太阳能光伏发电实用技术

王长贵　王斯成　主编

化学工业出版社
环境·能源出版中心
·北京·

（京）新登字 039 号

图书在版编目（CIP）数据

太阳能光伏发电实用技术/王长贵，王斯成主编.
北京：化学工业出版社，2005.6
ISBN 7-5025-7395-X

Ⅰ.太… Ⅱ.①王…②王… Ⅲ.太阳能发电
Ⅳ.TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 070799 号

太阳能光伏发电实用技术
王长贵 王斯成 主编
责任编辑：郑叶琳
文字编辑：张鹤凌 曾照华 李彦玲
责任校对：顾淑云
封面设计：关 飞

化学工业出版社
环境·能源出版中心 出版发行
（北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029）
购书咨询：（010）64982530
（010）64918013
购书传真：（010）64982630
http://www.cip.com.cn

新华书店北京发行所经销
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
三河市延风装订厂装订
开本 720mm×1000mm 1/16 印张 16¾ 字数 328 千字
2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-7395-X
定 价：35.00 元

版权所有 违者必究
该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

京化广临字 2005—18 号

前　言

能源是人类社会存在与发展的重要物质基础。目前的世界能源结构是以煤炭、石油、天然气等化石能源为主体的结构。而化石能源是不可再生的资源，大量耗用终将枯竭，并且在生产和消费过程中有大量污染物排放，破坏生态与环境。

为保证人类稳定、持久的能源供应，必须优化现存的以资源有限、不可再生的化石能源为主体的能源结构，建立资源无限、可以再生、多样化的新的能源结构，走经济社会可持续发展之路。

为保护人类赖以生存的地球的生态环境，必须采取措施减少化石能源的耗用，大力开发利用清洁、干净的新能源和可再生能源，走与生态环境和谐的绿色能源之路。

通过太阳能电池将资源无限、清洁干净的太阳辐射能转换为电能的太阳能光伏发电，是新能源和可再生能源家族的重要成员之一。近些年来，世界太阳能电池的产量和装机容量以年增长率在30％左右的速度快速发展，到2004年底全球的总装机容量已达4330MW左右。专家们预言，到21世纪中叶，太阳能光伏发电将发展成为重要的发电方式，在世界可持续发展的能源结构中占有一定的比例。

本书从工作原理到系统构成和主要部件，从系统设计到操作使用和维护管理，对太阳能光伏发电作了较为全面系统的介绍，可供太阳能光伏发电的设计人员、科研人员、管理人员、施工建设人员以及大专院校有关专业师生阅读参考。

本书由王长贵、王斯成主编，第一、二、三章由王长贵编写，第四章由刘业东、唐征编写，第五、八章由王斯成编写，第六章由曹仁贤编写，第七、九章由王长贵、叶东嵘编写，第十章由王长贵、毛和璜、高纪凡编写。

本书在编写中参考了不少书刊和文章，在此谨向其作者致以谢意。

由于水平有限，时间仓促，定会有不少不足之处，欢迎批评指正。

编　者

2005年4月

目　录

第一章　概述…… 1
第一节　世界太阳能光伏发电发展现状与未来展望…… 1
第二节　中国太阳能光伏发电发展现状与未来展望…… 2
参考文献…… 6

第二章　太阳能光伏发电工作原理、运行方式及系统组成…… 8
第一节　太阳能光伏发电的工作原理…… 8
第二节　太阳能光伏发电的运行方式…… 8
第三节　太阳能光伏发电系统的组成…… 9
参考文献 …… 17

第三章　太阳能电池 …… 18
第一节　半导体物理知识 …… 18
第二节　太阳能电池工作原理与特性 …… 31
第三节　太阳能电池生产制造工艺 …… 40
第四节　太阳能电池的发展趋势 …… 54
参考文献 …… 62

第四章　铅酸蓄电池 …… 63
第一节　铅酸蓄电池基本知识 …… 63
第二节　铅酸蓄电池的应用领域 …… 72
第三节　铅酸蓄电池一般设计知识和针对太阳能应用的特别设计 …… 73
第四节　阀控式铅酸蓄电池目前存在的问题和改进方向 …… 77
第五节　太阳能光伏系统用蓄电池的选型、设计和使用、维护 …… 90
参考文献…… 100

第五章　控制器…… 101
第一节　控制器的工作原理…… 101
第二节　控制器的分类…… 104
第三节　控制器的几种基本电路和工作原理…… 106
第四节　控制器的选择、安装、使用和维护…… 109

参考文献…… 109

第六章　逆变器…… 110
第一节　概述…… 110
第二节　单相电压源逆变器…… 112
第三节　三相逆变器…… 126
第四节　带高频环节逆变技术…… 141
第五节　逆变器的组合、并联、多重叠加和多电平技术…… 162
第六节　联网型逆变技术…… 191
参考文献…… 195

