



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

The Application of Solar Energy Detection
and Control Technology

太阳能应用检测 与控制技术

吕勇军 鞠振河 主编



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automate

The Application of Solar Energy Detection
and Control Technology

太阳能应用检测 与控制技术

吕勇军 鞠振河 主编

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

太阳能应用检测与控制技术 / 吕勇军, 鞠振河主编

— 北京: 人民邮电出版社, 2013. 8
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-31843-5

I. ①太… II. ①吕… ②鞠… III. ①太阳能发电—
检测 IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第118391号

内 容 提 要

本书对太阳能应用系统的检测与控制技术进行了系统和全面的介绍。内容包括太阳能辐射、半导体材料性能、太阳电池、铅酸蓄电池、光伏控制器、太阳能集热器及热水系统等各部分的工作原理、特性参数、技术要求以及测试方法;还介绍了光伏并网逆变器、阳光聚集与跟踪系统、最大功率跟踪等控制技术;最后通过光伏建筑一体化系统实例,介绍太阳能光伏系统的检测与控制的实际应用。

本书从工程实践需要的角度出发,将太阳能应用系统中各个环节中的检测和控制过程抽取出来,进行详尽的介绍,使读者在了解整个太阳能应用系统的同时,清楚地掌握各部件的检测和控制方法。

本书可以作为高等院校的新能源应用类专业、测控技术与仪器、电气工程及其自动化等专业的教材或教学参考书,也可供新能源应用相关领域的工程技术人员参考。

-
- ◆ 主 编 吕勇军 鞠振河
责任编辑 李海涛
责任印制 彭志环 杨林杰
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
中国铁道出版社印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17.25 2013年8月第1版
字数: 429千字 2013年8月北京第1次印刷
-

定价: 48.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

太阳能具有储量的“无限性”、存在的普遍性、开发利用的清洁性以及逐渐显露出的经济性等优势，其开发利用是最终解决常规能源特别是化石能源带来的能源短缺、环境污染和温室效应等问题的有效途径，是人类理想的替代能源。

我国是太阳能资源十分丰富的国家之一，政府也一直重视太阳能技术的研究、应用与推广，这使我国光伏产业规模迅速扩大。在“十一五”期间，中国的光伏产业规模从 438MW 增长到 3 460MW，年均复合增长率为 94%。我国政府在《可再生能源中长期发展规划》中明确了中国可再生能源未来的发展方向和目标。可以预见，我国的太阳能开发利用将有巨大的潜力和市场前景。

本书是一本综合性和专业性都较强的工科教材，它的综合性表现为它的内容涉及了太阳能应用的全过程，其内容涵盖了从太阳辐射一直到太阳能应用系统的各个环节；它的专业性体现在突出介绍了太阳能应用系统中所有涉及环节的检测原理及检测方法，同时还介绍了太阳能并网发电及最大功率跟踪等系统控制方法。

本书共分 11 章。第 1 章绪论，介绍了我国的太阳能资源及其分布情况，还概括地介绍了太阳能的采集、存储、转换等太阳能应用技术以及光伏、光热发电系统结构。第 2 章太阳能辐射及测试，主要介绍太阳辐射的基本概念、特性参数，以及辐射探测器的工作原理及分类。第 3 章半导体材料检测技术，主要介绍硅单晶导电类型和电阻率等常规电学参数的测试方法，以及硅单晶中氧和碳含量的红外吸收测定法的原理和方法。第 4 章太阳能电池及检测技术，介绍了太阳电池工作原理、等效电路和主要特性，以及太阳模拟器工作原理和检测方法，还介绍了太阳电池的测试方法。第 5 章光伏系统其他部件及检测技术，主要介绍了铅酸蓄电池的结构、特性参数、充放电控制及测试方法，光伏控制器的工作原理、分类、设计和测试方法。第 6 章 LED 及检测技术，介绍了 LED 原理、特性、测试方法及驱动方法。第 7 章太阳能集热器及检测方法，介绍平板和真空管两种常用的集热器结构、特性参数及其测试方法，太阳能热水系统的分类、原理、特点及测试方法。第 8 章太阳能并网发电及逆变控制，介绍了各种并网逆变器的拓扑结构和特点，并网逆变器的控制策略及测试方法，还介绍了孤岛效应的概念、产生原因、危害及检测方法。第 9 章光伏发电最大功率跟踪技术，介绍了常用的最大功率跟踪算法的原理、特点和误判分析方法，以及常用的最大功率跟踪系统中的变换电路结构与特点。第 10 章阳光的聚集与跟踪，介绍阳光聚集系统的作用、分类方法及系统构成，阳光跟踪系统的跟踪方式和控制方式，给出太阳跟

