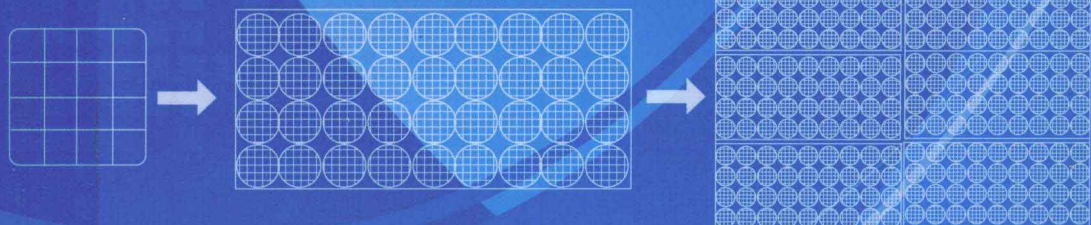
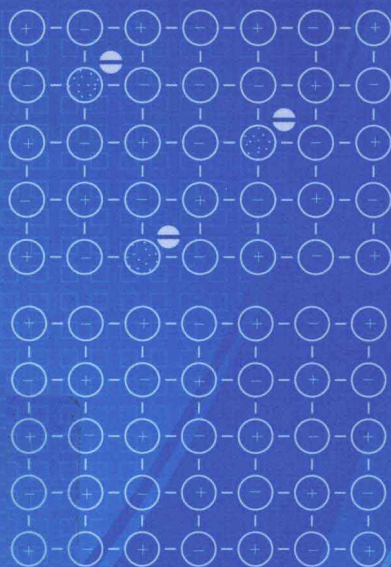




TAIYANGNENG GUANGFUFADIAN XITONG JIQI YINGYONG

# 太阳能光伏发电系统 及其应用

杨贵恒 强生泽 张颖超 郑勇 编著



化学工业出版社



TAIYANGNENG GUANGFUFADIAN XITONG JIQI YINGYONG

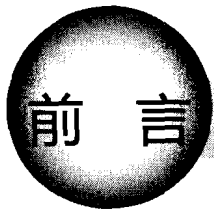
# 太阳能光伏发电系统 及其应用

杨贵恒 强生泽 张颖超 郑勇 编著



化学工业出版社

· 北京 ·



# 前言

进入 21 世纪的人类社会正面临着化石燃料短缺和生态环境严重污染的局面。廉价的石油时代已经结束，逐步改变能源消费结构，大力发展可再生能源，走可持续发展的道路，已成为世界各国政府的共识。

太阳能是一种非常理想的清洁能源，根据其特点和实际应用需要，目前太阳能发电分为光热发电和光伏发电两种，通常所说的太阳能发电是指太阳能光伏发电。光伏发电是利用半导体的光生伏特效应将光能直接转变为电能的一种发电技术。

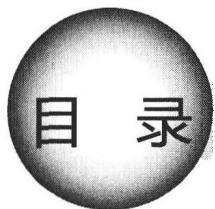
由于太阳能光伏发电具有独特的优点，其应用与普及越来越受到人们的重视。我国的太阳能资源十分丰富，为太阳能的利用创造了有利的自然条件，近年来得到了飞速发展。我国太阳电池的产量平均年增长率在 40% 以上，已成为发展迅速的高新技术产业之一，其应用规模和领域也在不断扩大，从原来只在偏远无电地区和特殊用电场合使用，发展到城市并网系统和大型光伏电站。尽管目前太阳能光伏发电在能源结构中的所占比例不大，但是随着社会的发展和技术的进步，其份额将会逐年增加。有关专家们预测，到 21 世纪中叶，太阳能光伏发电将成为世界能源供应的主体，一个光辉灿烂的太阳能时代即将到来。

本书共分为 8 章来讨论太阳能光伏发电系统及其应用技术。第 1 章介绍了太阳的物理特性、太阳辐射的性质、我国的太阳能资源分布与利用形式以及太阳能光伏发电现状与发展前景；第 2 章介绍了各种太阳能光伏发电系统的工作原理；第 3 章至第 7 章重点讨论了太阳能光伏发电系统中的核心部件及其相关技术：太阳能光伏电池与阵列、储能装置、光伏发电系统中的电能变换技术、光伏发电系统的控制与管理、光伏发电系统的设计与应用等；第 8 章简要介绍了太阳能光伏发电系统的运行管理与维护。编写过程中，在保证本书科学性、针对性和实用性的同时，注重其通俗性。本书是从从事太阳能光伏发电系统设计、开发与应用工程技术人员的必备参考书。

本书由杨贵恒、强生泽、张颖超、郑勇、徐忠山、王秋虹、钱希森、李龙、龚伟、李剑、景刚、刘扬、景有泉、朱鹏涛、蒲红梅、李世刚、张传富、曹均灿、张瑞伟、詹天文、聂金铜、金丽萍、刘凡、闫民华和王大伟等共同编写，最后由杨贵恒统稿。另外，在出版过程中，得到了重庆通信学院训练部教保科的大力支持，在此表示衷心感谢。

由于太阳能光伏发电技术所涉及的知识面广，相关技术发展迅猛，再加之编者的水平和经验有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编著者