第七章　交流配电设备、输电线路、备用电源及防雷与接地…… 196
第一节　交流配电设备…… 196
第二节　低压架空配电线路…… 206
第三节　柴油发电机组…… 211
第四节　防雷与接地…… 217
参考文献…… 221

第八章　太阳能光伏发电系统的设计…… 222
第一节　太阳辐射原理…… 222
第二节　太阳能光伏发电系统不同运行方式的数学模型…… 223
第三节　太阳能光伏发电系统容量设计…… 226
第四节　不同类型负载的特点…… 230
第五节　太阳能光伏发电系统的设备配置和选型…… 231
第六节　太阳能光伏发电系统的防雷接地设计…… 232
参考文献…… 234

第九章　太阳能光伏发电系统操作使用与管理维护…… 235
第一节　太阳能光伏发电系统操作使用…… 235
第二节　太阳能光伏发电系统管理维护…… 236
参考文献…… 243

第十章　中国典型太阳能光伏发电工程介绍…… 244
第一节　西藏卡玛多乡 25kW 光伏电站 …… 244
第二节　教育部——世界银行学校用太阳能供电系统示范项目…… 256
第三节　革吉县 10kW 光伏示范电站 …… 258

第一章　概　　述

第一节　世界太阳能光伏发电发展现状与未来展望

太阳能光伏发电是新能源和可再生能源的重要组成部分，被认为是当前世界上最有发展前景的新能源技术，各发达国家均投入巨额资金竞相研究开发，并积极推进产业化进程，大力开拓市场应用。世界光伏工业1997年至2001年，5年的平均年增长率达35.5%。2004年世界光伏电池组件的生产量达到1194MW，比2003年的744.26MW增长60.46%。到2004年底，世界光伏发电的累计装机容量达到4330MW。在产业化方面，光伏企业的生产规模从10～50MW/a，发展到50～100MW/a，并正在向100～400MW/a的规模扩大。商品化晶体硅光伏电池的效率，从10%～13%提高到13%～17%。近年来，世界光伏电池组件的生产成本降低1/3左右，为2.5～3.0美元/W_p，目前国际市场光伏电池组件售价在3.5～3.9美元/W_p。美国光伏系统电价的成本目标是：2005年光伏系统安装成本3美元/W_p，成本电价11美分/kW·h；2010年安装成本下降为1.5美元/W_p，成本电价6美分/kW·h以下。印度的光伏产业在发展中国家发展快速。目前有80多个公司从事光伏产品生产，其中有6个光伏电池制造厂、12个光伏组件封装厂，1997年至1998年间生产光伏电池8.2MW，生产光伏组件11MW；预计2020年将达到年生产光伏电池及组件50MW。截至1998年底，印度光伏系统安装容量为35MW；计划1998年至2002年安装150MW。

新世纪伊始，众多国家纷纷制定雄心勃勃的发展规划，推动光伏技术和产业的发展。日本通产省第二次新能源分委会提出，2010年光伏发电装机达到5GW；欧盟可再生能源白皮书及相伴随的“起飞运动”2010年的目标是，光伏发电装机达到3GW；美国能源部国家光伏规划的目标是，光伏发电装机达到4.7GW；澳大利亚提出，2010年光伏发电装机达到0.75GW。如果再加发展中国家近年一直保持占世界光伏组件总产量10%左右的装机量，预计到2010年世界光伏系统累计安装容量将达到15GW。这意味着未来5年，世界光伏产业将以28%左右的年平均速度发展，成为世界上发展最快的一个产业。各国可再生能源法的颁布、快速发展的光伏屋顶计划、各种减免税政策和补贴政策以及逐渐成熟的绿色电力价格，为光伏市场的发展提供了良好的基础。光伏发电的应用领域将逐步由边远地区和农村的补充能源向全社会的替代能源过渡。预测到21世纪中叶，太阳能光伏发电将达到占世界总发电量的10%～20%，成为人类的基础能