踪系统设计实例。第 11 章光伏建筑一体化检测与控制系统实例，以获得国家财政部财政补贴的光伏建筑一体化项目——辽宁太阳能研究应用有限公司大楼为例，介绍该系统的监测系统、控制系统以及太阳跟踪系统。

本书可作为高等院校新能源应用类专业、测控技术与仪器、电气工程及自动化等专业的教材或教学参考书，也可供新能源应用相关领域的工程技术人员参考。

本书由吕勇军和鞠振河主编，于宏涛和雷彦华参编。吕勇军编写第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 5 章、第 7 章、第 9 章，鞠振河编写第 4 章、第 6 章、第 11 章，于宏涛编写第 10 章，雷彦华编写第 8 章。全书由吕勇军统稿。

许晓峰教授在阅读了全书后，对本书提出了宝贵的修改意见。在此向许晓峰教授表示衷心的感谢。另外，在本书的编写过程中，李潇潇和侯冶做了许多工作，在此一并表示感谢。同时，还对本书参考文献的作者致以衷心的感谢。

本书内容丰富，涉及面广，由于编者水平有限，书中难免出现错误和疏漏之处，望广大读者批评指正。

编 者

2013 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.2.2 测试工艺和方法	67
1.1 太阳能资源	1	3.2.3 测准条件分析	70
1.1.1 中国太阳能资源分布及特点	1	3.3 思考与练习	71
1.1.2 中国太阳能资源带的等级划分	2	第 4 章 太阳能电池及检测技术	72
1.2 太阳能应用技术	2	4.1 太阳能电池分类	72
1.2.1 太阳能的采集	2	4.1.1 按用途分类	72
1.2.2 太阳能的转换	5	4.1.2 按电池材料分类	73
1.2.3 太阳能的存储	6	4.1.3 按电池结构分类	74
1.3 太阳能发电系统	8	4.2 太阳电池的工作原理	75
1.3.1 太阳能热发电技术	9	4.2.1 半导体的性质	75
1.3.2 太阳能光伏发电技术	15	4.2.2 半导体物理基础	75
1.4 思考与练习	19	4.2.3 半导体的内生光电效应	77
第 2 章 太阳辐射及测试	20	4.2.4 半导体的能量转换过程	77
2.1 太阳概况	20	4.3 太阳电池的基本特性	79
2.2 天球坐标	21	4.3.1 太阳电池等效电路	79
2.2.1 赤道坐标系	21	4.3.2 太阳电池主要特性	79
2.2.2 地平坐标系	23	4.4 太阳电池、组件及阵列测试	83
2.2.3 太阳角的计算	24	4.4.1 测试原理	83
2.3 太阳辐射量	25	4.4.2 太阳模拟器	84
2.3.1 大气层外的太阳辐射	26	4.4.3 太阳电池的测试	85
2.3.2 到达地表的太阳辐照度	28	4.4.4 光伏阵列的现场测试	87
2.4 太阳辐射测量方法	29	4.5 思考与练习	89
2.4.1 基本概念	29	第 5 章 光伏系统其他部件及检测技术	90
2.4.2 辐射探测器	33	5.1 光伏发电系统储能装置	90
2.5 思考与练习	44	5.1.1 铅酸蓄电池简介	90
第 3 章 半导体材料检测技术	45	5.1.2 免维护铅酸蓄电池	91
3.1 单晶硅常规电学参数的物理测试	45	5.1.3 胶体蓄电池	92
3.1.1 单晶硅导电类型的测量	45	5.1.4 镍镉电池	93
3.1.2 单晶硅电阻率的测量	49	5.1.5 镍氢电池	95
3.1.3 非平衡少数载流子寿命的 测量	56	5.1.6 锂离子电池	96
3.2 红外吸收法测定单晶硅中氧和碳 含量	63	5.1.7 超级电容	98
3.2.1 测量原理	63	5.2 铅酸蓄电池特性及测试方法	100
		5.2.1 铅酸蓄电池技术指标	100
		5.2.2 铅酸蓄电池特性	103