<b>第 1 章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 太阳及太阳能概述	1
1.1.1 太阳的物理特性	1
1.1.2 太阳能辐射与吸收	3
1.1.3 我国的太阳能资源	3
1.1.4 太阳能利用的基本形式	5
1.2 太阳能光伏发电现状与发展前景	7
1.2.1 世界光伏发电的发展现状	7
1.2.2 中国光伏发电的发展现状	9
1.2.3 太阳能光伏发电的发展前景	12
<b>第 2 章 光伏发电系统的类型</b>	<b>16</b>
2.1 独立光伏发电系统	16
2.1.1 户用光伏发电系统	16
2.1.2 独立光伏电站	17
2.1.3 市电并联光伏发电系统	17
2.2 并网光伏发电系统	19
2.2.1 并网光伏发电系统的优点	19
2.2.2 直流并网的光伏发电系统	20
2.2.3 交流并网的光伏发电系统	22
2.3 互补型光伏发电系统	23
2.3.1 互补型光伏发电系统的结构组成	24
2.3.2 互补型光伏发电系统的控制器	27
2.3.3 风光互补发电系统的应用	37
<b>第 3 章 光伏电池与阵列</b>	<b>40</b>
3.1 太阳能光伏电池工作原理	40
3.1.1 半导体基础知识	40
3.1.2 光生伏打效应	44
3.1.3 太阳能光伏电池工作过程	45
3.1.4 太阳能光伏电池的基本结构	46
3.2 太阳能光伏电池基本特性	48

3.2.1	等效模型	48
3.2.2	伏安特性参数	50
3.2.3	其他因素对太阳能电池输出特性的影响	51
3.2.4	影响太阳能电池效率的因素	54
3.3	太阳能光伏电池类型及制造	56
3.3.1	太阳能光伏电池的类型	56
3.3.2	太阳能光伏电池的制造	59
3.4	太阳能电池组件与方阵	61
3.4.1	太阳能电池组件	61
3.4.2	太阳能电池方阵	65
3.4.3	太阳能光伏阵列的性能指标	70

## 第4章 储能装置

73

4.1	铅酸蓄电池的构造	73
4.1.1	电极	73
4.1.2	电解液	74
4.1.3	隔板(膜)	77
4.1.4	电池槽	78
4.1.5	排气栓	79
4.1.6	附件	80
4.1.7	装配方式	80
4.2	铅酸蓄电池的工作原理	82
4.2.1	放电过程	82
4.2.2	充电过程	82
4.2.3	阀控式密封铅蓄电池的密封原理	83
4.3	铅酸蓄电池的性能	85
4.3.1	内阻	85
4.3.2	电动势	88
4.3.3	开路电压	89
4.3.4	端电压	90
4.3.5	容量	95
4.3.6	自放电	100
4.3.7	寿命特性	106

## 第5章 光伏发电系统中的电能变换技术

107

5.1	概述	107
5.1.1	光伏发电系统中电能变换的种类	107
5.1.2	光伏发电系统对电能变换的要求	107
5.2	直流-直流变换技术	108
5.2.1	基本原理	108

5.2.2	不隔离型直流变换器	110
5.2.3	隔离型直流变换器	123
5.2.4	直流-直流变换器的控制与驱动	129
5.3	直流-交流变换技术	131
5.3.1	单相逆变电路	131
5.3.2	三相逆变电路	135
5.3.3	新型逆变电路	139
5.3.4	逆变控制技术	145

## 第6章 光伏发电系统的控制与管理

155

6.1	最大功率点跟踪	155
6.1.1	MPPT 基本原理	155
6.1.2	恒定电压法	157
6.1.3	干扰观测法	158
6.1.4	电导增量法	159
6.1.5	其他 MPPT 方法	160
6.2	蓄电池的充放电控制管理	161
6.2.1	独立光伏发电系统能流模型	162
6.2.2	蓄电池充放电模式	163
6.2.3	蓄电池充电控制	166
6.2.4	蓄电池充放电管理	170
6.3	光伏并网控制技术	173
6.3.1	并网逆变器数学模型	174
6.3.2	并网逆变器电流控制方法	175
6.3.3	并网逆变器并联控制技术	180
6.3.4	孤岛效应及其检测方法	185

## 第7章 光伏发电系统设计

191

7.1	独立光伏发电系统的容量设计	192
7.1.1	设计流程	192
7.1.2	光伏阵列的容量设计	193
7.1.3	蓄电池的容量设计	198
7.1.4	计算实例	198
7.1.5	系统容量的快速设计	199
7.2	独立光伏发电系统配置的优化设计	201
7.2.1	均衡性负载	201
7.2.2	季节性负载	207
7.2.3	特殊要求负载	208
7.3	并网光伏系统的设计	210
7.3.1	设计计算	210

7.3.2	计算实例	210
7.4	光伏发电系统的辅助设计	211
7.4.1	光伏发电系统的电气、机械及热设计	211
7.4.2	辅助设备选配	212
7.4.3	设备安装布置设计	213
7.4.4	光伏发电系统的配线设计	215
7.4.5	光伏系统中的过流保护设计	219
7.4.6	光伏电站防雷系统设计	220
7.4.7	光伏电站接地系统设计	224
7.5	光伏系统设计重点	225
7.5.1	系统容量设计的重点	225
7.5.2	系统硬件设计的重点	226
7.5.3	小结	227