源之一。

紧紧围绕降低光伏发电成本的各种研究开发工作一直在发达国家紧张地进行，其中以晶体硅材料为基础的高效电池和各种薄膜电池为基础研究工作的热点课题。高效单晶硅电池效率已达 24.7%，高效多晶硅电池效率达到 19.8%。薄膜电池的研究工作主要集中在非晶硅薄膜电池、CdTe 系电池、CIS 系电池和多晶硅薄膜电池上。非晶硅薄膜电池主要是通过双结和三结叠层电池克服衰降和提高效率。经过努力，已有许多新的突破，目前的实验室效率已经超过 15%。CdTe 系电池效率已达到 16.4%，CIS 系电池效率已达到 19.2%，而且都已有了电池效率约 10%的中试生产线。多晶硅薄膜电池的实验室效率已超过 17%，成为世界关注的新热点。光伏发电与建筑相结合，是目前世界上大规模利用光伏技术发电的研究开发热点，美国、日本和欧盟各国都在作为重点项目积极地进行，除在屋顶安装光伏电池外，并已推出把光伏电池装在瓦片内的产品和光伏幕墙等。2001 年以来世界光伏电池的年装机量有一半左右为各种类型的与建筑相结合的联网发电系统。近年，国际能源市场出现了以新能源和可再生能源为内容的一些热点。其中太阳能商品住宅市场的迅速崛起是最为突出的热点。据调查，从 1991 年至 1996 年，美国、西欧和日本在发展太阳能住宅方面的投资累计已达 500 多亿美元，其中 75%用于完善生产手段和扩大生产，表明太阳能建筑已进入商品化生产时期。日本有 100 多家建筑公司自 20 世纪 90 年代开始转产以发展太阳能住宅为主。美国已成为世界上最重要的太阳能住宅构件和设备的出口国。据分析，厂商热衷于投资发展太阳能住宅，其背景是许多国家接二连三地推出普及太阳能商品住宅的计划。据已公布的资料，2010 年以前，北美、西欧和日本将建成至少 200 万幢太阳能商品住宅，如果加上发展中国家，届时全球的太阳能住宅将达 300 万幢以上，相应形成的市场规模可达 2000 亿美元之巨。

此外，近些年来，美国、日本和俄罗斯等国均投入大量资金进行空间太阳能电站的研究试验，以期大规模利用太阳能为人类提供源源不断的电力，其前景十分诱人。

第二节　中国太阳能光伏发电发展现状与未来展望

中国于 1958 年开始研制太阳能电池，1959 年第一块有实用价值的太阳能电池诞生。中国于 1971 年 3 月首次应用太阳能电池作为科学实验卫星的电源，开始了太阳能电池的空间应用。中国于 1973 年首次在灯浮标上进行应用太阳能电池供电的试验，开始了太阳能电池的地面应用。

一、发展现状

（一）产业及产品

经过 40 多年的努力，中国的光伏发电技术已具有一定的水平和基础。到

2004 年底，已建成 10 多个初具规模的光伏电池专业生产厂，晶体硅光伏电池用硅片的年生产能力约为 54MW，晶体硅光伏电池的年生产能力约为 57MW，非晶硅电池组件的年生产能力约为 10MW，光伏电池组件的年生产能力在 150MW 以上。

中国光伏电池的主要产品是单晶硅电池、多晶硅电池和非晶硅电池。商品单晶硅电池组件的转换效率为 11%～15%。商品多晶硅光伏电池组件的转换效率为 10%～14%。商品非晶硅光伏电池组件的转换效率为 4%～6%。

2004 年中国光伏电池组件的产量约为 100MW，晶体硅电池的产量约为 32MW，非晶硅电池的产量约 4MW，硅片的产量约为 46MW，组件产品大部分出口，国内应用为 10MW 左右。在单晶硅和多晶硅光伏电池组件中，包括用进口光伏电池封装的组件，未包括出口的草坪灯等消费品用的光伏电池。在非晶硅光伏电池组件中，未包括出口的电子计算器等消费品用的光伏电池。

2003 年中国单晶硅和多晶硅光伏电池组件的售价为 35～40 元/W_p，非晶硅光伏电池组件的售价为 24～26 元/W_p。

（二）研究与开发

经过几十年的努力，中国光伏发电技术的研究开发工作取得不小的成就。中国主要光伏电池的实验室效率和尺寸如表 1-1 所列。有关研究单位、高校、企业先后开展了单晶硅和多晶硅高效电池、非晶硅薄膜电池、CdTe 薄膜电池、CIS 薄膜电池、多晶硅薄膜电池及应用系统关键技术的研究。近年来，在国家科技部的大力支持下，取得了许多可喜的研究成果。在晶体硅电池方面，2cm×2cm 单

表 1-1　中国主要光伏电池的实验室效率和尺寸

电池类别	最高效率/%	最大尺寸
单晶硅电池	20.4 14.0～16.0	2cm×2cm 10cm×10cm(实用型)
GaAs 电池	21.9	1cm×1cm
多晶硅电池	16.0 13.0～15.0	2cm×2cm 10cm×10cm(实用型)
聚光电池	17.0	2cm×2cm
非晶硅电池	11.2(单结) 11.4(双结) 8.6 7.9 6.2	几个平方毫米 几个平方毫米 10cm×10cm 20cm×20cm 30cm×30cm
CdS/Cu_2S 电池	12.0	几个平方毫米
$CuInSe_2$ 电池	12.1	1cm×1cm
CdTe 电池	13.36	0.5cm×0.5cm
二氧化钛纳米有机电池	10.0	1cm×1cm
多晶硅薄膜电池	13.6	1cm×1cm(非活性衬底上)

