



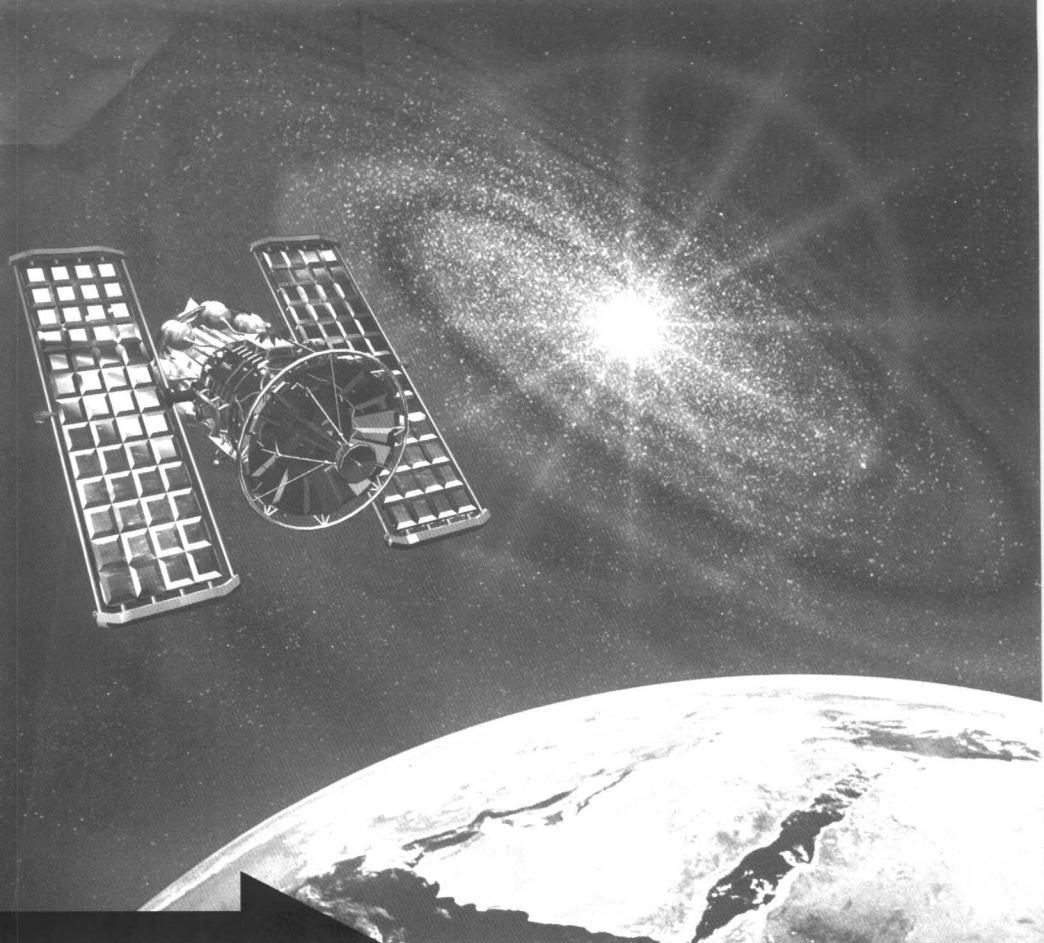
# 太阳能 光伏系统概论

■ 车孝轩 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



# 太阳能光伏系统概论

车孝轩 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏系统概论/车孝轩著. —武汉: 武汉大学出版社,  
2006. 10

ISBN 7-307-05127-3

I. 太… II. 车… III. 太阳能发电—概论 IV. TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 071727 号

责任编辑:王春阁 责任校对:黄添生 版式设计:杜 枚

---

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:武汉大学出版社印刷总厂

开本:880×1230 1/32 印张:6 字数:164千字 插页:2

版次:2006年10月第1版 2006年10月第1次印刷

ISBN 7-307-05127-3/TM·4 定价:10.00元

---

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。



车孝轩，1956年12月生，湖北人，教授，东京理科大学工学博士。上海交通大学太阳能研究所顾问教授。

主要从事太阳能等新能源发电、系统并网技术以及分布电源系统的教学和研究工作。出版《新能源发电与控制技术》、《并网型太阳能光伏发电系统》等著作，发表论文40余篇。日本电气学会会员，日本太阳能学会会员。