## 第8章 光伏发电系统的建设与运行维护

228

8.1	光伏电站系统的工程施工	228
8.1.1	施工准备	228
8.1.2	基础建设	230
8.1.3	太阳能电池方阵安装	232
8.1.4	蓄电池安装	240
8.1.5	控制器和逆变器的安装	242
8.1.6	光伏系统布线	244
8.1.7	防雷接地系统安装	245
8.1.8	光伏系统的检查和调试	245
8.1.9	配套图纸资料	247
8.2	光伏电站系统的维护与管理	248
8.2.1	建立完善的文件管理体系	248
8.2.2	完善维护管理的项目内容	249
8.2.3	树立“安全第一”的用电意识	253
8.2.4	加强运行维护人员的业务培训	255
8.2.5	构建高效的应急处理机制	255
8.3	光伏电站系统的故障检修	257
8.3.1	系统的预防性维修	257
8.3.2	系统的常规故障检修	257
8.3.3	巧用万用表检查系统布线故障	258
8.3.4	系统常见故障检修指南	259



# 绪 论

随着世界经济的快速发展，对能源的需求越来越大。目前，世界各国大多以石油、天然气和煤炭等原料作为主要能源，这必将导致能源的日益枯竭与环境污染的日益突出，能源与环境已成为 21 世纪人类面临的两项重大难题，包括太阳能、风能、水能、海洋能、地热能等在内的可再生能源的发展与应用受到广泛关注。

## 1.1 太阳及太阳能概述

太阳能是由太阳中的氢经过聚变而产生的一种能源。它分布广泛，可自由利用，取之不尽，用之不竭，是人类最终可以依赖的能源。太阳能以辐射的形式每秒向太空发射  $3.8 \times 10^{19}$  MW 能量，其中有 22 亿分之一投射到地球表面。地球上一年中接受到的太阳辐射能高达  $1.8 \times 10^{18}$  kW·h，是全球能耗的数万倍，由此可见太阳的能量有多么巨大。利用太阳能的分布式能源系统逐渐受到了各国政府的重视。要想合理利用太阳能，首先要了解太阳的物理特性、太阳辐射的性质以及我国的太阳能资源分布与利用形式等。

### 1.1.1 太阳的物理特性

人类对太阳的利用已有悠久的历史，中国早在 2000 多年前的战国时期就已经懂得用金属做成的凹面镜聚集太阳光来点火。那么，太阳的能量是从哪里来的呢？正像一年四季里人们亲身感受到的那样，太阳是一个热烘烘的大火球，每天都在向我们居住的地球放射出大量的光和热。太阳位于地球所在的太阳系的中心，太阳系如图 1-1

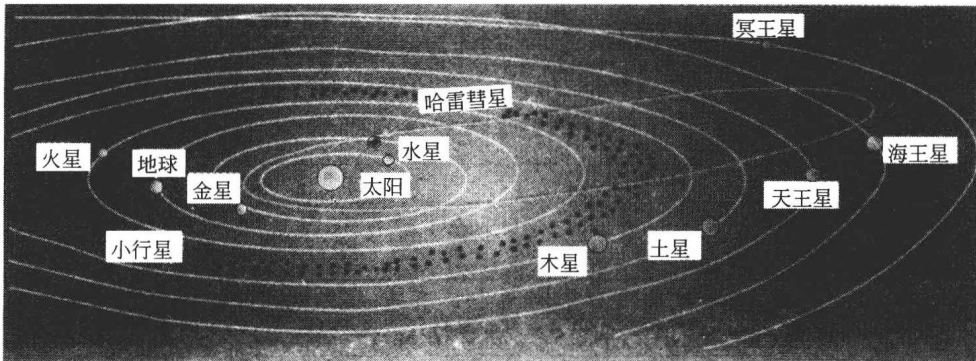


图 1-1 太阳星系图



所示。

太阳为一颗恒星，太阳系中的其他星星均为行星或为行星的卫星，本身都不能发光。太阳的结构十分复杂，如图 1-2 所示。我们日常所能看见的是太阳的大气层，它从里向外分为光球、色球和日冕三层。太阳表面温度大约为 5700K，中心温度大约为  $1.4 \times 10^7$  K，压力约为 2000 多亿个大气压。由于太阳内部温度极高，压力极大，其内部物质早已离化而呈离子态，不同原子核的相互碰撞引起一系列类似于氢弹爆炸的核子反应是太阳能量的主要来源。表 1-1 简要介绍了太阳的物理性质。

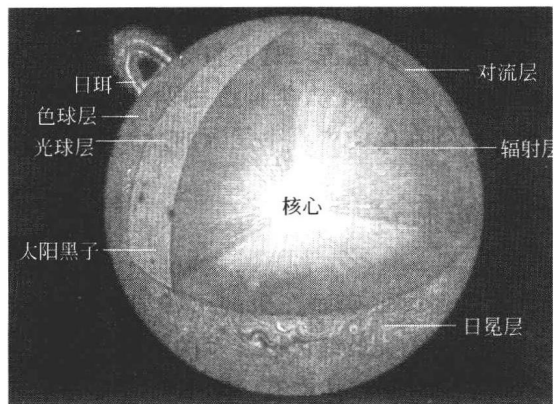


图 1-2 太阳结构图

表 1-1 太阳的物理性质

太阳的物理性质		数值
直径		$1.39196 \times 10^6$ km
表面积		$6.093 \times 10^{12}$ km <sup>2</sup>
质量		$1.989 \times 10^{30}$ kg
体积		$1.4122 \times 10^{27}$ m <sup>3</sup>
平均密度		1.4g/cm <sup>3</sup>
表面加速度		$2.7395 \times 10^4$ cm/s <sup>2</sup>
冠温度		$1 \times 10^6$ K
光球表面温度(相对于黑体辐射)		5762K
阳光辐射率		$6.5 \times 10^{10}$ erg/s · cm <sup>2</sup>
太阳表面抛物线速度		617km/s
太阳自转周期		24.65d
太阳成分(按质量)	氢	75%
	氦	24.25%
	重元素	0.75%
惯性矩		$6 \times 10^{46}$ kg · m <sup>2</sup>
太阳常数值		$1.95 \pm 0.02$ cal/cm <sup>2</sup> · min 或 1370W/m <sup>2</sup>
能量产生率		$3.9 \times 10^{16}$ W
表面逸出速度		618m/s