晶硅高效电池效率达到 20.4%，5cm×5cm 刻槽埋栅单晶硅电池效率达到 18.6%，2cm×2cm 多晶硅电池效率达到 16%，10cm×10cm 多晶硅电池效率达到13.0%～15.0%。在薄膜电池方面，采用快速热 CVD 技术在非活性衬底上制备的多晶硅薄膜电池效率达到 13.6%，采用 PECVD 技术制备的微晶硅/非晶硅迭层薄膜电池效率达到 9.5%。

在光伏发电平衡设备方面，也取得了不小的进步。“八五”、“九五”、“十五”期间开发出了独立光伏发电系统用的 10～100kW 的正弦波 DC-AC 逆变器，逆变效率大于 90%；研制出了一系列光伏专用的控制器和太阳模拟器等检测仪器；研制出了并网逆变器、智能控制器和光伏电站微机监控装置等平衡设备。

在光伏水泵系统、通信光伏电源系统、独立光伏电站、输油输气管道阴极保护光伏电源系统、家用光伏电源系统、光-风混合发电系统、小型并网光伏发电系统等系统技术方面，也取得了不少的研究成果和工程经验。

（三）应用与市场

中国光伏发电的地面应用始于 1973 年。30 多年来，系统技术不断提高，应用项目不断增多，市场不断扩大。1980 年以前，应用项目有限，功率很小，光伏电池年销售量不超过 10kW。由于电池价格昂贵，1985 年以前，主要是作为航标灯、铁路信号灯、气象台站观测仪表、电围栏、小型通信机、黑光灯、直流照明灯、割胶灯等的电源，功率不大。这是中国光伏发电技术市场应用的初级阶段。这一时期，在国家的支持下进行了一些对今后市场开拓具有前导意义的示范工程，如太阳能无人值守微波中继站、小型太阳能充电站、农村载波电话光伏电源系统、石油管道和水库闸门阴极保护太阳能电源系统等。20 世纪 80 年代后期，随着几条光伏电池生产线的引进，光伏电池价格大幅度下降，产量大大提高，应用领域不断开辟，市场大为拓展。90 年代以来，改革开放的大好形势为光伏技术的广泛应用和市场开拓创造了有利条件，光伏电池已不再是仅仅作为小功率电源来使用，而是扩展到通信、交通、石油、气象、国防、农村电气化以及民用等国民经济的各类不同应用领域，光伏电池用量每年在以 20%以上的速度递增。到 2003 年底，中国光伏发电的累计装机容量约达 55MW。其中农村电气化及农户家用光伏系统约 28MW，占 51%；通信及其他工业交通等应用 20MW，占 36%；太阳能应用产品 5MW，占 9%；并网发电 2MW，占 4%。其中著名的项目主要有：①1989 年至 2001 年在海拔 4500m 以上的“世界屋脊”西藏建设了 25～100kW 的县级光伏电站 7 座，总功率达 420kW；②横贯塔克拉玛干沙漠建设了输油输气管道阴极保护光伏电源系统 7 座，总功率为 40kW；③在气象条件极其恶劣的兰西拉光缆通信工程中建立了 26 座光伏电源系统，总功率达 100 多 kW；④2000 年在西藏阿里地区实施的“科技之光”项目，仅 3 年时间就在 38 个无电乡建成了约 50 多座小型光伏电站，总装机容量约 600kW，使几万户农牧民用上了电；⑤2002 年至 2004 年国家实施“送电到乡”工程，在西部 7 个省、

区的 632 个无电乡建设太阳能光伏发电站和风光混合发电站 713 座，光伏电池总功率约达 20MW；⑥2002 年至 2004 年在深圳建成 1MW、在北京建成 300kW、140kW 和 100kW 等多座并网光伏电站。⑦截至 2003 年底，西藏、新疆、甘肃、青海、内蒙古、四川等 6 省区累计安装使用了家用光伏电源系统达 41 万套，总光伏电池功率约 8.2MW_p。

我国近期光伏发电市场应用的重点项目主要有：家用光伏电源，微波通信中继站光伏电源，光缆通信站光伏电源，输油输气管道阴极保护光伏电源，铁路信号及通信光伏电源，航标灯光伏电源，乡镇及村落光伏电源，边防哨所光伏电源，气象台站光伏电源，卫星电视接收站及电视差转台光伏电源，公路设施及道班光伏电源，各种照明装置、标志和广告箱牌光伏电源，以及城市与建筑结合的小型屋顶联网光伏系统等。