## 前 言

21 世纪人类的文明正面临环境污染、能源短缺等诸多问题。近年来,由于煤炭、石油等化学燃料的使用,产生了大量的二氧化碳、二氧化硫,出现了温室效应、酸雨等问题,使森林等环境受到严重破坏,直接威胁到人类自身的生存与安全。随着经济的发展、人口的增加,对能源的需求不断增加,对化学燃料的开采与使用也就越来越多,导致化学燃料短缺、环境遭受污染和破坏。因此,解决经济发展、能源需求与环境污染是摆在人类面前的迫切问题,然而利用新的、可再生能源可以解决这些问题。太阳能光伏发电的利用就是其中之一。

太阳的半径约为  $6.96 \times 10^5$  公里,它离地球约为  $1.5 \times 10^8$  公里。太阳释放巨大的能量,每秒有 40 兆 kcal 的能量传到地球。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,太阳能是一种能量巨大、无限、清洁的能源。如果直接将太阳的能量变成电能,为人类提供充足的能源,对人类来说是一件多么幸运的事。

我国于 2005 年 2 月 28 日通过的《中华人民共和国可再生能源法》,为我国可再生能源的发展提供了良好的机遇,国家计划到 2010 年使可再生能源的应用达到 1 兆吨标准煤,相当于我国总消费能源的 5%。为了实现近期目标和长远目标,国家将会大力发展可再生能源,这为太阳能光伏发电技术的发展提供了难得的机遇。

我国的太阳能光伏发电在民用、工业以及产业上的应用处于起步阶段,为了满足从事太阳能光伏发电的科技工作者、大专院校师生以及太阳能发电爱好者的需要特编写了此书。本书介绍了国内外太阳能光伏发电方面的最新技术、最新成果,内容包括太阳能、各种太阳电池、太阳电池组件、太阳能光伏系统的种类及系统电气设备、太

太阳能光伏系统的设计、应用、安装、检查与试验以及太阳能光伏系统的课题与将来的展望等,可作为大专院校的教材、科技工作者、太阳能爱好者使用的参考书。

车孝轩

2005年2月

# 目 录

<b>第 1 章 总 论</b> .....	1
1.1 能源与需求 .....	1
1.2 能源与环境 .....	2
1.3 世界能源资源的可开采年数 .....	3
1.4 太 阳 能 .....	4
1.5 太阳能利用的形式 .....	4
1.6 太阳能发电 .....	5
1.7 太阳能发电的现状 .....	5
1.8 太阳能发电的未来 .....	8
<b>第 2 章 太 阳 能</b> .....	10
2.1 太阳能资源 .....	10
2.2 太阳能量的衰减 .....	11
2.3 地表面太阳能量的分布 .....	12
2.4 直达日射、散乱日射与全天日射 .....	14
2.5 日 射 诸 量 .....	16
2.6 太阳光频谱 .....	16
2.7 各种太阳电池的分光感度特性 .....	18
2.8 日射量的分布 .....	20
2.9 太阳能的利用 .....	22
<b>第 3 章 太 阳 电 池</b> .....	23

3.1	太阳能电池的特点	23
3.2	太阳能电池的发电原理及构造	24
3.3	太阳能电池的种类	28
3.3.1	单晶硅太阳能电池	29
3.3.2	多晶硅太阳能电池	29
3.3.3	非晶硅太阳能电池	30
3.3.4	化合物太阳能电池	31
3.3.5	有机太阳能电池	32
3.3.6	薄膜太阳能电池	33
3.3.7	透明太阳能电池	35
3.3.8	混合型太阳能电池(HIT 电池)	37
3.3.9	球状太阳能电池	38
3.3.10	层积型太阳能电池	39
3.4	太阳能电池的特性	40
3.4.1	太阳能电池的输入输出特性	40
3.4.2	太阳能电池的分光感度特性	45
3.4.3	太阳能电池的照度特性	46
3.4.4	太阳能电池的温度特性	48
3.5	太阳能电池的制造方法	48
3.5.1	单晶硅太阳能电池的制造方法	48
3.5.2	多晶硅太阳能电池的制造方法	49
3.5.3	非晶硅太阳能电池的制造方法	50
3.5.4	化合物半导体太阳能电池的制造方法	51
<b>第 4 章</b>	<b>太阳能电池组件</b>	<b>52</b>
4.1	太阳能电池单元、组件	52
4.2	太阳能电池组件及其构造	53
4.2.1	背面衬底型组件	53
4.2.2	表面衬底型组件	53
4.2.3	填充型组件	54