### 1.1.2 太阳能辐射与吸收

太阳是以光辐射的方式将能量输送到地球表面的，其中一部分光线被反射或散射，一部分光线被吸收，只有大约 70% 的光线通过大气层到达地球表面，如图 1-3 所示。太阳光在到达地球平均距离处，垂直于太阳光方向的辐射强度（辐射强度也称辐照强度，是指在单位时间内，垂直投射到地球某一单位面积上的太阳辐射能量，通常用  $W/m^2$  或  $kW/m^2$  表示）为一常数  $1.367kW/m^2$ ，此值称为太阳常数（Solar Constant）。到达地球表面的太阳辐照度（辐照度也称辐射通量，是指在单位时间内，投射在地球某一单位面积上太阳辐射能的量值，通常用  $kW \cdot h/m^3$  表示）与穿透大气层的厚度有关。通过太阳在任何位置与在天顶时，日照通过大气到达测点路径的比值来描述大气质量 AM（Air Mass）。

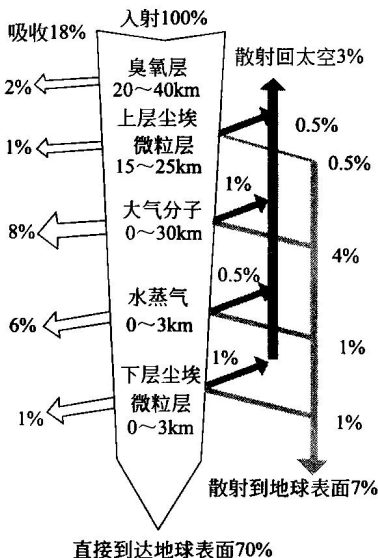


图 1-3 大气成分对太阳光的衰减作用图

大气质量为零的状态（AM0），是指在地球空间外接收太阳光的情况。太阳与天顶轴重合时，路程最短，只通过一个大气层的厚度，太阳光线的实际路程和此最短距离之比称为光学大气质量。

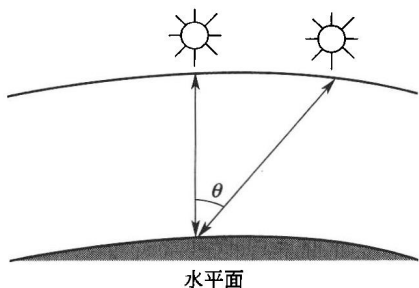


图 1-4 大气质量同照射角度的关系

光学大气质量为 1 时的辐射也称为大气质量为 1（AM1）的辐射。当太阳光线与地面垂直线成一个角度  $\theta$  时（如图 1-4 所示），大气质量  $= 1/\cos\theta$ 。估算大气质量的简易方法是，测量高度为  $h$  的物体的投射阴影长度  $s$ ，则大气质量  $= \sqrt{1+(s/h)^2}$ 。

由于地面阳光的强度和光谱成分变化都很大，因此为了对不同地点测得的不同太阳能电池的性能进行有意义的比较，就必须确定一个地面标准，然后参照这个标准进行测量（一般采用 AM1.5 的分布，即总功率密度为  $1kW/m^2$ ，即接近地球表面接收到的功率密度最大值）。太阳光的波长范围为  $10pm \sim 10km$ ，但绝大多数太阳辐射能的波长位于  $0.29 \sim 3.0\mu m$  之间，太阳能光谱分布如图 1-5 所示。