（四）存在的主要问题

从总体上来讲，与国外发达国家相比，我国的光伏发电技术及其产业还有很大差距，存在的主要问题如下。

1. 硅材料紧缺

随着光伏产业的快速发展，近年出现了世界范围的硅材料紧缺，我国更为突出。应采取有力措施，尽快扩大硅材料的生产能力，研发并形成产业化生产太阳级硅的能力。

2. 生产规模小，产业链不完整

目前我国晶体硅光伏电池生产厂的规模化多在 3～30MW 之间，只有个别的达到 50MW，比国外的 100MW 及以上的生产规模小得多。并且产业链不完整，多数厂不能生产硅片，多数厂不生产电池仅能买电池封装组件。

3. 技术水平低

目前我国商品晶体硅光伏电池组件的光电转换效率多在 10％～14％之间；组件的封装水平低，工程应用不时发现有的组件经过几年的使用有发黄、起泡、焊线脱落、效率下降等现象出现；组件的实际使用寿命，也不如国外产品。

4. 平衡设备薄弱落后

光伏用的控制器、逆变器等关键平衡设备，从总体上来说，技术性能不够高，可靠性尚低，品种规格少，功能不多，与国外先进产品有不小差距，特别是并网逆变器和智能控制器差距更大。

5. 专用材料的国产化程度不高

银浆、低铁钢化玻璃、PVF、TPT 等关键封装材料尚未真正实现国产化。国家曾把专用材料的国产化列入“八五”攻关计划进行攻关，虽然取得一定成果，但性能仍然不如国外产品；各生产厂为保证产品质量，目前许多专用材料仍然从国外进口。

6. 成本价格尚高

目前晶体硅光伏电池组件的生产成本约为 25～30 元/W_p，平均售价约为35～40 元/W_p，成本和售价均高于国外同类、同质产品，在国际市场上竞争力不够强。“入世”实行进口光伏电池零关税之后，受进口产品的冲击不小。

7. 标准规范不够健全

产品与系统的标准、规范不够健全，已有的也执行不够有力；检验认证体系尚需进一步加以完善和建立。

二、未来展望

世界各发达国家的共同经验说明，政府的大力提倡和出台一系列激励政策和法律、法规加以扶持，是新能源和可再生能源迅速发展的强大动力和保证。我国政府对新能源和可再生能源的发展十分重视，尤其是近年来采取了一系列措施大力扶持其发展。2004 年 6 月 30 日，温家宝总理主持召开的国务院常务会议，讨论并原则通过了《能源中长期发展规划纲要（2004～2020 年）》（草案），并提出了“大力调整和优化能源结构，坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的战略”。2005 年 2 月 28 日，十届人大常委会第十四次会议通过了《可再生能源法》，国家主席胡锦涛以第 33 号主席令公布，自 2006 年 1 月 1 日起实行。前者将发展新能源和可再生能源列入了国家的能源发展战略立了“户口”，后者通过立法对新能源和可再生能源的发展给予法律上的支持和保证，必将大大促进我国新能源和可再生能源的发展进程。

当前化石能源资源逐渐走向枯竭和大量耗用化石能源对生态环境的影响日益突出的国内外形势，对新能源和可再生能源的发展极为有利，形成了一个良好的发展环境。展望未来，可以充满信心地说，我国的太阳能光伏发电技术及其产业，在 21 世纪上半叶将会有更大、更快的发展，在我国的能源结构中占有一席之地，为全面建设小康社会的伟大事业做出更大的贡献。

2004 年国家发改委起草了一个《中国可再生能源开发战略规划（2006～2020 年）》（草案），描绘了我国中长期新能源和可再生能源发展的蓝图，是一个宏伟的计划，令人鼓舞。规划提出的发电能力预期目标为：到 2010 年可再生能源发电的总装机容量达到 60×10^6 kW，占全国总电力装机容量的 10%，其中太阳能光伏发电装机容量达到 45×10^4 kW，为 2003 年太阳能光伏发电装机容量的 8.18 倍；到 2020 年可再生能源发电的总装机容量达到 1.21×10^8 kW，占全国总电力装机容量的 12%，其中太阳能光伏发电装机容量达到 10×10^5 kW，为 2010 年预期太阳能光伏发电装机容量的 2.22 倍。

参 考 文 献

1 “十五”国家高新技术发展计划能源技术领域专家委员会. 能源发展战略研究. 北京：化学工业出版社，2004

2 《2003年中国能源发展报告》编委会. 2003年中国能源发展报告. 中国能源，2003，(12)
3 王长贵，崔容强，周篁主编. 新能源发电技术. 北京：中国电力出版社，2003
4 中国发展计划委员会基础产业发展司. 中国新能源与可再生能源（1999年白皮书）. 北京：中国计划出版社，2000
5 顾树华，刘洪鹏主编. 2000～2015年新能源和可再生能源产业发展规划. 北京：中国经济出版社，2001

