏发电系统只能在白天发电,晚上不能发电,除非在太空中没有昼夜之分的情况下,太阳能电池可以连续发电,但这和人们的用电习惯不符。

(4) 随机性 光伏发电系统受气候影响强,雨雪天、阴天甚至云层的变化都会严重影响系统的发电状态。

(5) 地域依赖性强 地理位置不同,气候不同,使各地区日照资源各异。光



光伏发电系统只有在太阳能资源丰富的地区应用效果才好。

(6) 成本高 截止到目前,光伏发电的成本仍然是其他常规发电方式的几倍。这是制约其广泛应用的最主要因素。但是我们也应看到,光伏发电系统降价速度非常快,太阳能电池组件的价格几十年来已经从最初的每瓦 70 多美元下降至近几年的每瓦 3 美元左右,下降了 20 多倍,如图

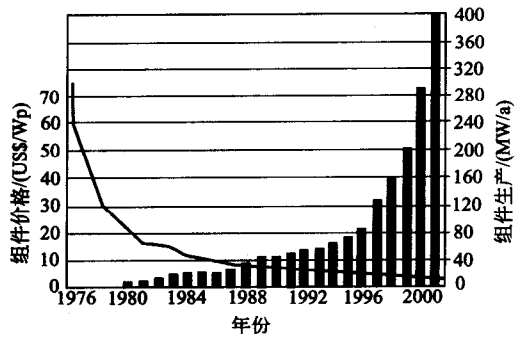


图 2-2 太阳能电池组件成本持续降低

2-2所示。据统计,太阳能光伏发电的成本 1950 年为 1.5 美元/(kW·h), 1987 年为 35 美分/(kW·h), 1992~1993 年为 24 美分/(kW·h), 2003 年为 14 美分/(kW·h), 与调峰电价相当。到 2010 年可降为 6~10 美分/(kW·h), 可以与市电竞争。

2.1.4 光伏发电的应用形式

1958 年,光伏发电技术首先应用在太空,装备于美国的先锋 1 号人造地球卫星,太阳能电池面积为 100cm²,功率为 0.1W。随后便很快开始在陆地应用,被推广到军事、民用、工业等各个领域。迄今为止,光伏发电的利用方式多种多样。我们把光伏发电在陆地的应用形式进行总结,如图 2-3 所示。

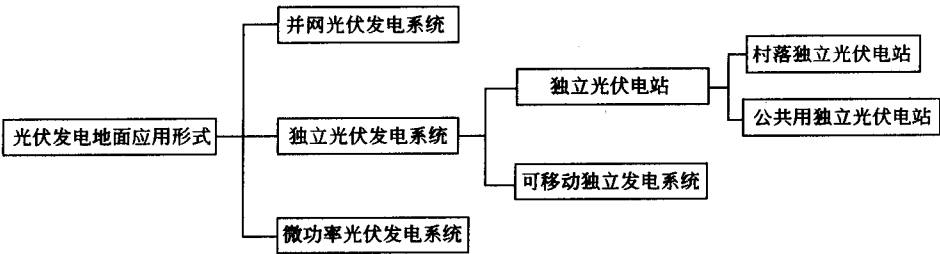


图 2-3 光伏发电主要应用形式

2.1.4.1 并网光伏发电系统

并网光伏发电系统是指光伏发电系统与常规电网相连接,这种发电系统所发出电能直接输送到当地电力网络上,不需要储能装置。图 2-4 所示是一种常见的采用集中式并网光伏电站的停车场。目前在发达国家更广泛采用的是光伏发电与建筑结合的形式,称为光伏建筑一体化,图 2-5 是一些典型实例。这种形式将太阳能电池组件作为建筑物的有机组成部分,同时还能产生电力。