### 1.1.3 我国的太阳能资源

太阳能资源的区划通常采用三种方式。

第一级区划按年太阳辐射量分区。

第二级区划是利用各月日照时数大于 6h 的天数这一要素为指标。一年中各月

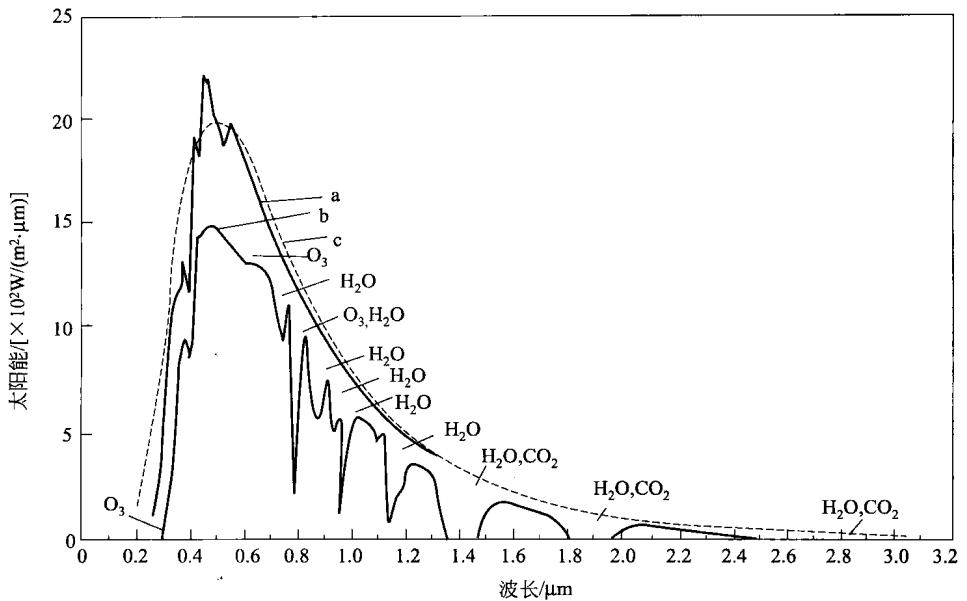


图 1-5 太阳能光谱分布

a—大气层以外 (AM0); b—在海平面上 (AM1.5); c—在 5900K 时的黑体辐射

日照时数大于 6h 的天数最大值与最小值之比, 可看做当地太阳能资源全年变幅大小的一种度量, 比值越小说明太阳能资源全年变化越稳定, 就越有利于太阳能资源的利用。此外, 最大值与最小值出现的季节也说明了当地太阳能资源分布的一种特征。

第三级区划是利用太阳能日照变化的特征值作为指标。其规定为, 以当地真太阳时 9~10 时的年平均日照时数作为上午日照情况的代表, 同样以 11~13 时代表中午, 以 14~15 时代表下午。哪一段的年平均日照时数长, 则表示该段有利于太阳能的利用。第三级区划指标说明了一天中太阳能利用的最佳或不利时段。

为了便于太阳能资源的开发与利用, 按年太阳总辐射量空间分布, 也就是第一级区划方法, 中国气象科学研究院根据 1971~2000 年太阳能资源分布实测数据将我国太阳能资源划分为四个区域, 如图 1-6 所示。

I. 太阳能资源极丰富带: 西藏大部、新疆南部以及青海、甘肃和内蒙古的西部。这些地区的年太阳辐照量超过  $6700\text{MJ}/\text{m}^2$ , 而且月际最大与最小可利用日数的比值较小, 年变化较稳定, 是太阳能资源利用条件最佳的地区。

II. 太阳能资源较丰富带: 新疆大部、青海和甘肃东部、宁夏、陕西、河北、山东东北部、山西大部、内蒙古东部、东北西南部、云南、四川西南部。该地区年太阳辐照量为  $5400\sim 6700\text{MJ}/\text{m}^2$ , 大部分地区可利用时数的年变化比较稳定。

III. 太阳能资源丰富带: 太阳能资源丰富带的年太阳辐照量为  $4200\sim 5400\text{MJ}/\text{m}^2$ , 它包括黑龙江、吉林、辽宁、安徽、江西、山西南部、内蒙古东北部、河南、

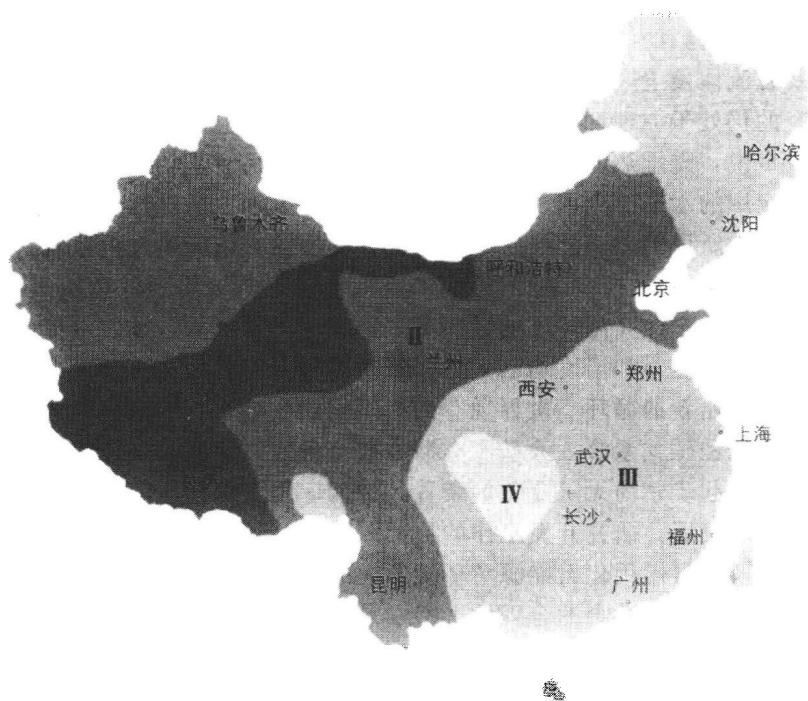


图 1-6 中国太阳能资源区划图（南海诸岛略）

（I  $\geq 6700 \text{MJ/m}^2$ ；II  $5400 \sim 6700 \text{MJ/m}^2$ ；III  $4200 \sim 5400 \text{MJ/m}^2$ ；IV  $< 4200 \text{MJ/m}^2$ ）