第二章　太阳能光伏发电工作原理、运行方式及系统组成

第一节　太阳能光伏发电的工作原理

太阳能光伏发电的能量转换器是太阳能电池，又称光伏电池。太阳能电池发电的原理是光生伏打效应。当太阳光（或其他光）照射到太阳能电池上时，电池吸收光能，产生光生电子—空穴对。在电池内建电场作用下，光生电子和空穴被分离，电池两端出现异号电荷的积累，即产生“光生电压”，这就是“光生伏打效应”。若在内建电场的两侧引出电极并接上负载，则负载就有“光生电流”流过，从而获得功率输出。这样，太阳的光能就直接变成了可以付诸实用的电能。

可把上述太阳能电池将光能转换成电能的工作原理概括为如下 3 个主要过程：①太阳能电池吸收一定能量的光子后，半导体内产生电子—空穴对，称为“光生载流子”，两者的电性相反，电子带负电，空穴带正电；②电性相反的光生载流子被半导体 p-n 结所产生的静电场分离开；③光生载流子电子和空穴分别被太阳能电池的正、负极所收集，并在外电路中产生电流，从而获得电能。

第二节　太阳能光伏发电的运行方式

通过太阳能电池（又称光伏电池）将太阳辐射能转换为电能的发电系统称为太阳能电池发电系统（又称太阳能光伏发电系统）。太阳能光伏发电目前工程上广泛使用的光电转换器件晶体硅太阳能电池，生产工艺技术成熟，已进入大规模产业化生产，广泛应用于工业、农业、科技、文教、国防和人民生活的各个领域。预计 21 世纪中叶，太阳能光伏发电将发展为重要的发电方式，在世界可持续能源结构中占有一定的比例。

地面太阳能光伏发电系统的运行方式，主要可分为离网运行和联网运行两大类。未与公共电网相联接的太阳能光伏发电系统称为离网太阳能光伏发电系统，又称为独立太阳能光伏发电系统，主要应用于远离公共电网的无电地区和一些特殊处所，如为公共电网难以覆盖的边远偏僻农村、牧区、海岛、高原、荒漠的农牧渔民提供照明、看电视、听广播等的基本生活用电，为通信中继站、沿海与内河航标、输油输气管道阴极保护、气象台站、公路道班以及边防哨所等特殊处所提供电源。与公共电网相联接的太阳能光伏发电系统称为联网太阳能光伏发电系统，它是太阳能光伏发电进入大规模商业化发电阶段、成为电力工业组成部分之一的重要方向，是当今世界太阳能光伏发电技术发展的主流趋势。特别是其中的

光伏电池与建筑相结合的联网屋顶太阳能光伏发电系统，是众多发达国家竞相发展的热点，发展迅速，市场广阔，前景诱人。

为给农村不通电乡镇及村落广大农牧民解决基本生活用电和为特殊处所提供基本工作电源，经过 30 多年的努力，离网太阳能光伏发电系统在我国已有一定的发展，到 2004 年底光伏电池总装机容量约达 65MW 左右，并将继续快速发展。但联网太阳能光伏发电系统在我国却尚处于试验示范的起步阶段，远远落后于美、欧、日等发达国家和地区。我们应制订规划，采取措施，积极加以发展。

第三节　太阳能光伏发电系统的组成

一、离网太阳能光伏发电系统的组成

离网太阳能光伏发电系统根据用电负载的特点，可分为直流系统、交流系统和交直流混合系统等几种。其主要区别是系统中是否带有逆变器。一般来说，离网太阳能光伏发电系统主要由太阳能电池方阵、控制器、蓄电池组、直流/交流逆变器等部分组成。离网太阳能光伏发电系统的组成框图，如图 2-1 所示。

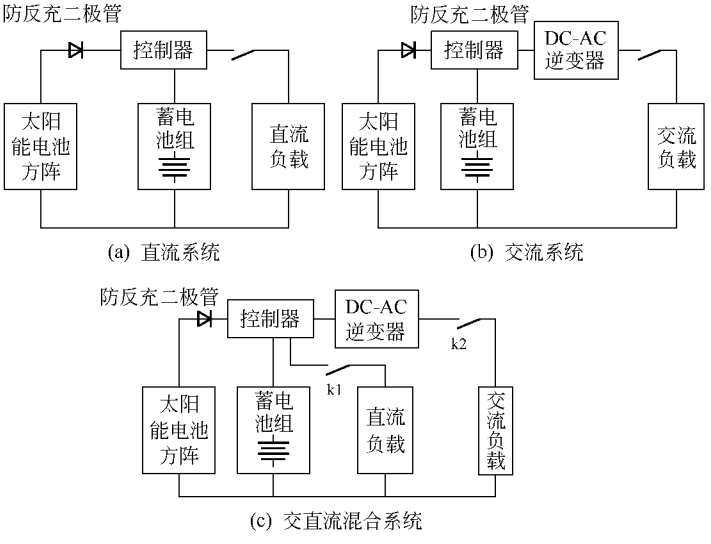


图 2-1　离网太阳能光伏发电系统组成框图

1. 太阳能电池方阵

太阳能电池单体是光电转换的最小单元，尺寸一般为 2cm×2cm 到 15cm×15cm 不等。太阳能电池单体的工作电压约为 0.45～0.5V，工作电流约为 20～25mA/cm^2，一般不能单独作为电源使用。将太阳能电池单体进行串并联并封装后，就成为太阳能电池组件，其功率一般为几瓦至几十瓦、百余瓦，是可以单独作为电源使用的最小单元。太阳能电池组件再经过串并联并装在支架上，就构成