4.2.4 衬底一体表面衬底型组件 .....	55
4.3 太阳能电池组件的种类 .....	56
4.3.1 一般的直流出力太阳能电池组件 .....	56
4.3.2 建材一体型太阳能电池组件 .....	57
4.3.3 采光型太阳能电池组件 .....	64
4.3.4 新型太阳能电池组件 .....	67
4.4 建材一体型太阳能电池组件的应用 .....	70
4.4.1 太阳能光伏系统在住宅方面的应用 .....	70
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>	<b>75</b>
5.1 太阳能光伏系统的种类及用途 .....	75
5.2 独立系统 .....	77
5.2.1 独立系统的用途 .....	77
5.2.2 独立系统的构成及种类 .....	78
5.3 并网系统 .....	80
5.3.1 有逆潮流并网系统 .....	80
5.3.2 无逆潮流并网系统 .....	81
5.3.3 切换式并网系统 .....	81
5.3.4 自立运行切换型太阳能光伏系统(防灾型) .....	82
5.3.5 直、交流并网型太阳能光伏系统 .....	83
5.3.6 地域并网型太阳能光伏系统 .....	83
5.4 混合系统 .....	86
5.4.1 光、热混合太阳能光伏系统 .....	86
5.4.2 太阳能光伏、燃料电池系统 .....	87
5.5 小规模新能源电力系统 .....	88
<b>第6章 太阳能光伏系统的基本构成 .....</b>	<b>90</b>
6.1 太阳能光伏系统的特点 .....	90
6.2 太阳能光伏系统的基本构成 .....	91

6.3 太阳能电池单元、组件及阵列 .....	92
6.3.1 太阳能电池单元 .....	92
6.3.2 太阳能电池组件 .....	92
6.3.3 太阳能电池阵列 .....	93
6.3.4 太阳能电池阵列的电路构成 .....	94
6.4 功率调节器 .....	95
6.4.1 逆变器 .....	97
6.4.2 逆变器的绝缘方式 .....	107
6.4.3 滤波器 .....	110
6.4.4 系统并网保护装置 .....	110
6.4.5 单独运行检测 .....	111
6.4.6 一种新型的太阳能发电用功率调节器 .....	115
6.4.7 功率调节器的多功能化 .....	116
6.5 其他设备 .....	117
<b>第7章 太阳能光伏系统的设计</b> .....	<b>120</b>
7.1 太阳能光伏系统设计的诸因素 .....	120
7.1.1 太阳能光伏系统设计时的调查 .....	120
7.1.2 太阳能光伏系统设置的用途、负载情况 .....	121
7.1.3 系统的类型、构成的选定 .....	121
7.1.4 设置场所、设置方式的选定 .....	122
7.1.5 太阳能电池的方位角、倾斜角的选定 .....	123
7.1.6 可设置的面积 .....	123
7.1.7 太阳能电池阵列的设计 .....	124
7.2 太阳能光伏系统的设计步骤 .....	124
7.3 太阳能光伏系统设计方法概要 .....	125
7.3.1 参数分析法 .....	126
7.3.2 计算机仿真法 .....	130
7.4 独立型太阳能光伏系统的设计 .....	133
7.4.1 使用参数分析法设计独立型太阳能光伏系统 .....	134

7.4.2 使用计算机仿真方法设计独立型太阳能光伏系统	144
7.5 住宅用太阳能光伏系统的设计	145
7.5.1 设计步骤	146
7.5.2 设计条件	147
7.5.3 太阳能电池阵列的设计	147
7.6 太阳能光伏系统成本核算	148
<b>第8章 太阳能光伏系统的应用</b>	<b>150</b>
8.1 民用太阳能光伏系统	150
8.1.1 太阳能计算器	150
8.1.2 太阳能钟表	151
8.1.3 太阳能充电器	152
8.1.4 交通指示用太阳能光伏系统	153
8.1.5 防灾、救助太阳能光伏系统	154
8.1.6 其他应用	154
8.2 住宅用太阳能光伏系统	156
8.3 大楼用太阳能光伏系统	157
8.4 集中并网型太阳能光伏系统	160
<b>第9章 太阳能光伏系统的安装</b>	<b>161</b>
9.1 太阳能电池的设置场所、安装方式概要	161
9.2 住宅用太阳能光伏系统屋顶安装方法	161
9.2.1 屋顶安装型太阳能电池阵列	162
9.2.2 紧拉固定线方式	163
9.2.3 支撑金具方式	163
9.2.4 建材一体型太阳能电池组件的安装方法	163
9.3 电气设备的安装、配线以及接地	165
9.3.1 电气设备的安装	165
9.3.2 太阳能电池组件与功率调节器之间的配线	166
9.3.3 功率调节器与分电盘之间的配线	166