山东大部、江苏、浙江、湖北、湖南、福建、广东、广西、海南东部、四川和贵州大部、西藏东南部、台湾。

IV. 太阳能资源一般带：太阳能资源丰富带的年太阳辐照量小于  $4200 \text{MJ/m}^2$ ，它包括四川中部、贵州北部、湖南西北部以及重庆市。

#### 1.1.4 太阳能利用的基本形式

太阳能利用的基本方式分为三种：太阳能热利用、太阳能热发电和太阳能光伏发电。

（1）太阳能热利用 太阳能热利用的基本原理是将太阳辐射能收集起来，通过与物质的相互作用转换成热能加以利用。太阳能热利用可以根据其利用的主要形式分为：太阳能热水器、太阳灶、太阳能干燥器、太阳房、太阳能温室等太阳能热利用技术产品。

太阳能热利用技术有几大特点：①技术比较成熟、商业化程度较高；②太阳能热效率比较高，如太阳能热水器、太阳灶、太阳能干燥器，其平均热效率均能达到50%左右；③应用范围广，具有广阔的市场，如农业、畜牧业、种植业、建筑业、工业、服务业和人类日常生活领域均能推广和应用。

（2）太阳能热发电 太阳能热发电是先将太阳辐射能转换为热能，然后再按照某种发电方式将热能转换为电能的一种发电方式。

太阳能热发电技术可分为两大类型：一类是利用太阳热能直接发电，如利用半导体材料或金属材料的温差发电、真空器件中的热电子和热离子发电、碱金属的热电转换以及磁流体发电等。其特点是发电装置本体无活动部件。但它们目前的功率均很小，有的仍处于原理性试验阶段，尚未进入商业化应用。另一类是太阳能热动力发电，就是说，先把热能转换成机械能，然后再把机械能转换为电能。这种类型已达到实际应用的水平。美国、意大利、法国等国家和地区已建成具有一定规模的实用电站，通常所说的太阳能热发电即为这种类型的太阳能热发电系统。太阳能热发电是利用聚光集热器把太阳能聚集起来，将某种工质加热到数百摄氏度的高温，然后经过热交换器产生高温高压的过热蒸汽，驱动汽轮机并带动发电机发电。从汽轮机出来的蒸汽，压力和温度均已大为降低，经冷凝器凝结成液体后，被重新泵回热交换器，又开始新的循环。世界现有的太阳能热发电系统大致可分为槽式线聚焦系统、塔式系统和碟式系统 3 大基本类型。截至目前，我国太阳能热发电技术的实际应用尚未真正起步，尚无工业化的装置，也无应用实例。但随着新技术、新材料和新工艺的不断发展，研究开发工作的更加深入，并随着常规能源的涨价和资源的逐步匮乏，以及大量燃用化石能源对环境影响的日益突出，发展太阳能热发电技术将会逐渐显现出其经济社会的合理性。特别是在常规能源匮乏、交通不便而太阳能资源丰富的边远地区，当需要热电联合开发时，采用太阳能热发电技术是有利的、可行的。

(3) 太阳能光伏发电 太阳能光伏发电是利用半导体的光生伏打效应将太阳辐射能直接转换成电能，太阳能光伏发电的基本装置是太阳能电池。

太阳能电池本身无法单独构成发电系统，还必须根据不同的发电系统配备不同的辅助设备，如控制器、逆变器、储能蓄电池等。光伏发电系统可以配以蓄电池而构成可以独立工作的发电系统，也可以不带蓄电池，直接将太阳能电池发出的电力馈入电网，构成并网发电系统。独立和并网光伏发电系统的设备配置如图 1-7 和图 1-8 所示。

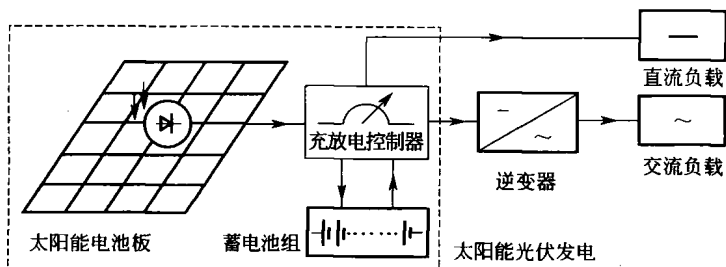


图 1-7 独立光伏发电系统的结构组成

光伏发电具有许多优点，如安全可靠、无噪声、无污染，能量随处可得，不受地域限制，无需消耗燃料，无机械转动部件，故障率低，维护简便，可以无人值守，建站周期短，规模大小随意，无需架设输电线路，可以方便地与建筑物相结合等。这些优点都是常规发电和其他发电方式所不及的。

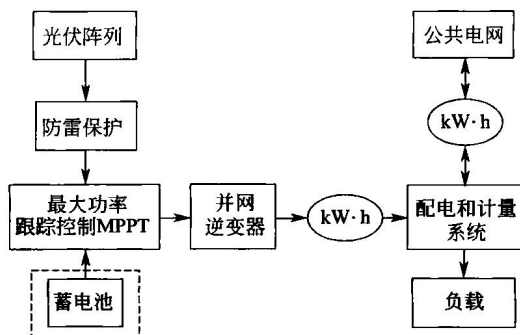


图 1-8 并网光伏发电系统示意图

## 1.2 太阳能光伏发电现状与发展前景

太阳能光伏发电最早可追溯到 1954 年由贝尔实验室所发明出来的太阳能电池，当时研发的动机只是希望能为偏远地区提供电能供给，那时太阳能电池的效率只有 6%。从 1957 年苏联发射第一颗人造卫星开始，一直到 1969 年美国宇航员登陆月球，太阳能光伏发电技术在空间领域得到了充分发挥，在其他领域也得到了越来越广泛的应用。