了太阳能电池方阵，可以满足负载所要求的输出功率（见图 2-2）。

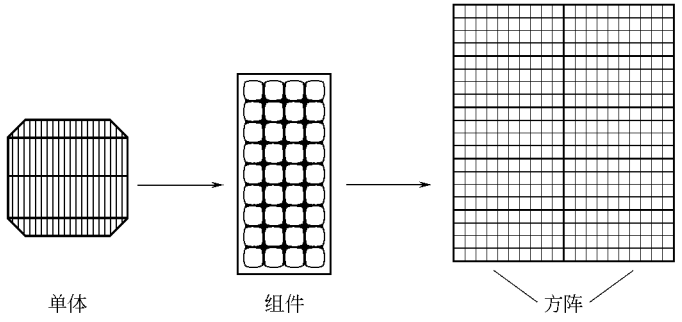


图 2-2　太阳能电池单体、组件和方阵

一个太阳能电池只能产生大约 0.45V 电压，远低于实际应用所需要的电压。为了满足实际应用的需要，需把太阳能电池连接成组件。太阳能电池组件包含一定数量的太阳能电池，这些太阳能电池通过导线连接。一个组件上，太阳能电池的标准数量是 36 个或 40 个（10cm×10cm），这意味着一个太阳能电池组件大约能产生 16V 的电压，正好能为一个额定电压为 12V 的蓄电池进行有效的充电。

通过导线连接的太阳能电池被密封成的物理单元被称为太阳能电池组件，具有一定的防腐、防风、防雹、防雨等的能力，广泛应用于各个领域和系统。当应用领域需要较高的电压和电流而单个组件不能满足要求时，可把多个组件组成太阳能电池方阵，以获得所需要的电压和电流。

2. 防反充二极管

又称阻塞二极管。其作用是避免由于太阳能电池方阵在阴雨天和夜晚不发电时或出现短路故障时，蓄电池组通过太阳能电池方阵放电。它串联在太阳能电池方阵电路中，起单向导通作用。要求其能承受足够大的电流，而且正向电压降要小，反向饱和电流要小。一般可选用合适的整流二极管。

3. 蓄电池组

其作用是贮存太阳能电池方阵受光照时所发出的电能并可随时向负载供电。太阳能电池发电系统对所用蓄电池组的基本要求是：①自放电率低；②使用寿命长；③深放电能力强；④充电效率高；⑤少维护或免维护；⑥工作温度范围宽；⑦价格低廉。目前我国与太阳能电池发电系统配套使用的蓄电池主要是铅酸蓄电池。配套 200Ah 以上的铅酸蓄电池，一般选用固定式或工业密封免维护铅酸蓄电池；配套 200Ah 以下的铅酸蓄电池，一般选用小型密封免维护铅酸蓄电池。

4. 控制器

是光伏发电系统的核心部件之一。光伏电站的控制器一般应具备如下功能：①信号检测　检测光伏发电系统各种装置和各个单元的状况和参数，为对系统进行判断、控制、保护等提供依据。需要检测的物理量有输入电压、充电电流、输

出电压、输出电流以及蓄电池温升等。②蓄电池最优充电控制　控制器根据当前太阳能资源情况和蓄电池荷电状态，确定最佳充电方式，以实现高效、快速地充电，并充分考虑充电方式对蓄电池寿命的影响。③蓄电池放电管理　对蓄电池放电过程进行管理，如负载控制自动开关机、实现软启动、防止负载接入时蓄电池端电压突降而导致的错误保护等。④设备保护　光伏系统所连接的用电设备，在有些情况下需要由控制器来提供保护，如系统中因逆变电路故障而出现的过电压和负载短路而出现的过电流等，如不及时加以控制，就有可能导致光伏系统或用电设备损坏。⑤故障诊断定位　当光伏系统发生故障时，可自动检测故障类型，指示故障位置，为对系统进行维护提供方便。⑥运行状态指示　通过指示灯、显示器等方式指示光伏系统的运行状态和故障信息。