9.3.4	太阳电池阵列的检查	167
9.3.5	接地施工	167
9.3.6	防雷措施	167
<b>第 10 章</b>	<b>太阳能光伏系统的检查与试验</b>	<b>169</b>
10.1	太阳能光伏系统的检查种类	169
10.2	太阳能光伏系统的检查	170
10.3	太阳能光伏系统的试验方法	171
10.3.1	绝缘电阻试验	171
10.3.2	绝缘耐压试验	172
10.3.3	接地电阻试验	173
10.3.4	太阳电池阵列的出力试验	174
10.3.5	系统并网保护装置试验	174
<b>第 11 章</b>	<b>太阳能发电的课题与未来展望</b>	<b>175</b>
11.1	太阳电池的转换效率的课题	175
11.2	降低电气设备成本的课题	176
11.3	太阳能发电的未来展望	176
11.3.1	转换效率	176
11.3.2	新型太阳电池	177
11.3.3	新型背面衬底型太阳电池组件	177
11.3.4	降低太阳电池阵列的价格	177
11.3.5	太阳电池组件的产业化	177
11.3.6	地球规模的太阳能发电系统	178
11.3.7	宇宙太阳能发电	179
<b>参考文献</b>		<b>181</b>

# 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,大量化学燃料的使用,导致能源的迅速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。人类为了生存除了要吃饭获取能源之外,还要利用诸如石油、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 1960 年到 2000 年的 40 年间,人口从 30 亿增加到了 61 亿,即人口在 40 年间增加了约一倍,能源需求在过去的 30 年间增加了一倍。而电力能源从上世纪开始,在总能源需求中的比重增加较快,从世界的平均水平来看,每 20 年约增加一倍。因此,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。

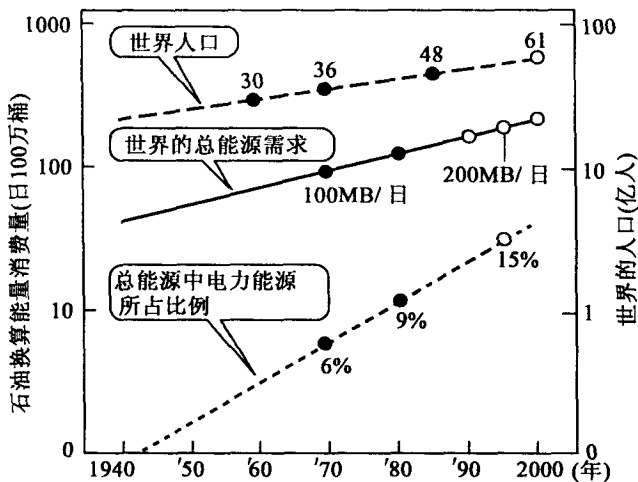


图 1.1 世界的人口、总能源需求以及电能

## 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学燃料给人类带来的问题。

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、氟里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  $1^{\circ}\text{C}$ 。二氧化碳是由于使用化学燃料而产生的。化学燃料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的需求增加。化学燃料的开采与使用,一是会出现化学燃料的短缺,二是化学燃料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学燃料的消费,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

现代社会一直以化学燃料作为能源,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。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。因此,为了维持人类的生存与发展,寻找替代能源以解决未来人类对能源的需求已成燃眉之急。

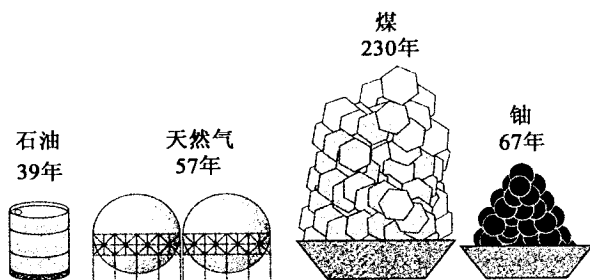


图 1.2 世界能源资源的可开采年数

## 1.4 太 阳 能

太阳能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  $3.8 \times 10^{19}$  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

利用太阳能电池发电是基于从光能到电能的半导体特有的量子效应原理。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) 可以阵列为单位选择容量;
- 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的应用,应用范围已遍及民用、住