### 1.2.1 世界光伏发电的发展现状

世界光伏产业发展迅速，从 1996~2005 年太阳能电池/组件生产的年平均增长率达到 36.94%，2001~2005 年的年平均增长率为 43.44%，2004 年比上年增长 61.23%。光伏产业已成为当今世界发展最迅速的高新技术之一。2005 年世界光伏电池/组件产量达到 1727MW（如图 1-9 所示），其中日本生产 795MW，超过 46%；欧洲生产 503MW，占 29.13%；美国生产 150MW，占 8.69%；其他国家生产 279MW，占 16.16%。

光伏发电技术不断提高，商品化电池效率由 20 世纪 90 年代的 10%~14% 提高到现在的 14%~18%，目前国际光伏电池的实验室效率和几种商业化电池的效率见表 1-2 和表 1-4。生产自动化程度不断提高、生产规模不断扩大；20 世纪 80 年代约 1~5MW/年，90 年代约 5~30MW/年，2001~2005 年达到 50~400MW/年。2005 年前 10 名光伏电池/组件生产商占据总市场份额的 85.5%，说明规模化、集约化生产具有明显竞争优势。

并网发电在光伏市场中的份额逐年增加并占据主导地位，2007 年并网发电的市场份额达到 80%。并网发电在光伏市场中的主导地位在人类能源变革中具有重要意义，它标志着光伏发电由边远地区和特殊应用向城市过渡、由补充能源向替代能源过渡、人类社会趋向建立可持续发展的能源体系。其他各种应用，如农村离网、通信和信号、商业应用、大型电站以及消费品等都保持着稳步发展，并继续发挥光伏发电的独特优势。2010 年世界光伏系统的总装机容量超过

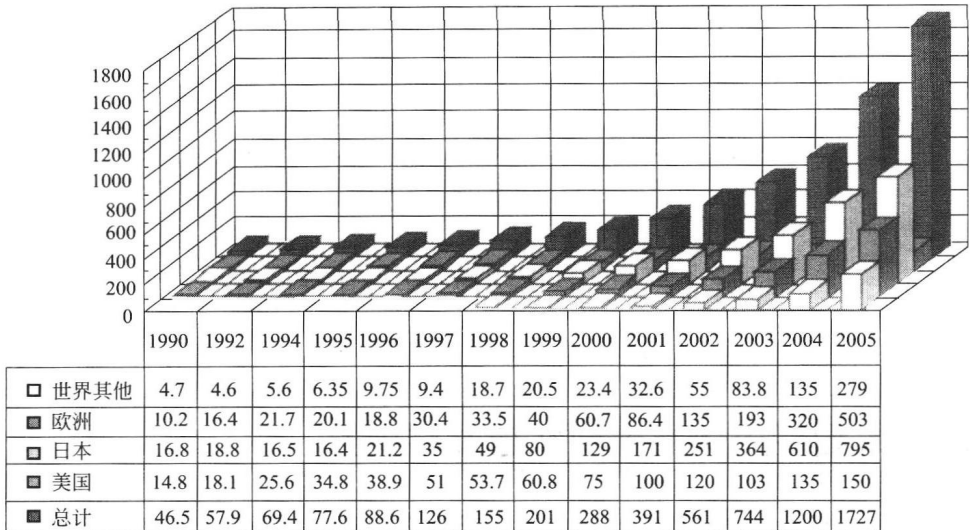


图 1-9 近年来世界太阳能电池/组件年产量发展情况 (单位: MW)

表 1-2 国际光伏电池实验室效率 (STC: AM1.5 1000W<sub>p</sub>/m<sup>2</sup>, 25°C)

电池种类	转换效率/%	研究单位	备注
单晶硅太阳能电池	24.7±0.5	澳大利亚新南威尔士大学	4cm <sup>2</sup> 面积
背接触聚光单晶硅电池	26.8±0.8	美国 SunPower 公司	96 倍聚光
GaAs 多结电池	40.7±1.7	Spectrolab	聚光电池
多晶硅太阳能电池	20.3±0.5	德国弗朗霍夫研究所(FhG-ISE)	1.002cm <sup>2</sup> 面积
InGaP/GaAs	30.28±1.2	日本能源公司	4cm <sup>2</sup> 面积
非晶硅太阳能电池	14.5(初始)±0.7 12.8(稳定)±0.7	美国 USSC 公司	0.27cm <sup>2</sup> 面积
铜铟硒电池(CIS)	19.5±0.6	美国国家可再生能源实验室	0.410cm <sup>2</sup> 面积
碲化镉电池(CdTe)	16.5±0.5	美国国家可再生能源实验室	1.032cm <sup>2</sup> 面积
多晶硅薄膜电池	16.6±0.4	德国斯图加特大学	4.017cm <sup>2</sup> 面积
纳米硅太阳能电池	10.1±0.2	日本钟渊公司	2μm 厚膜
染料敏化电池	11.0±0.5	EPFL	0.25cm <sup>2</sup> 面积
HIT	21.5	日本三洋公司	