光伏发电系统在控制器的管理下运行。控制器可以采用多种技术方式实现其控制功能。比较常见的有逻辑控制和计算机控制两种方式。智能控制器多采用计算机控制方式。

5. 逆变器

逆变器是将直流电变换成交流电的设备。由于太阳能电池和蓄电池发出的是直流电，当负载是交流负载时，逆变器是不可缺少的。对逆变器的基本要求是：①能输出一个电压稳定的交流电。无论是输入电压出现波动，还是负载发生变化，它都要达到一定的电压稳定精度，静态时一般为±2%。②能输出一个频率稳定的交流电。要求该交流电能达到一定的频率稳定精度，静态时一般为±0.5%。③输出的电压及其频率在一定范围内可以调节。一般输出电压可调范围为±5%，输出频率可调范围为±2Hz。④具有一定的过载能力，一般能过载125%～150%。当过载150%时，应能持续30s；当过载125%时，应能持续1min及以上。⑤输出电压波形含谐波成分应尽量小。一般输出波形的失真率应控制在7%以内，以利于缩小滤波器的体积。⑥具有短路、过载、过热、过电压、欠电压等保护功能和报警功能。⑦起动平稳，起动电流小，运行稳定可靠。⑧换流损失小，逆变频率高，一般在85%以上。⑨具有快速的动态响应。逆变器按运行方式，可分为独立运行逆变器和并网逆变器。独立运行逆变器用于独立运行的太阳能电池发电系统，为独立负载供电。并网逆变器用于并网运行的太阳能电池发电系统，将发出的电能馈入电网。逆变器按输出波型又可分为方波逆变器和正弦波逆变器。方波逆变器，电路简单，造价低，但谐波分量大，一般用于几百瓦以下和对谐波要求不高的系统。正弦波逆变器，成本高，但可以适用于各种负载。从长远看，正弦波逆变器将成为发展的主流。

6. 测量设备

对于小型太阳能电池发电系统，只要求进行简单的测量，如蓄电池电压和充放电电流，测量所用的电压表和电流表一般就装在控制器上。对于太阳能通信电源系统、管道阴极保护系统等工业电源系统和中大型太阳能光伏电站，往往要求

对更多的参数进行测量，如太阳辐射、环境气温、充放电电量等，有时甚至要求具有远程数据传输、数据打印和遥控功能，这就要求为太阳能电池发电系统配备数据采集系统和微机监控系统。

二、联网太阳能光伏发电系统的组成

联网太阳能光伏系统可分为集中式大型联网光伏系统（以下简称为大型联网光伏电站）和分散式小型联网光伏系统（以下简称住宅联网光伏系统）两大类型。大型联网光伏电站的主要特点是所发电能被直接输送到电网上，由电网统一调配向用户供电。建设这种大型联网光伏电站，投资巨大，建设期长，需要复杂的控制和配电设备，并要占用大片土地，同时其发电成本目前要比市电贵数倍，因而发展不快。而住宅联网光伏系统，特别是与建筑结合的住宅屋顶联网光伏系统，由于具有许多优越性，建设容易，投资不大，许多国家又相继出台了一系列激励政策，因而在各发达国家备受青睐，发展迅速，成为主流。下面重点介绍住宅联网光伏系统。

住宅联网光伏系统的主要特点，是所发的电能直接分配到住宅（用户）的用电负载上，多余或不足的电力通过联接电网来调节。根据联网光伏系统是否允许通过供电区变压器向主电网馈电，分为可逆流与不可逆流联网光伏发电系统。可逆流系统，是在光伏系统产生剩余电力时将该电能送入电网，由于是同电网的供电方向相反，所以称为逆流；当光伏系统电力不够时，则由电网供电（见图 2-3）。这种系统，一般是为光伏系统的发电能力大于负载或发电时间同负荷用电时间不相匹配而设计的。住宅系统由于输出的电量受天气和季节的制约，而用电又有时间的区分，为保证电力平衡，一般均设计成可逆流系统。不可逆流系统，则是指光伏系统的发电量始终小于或等于负荷的用电量，电量不够时由电网提供，即光伏系统与电网形成并联向负载供电。这种系统，即使当光伏系统由于某种特殊原因产生剩余电能，也只能通过某种手段加以处理或放弃。由于不会出现光伏系统向电网输电的情况，所以称为不可逆流系统（见图 2-4）。

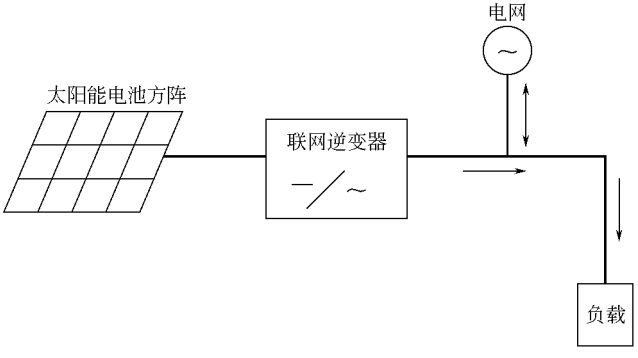


图 2-3　可逆流系统