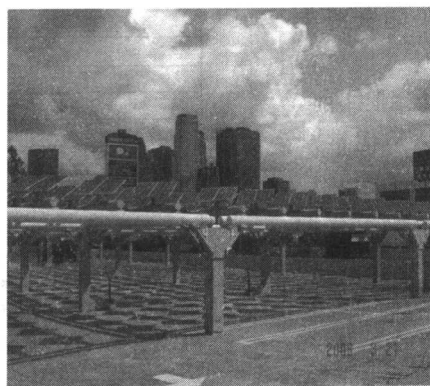
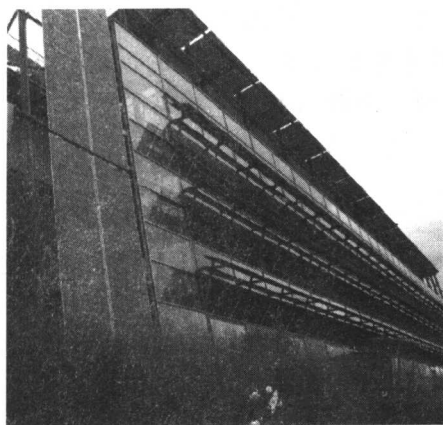
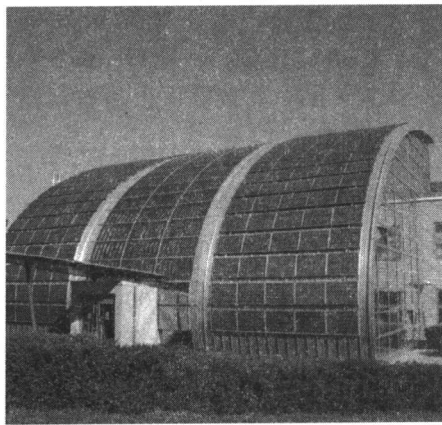


图 2-4 太阳能并网发电的停车场



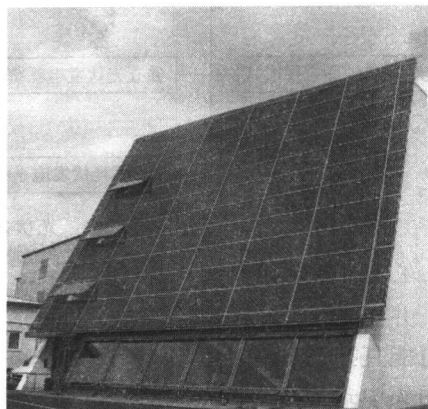
(a)



(b)



(c)



(d)

图 2-5 建筑一体化的并网发电系统

2.1.4.2 独立光伏发电系统

独立光伏发电系统不与常规电网相连接。通常这种发电系统必须配有储能装置, 在一定的地理供电范围内, 对用户供电实现完全封闭式的自给自足。主要有独立光伏电站和可移动独立光伏发电系统。有时根据资源状况, 这种系统也可以与风力机、柴油发电机配合, 组成风/光互补电站或风/光/柴互补电站。

(1) 独立光伏电站 我们把太阳能电池阵列与地面固定安装的独立光伏发电系统称为独立光伏电站, 主要应用于远离常规电网的无电地区和一些特殊处所。可分为两类。

① 村落独立光伏电站 其特点是在这种光伏发电系统中, 除了各种光伏发电设备以外, 一定要配备输出电网。电网是在一定范围内自成独立体系的, 通常电网电压为交流 220V 或 380V, 覆盖面积一般要求在 1km^2 以内。该系统为偏远的农村、牧区、海岛、荒漠的农民、牧民、渔民提供照明、看电视、听广播等基本生活用电。图 2-6 是一座典型的牧区村落独立光伏电站。



图 2-6 村落独立光伏电站

② 公共用独立光伏电站 与村落独立光伏电站相比, 公共用独立光伏电站无需输出电网, 发电系统直接供电给用电负载。通常为通信中继站、电视卫星地



图 2-7 微波通讯中继站光伏电源



图 2-8 太阳能路灯