14GW。

光伏发电成本随着光伏产业的发展不断降低,从 20 世纪 60 年代第一个地面用光伏组件售价 300 美元/W<sub>p</sub>,到 21 世纪初下降为 2.3 美元/W<sub>p</sub>,光伏组件成本 40

年来降低了 2 个数量级。2009 年世界重要厂商的成本为 2~2.3 美元/W<sub>p</sub>, 售价 2.5~3 美元/W<sub>p</sub>。随着技术进步、产业规模的不断扩大, 光伏发电的成本将继续不断降低。国外许多机构预测, 光伏发电的电价在 2020 年有可能降低到与火力发电的电价相竞争的水平。

技术进步是降低成本、促进发展的重要因素。单晶硅电池的实验室最高效率已经从 20 世纪 50 年代的 6% 提高到目前的 24.7%, 多晶硅电池的实验室最高效率也达到了 20%。薄膜电池的研究工作也获得了很大成功, 非晶硅薄膜电池、碲化镉 (CdTe)、铜铟硒 (CIS) 的实验室效率也分别达到了 13%、16.5% 和 19.5%。其他新型电池, 如多晶硅薄膜电池、染料敏化电池、有机电池等不断取得进展, 更高效率的新概念电池受到广泛重视被列入研究开发计划。与此同时, 光伏产业技术和光伏系统集成技术也在快速进步。

### 1.2.2 中国光伏发电的发展现状

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。1971 年 3 月首次应用太阳能电池作为科学试验卫星的电源, 开始了太阳能电池的空间应用。1973 年首次在灯浮标上进行应用太阳能电池供电实验, 开始了太阳能电池的地面应用。

(1) 中国光伏产业的发展现状 20 世纪 70 年代末到 80 年代中期, 我国一些半导体器件厂开始利用半导体工业废次单晶和半导体器件工艺生产单晶硅太阳能电池, 我国光伏工业进入萌发期。80 年代中后期, 我国一些企业引进成套单晶硅电池和组件生产设备以及非晶硅电池生产线, 使我国光伏电池/组件总生产能力达到 4.5MW, 我国光伏产业初步形成。90 年代初中期, 我国光伏产业处于稳定发展时期, 生产量逐年稳步增加。90 年代末我国光伏产业发展较快, 设备不断更新。近年来, 在我国“送电到乡”工程及国际市场推动下, 一批电池生产线、组件封装线、晶硅锭/硅片生产线相继投产和扩产, 使我国光伏产业的生产能力大幅度上升, 我国光伏产业进入全面快速发展时期。2007 年我国太阳能电池产量达到 821MW, 比 2006 年的 369.5MW 增长 451.5MW, 增长 1.22 倍, 占世界总产量的 21.99%, 跃居世界第二位。

与此同时, 经过几十年的努力, 我国在光伏发电技术领域的研究开发工作也取得不小的成就。多年来, 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, 取得许多可喜的研究成果。在晶体硅电池方面, 2cm×2cm 单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/非晶硅叠层薄膜电池效率达到 9.5%。目前我国光伏电池的实验室效率和几种商业化电池的效率如表 1-3 和表 1-4 所示。



表 1-3 中国光伏电池实验室效率 (STC: AM1.5 1000W<sub>p</sub>/m<sup>2</sup>, 25℃)

太阳能电池类型	最高效率/%	研究单位	面积/cm <sup>2</sup>
单晶硅电池	20.4	天津电源研究所	2×2
	18	无锡尚德公司	12.5×12.5
GaAs 电池	29.25	天津电源研究所	1×1
CIS	14.3	南开大学	0.87
CdTe	13.38	四川大学	0.502
染料敏化电池	7.4	中国科学院等离子物理所	10.2
HIT	17.27	中国科学院研究生院	1.2

表 1-4 几种商业化电池的效率对比

电池种类	中国/%	世界/%
单晶硅	14~16	15~18
多晶硅	12~14	14~16
非晶硅(稳定)	—	8(三结)
	5~6(两结)	7(两结)
	3~4(单结)	6(单结)
碲化镉(CdTe)	—	8~10
硒碲铜(CIS)	—	约 12
晶硅黑电池	—	20
晶硅聚光电池	—	26(250 倍)

在光伏发电配套设备方面,整个产业也取得了不小的进步。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配套设备。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技术方面,也取得了不少的研究结果和工作经验。

到 2007 年底,中国太阳能电池的生产能力已发展为 3000MW 以上,并且众多企业的生产规模已提升为 100~500MW/a。其中,无锡尚德晶体硅电池生产能力达 540MW;保定英利和常州天合多晶硅电池从铸锭、切片到电池制造和组件封装的生产能力分别达到 200MW 和 100MW;江苏林洋和南京中电电气晶体硅电池的生产能力分别达到 240MW 和 200MW。

(2) 中国光伏市场的发展现状 1973 年 3 月太阳能电池首次应用于我国第二颗人造卫星上,同年太阳能电池首次在天津塘沽海港浮标灯上应用,从此开始了我国太阳能电池在空间和地面应用的历史。从 20 世纪 70 年代初到 80 年代末,由于成本高,太阳能电池在地面上的应用非常有限。20 世纪 90 年代以后,随着我国光伏产业初步形成和光伏电池成本逐渐降低,应用领域开始向工业领域和农村电气化方向发展,光伏发电市场稳步扩大。光伏产业也被逐步列入国家和各地政府计划,如西藏的“阳光计划”、“光明工程”、“阿里光伏工程”以及光纤通信电源、石油管