5.2.3 铅酸蓄电池充放电控制	104	7.6 思考与练习	158
5.2.4 铅酸蓄电池测试方法	106	第8章 太阳能并网发电及逆变控制	159
5.3 光伏控制器	110	8.1 逆变器	159
5.3.1 光伏控制器主要功能	110	8.1.1 逆变器基本工作原理及电路系统构成	160
5.3.2 光伏控制器工作原理	112	8.1.2 逆变器分类及特性	161
5.3.3 光伏控制器结构与设计	114	8.1.3 逆变器的性能要求	164
5.3.4 光伏控制器测试方法	120	8.2 光伏并网逆变器的电路拓扑	168
5.4 思考与练习	122	8.2.1 光伏并网逆变器的分类	168
第6章 LED及检测技术	123	8.2.2 隔离型光伏并网逆变器	170
6.1 概述	123	8.2.3 非隔离型光伏并网逆变器	176
6.2 原理与特性	124	8.2.4 多支路光伏并网逆变器	179
6.2.1 LED工作原理	124	8.3 光伏并网逆变器的控制策略	186
6.2.2 LED特性	125	8.4 太阳能并网发电系统的孤岛效应	187
6.3 LED的测试	129	8.4.1 孤岛效应及影响	188
6.3.1 电性能测试	129	8.4.2 孤岛效应检测标准	190
6.3.2 光色性能测试	129	8.4.3 孤岛检测方法	191
6.3.3 热阻及结温测试	132	8.5 光伏并网逆变器的测试方法及标准	199
6.4 LED驱动电路	133	8.5.1 逆变器测试环境条件	199
6.4.1 一般驱动电路	133	8.5.2 机体和结构质量检查	199
6.4.2 LED驱动电路实例	135	8.5.3 性能指标测试	200
6.5 思考与练习	140	8.5.4 保护功能试验	201
第7章 太阳能集热器及检测方法	141	8.6 思考与练习	204
7.1 平板型集热器	141	第9章 光伏发电最大功率跟踪技术	205
7.1.1 平板集热器的结构	142	9.1 概述	205
7.1.2 平板集热器热性能参数	143	9.2 最大功率跟踪算法	208
7.2 真空管集热器	145	9.2.1 开路电压法与短路电流法	208
7.2.1 真空太阳集热管结构	145	9.2.2 扰动观测法	209
7.2.2 真空管集热器性能	146	9.2.3 电导增量法	213
7.3 太阳能热水系统	146	9.2.4 三点比较跟踪法	219
7.3.1 自然循环热水系统	146	9.3 最大功率跟踪系统中的变换电路	220
7.3.2 强迫循环热水系统	148	9.3.1 降压式变换器(buck)	222
7.3.3 直流式系统	148	9.3.2 升压式变换器(Boost)	226
7.4 太阳能集热器性能测试	149	9.3.3 升-降压式变换器(Buck-Boost)	228
7.4.1 平板型集热器的测试	149	9.4 思考与练习	230
7.4.2 真空管集热器的测试	151	第10章 阳光的聚集与跟踪	231
7.5 太阳能热水系统测试方法	154	10.1 阳光聚集与跟踪的意义	231
7.5.1 测试系统	154		
7.5.2 测量要求	155		
7.5.3 试验方法	155		

10.1.1 阳光聚集的意义	231	10.4.4 试验结果及结论	247
10.1.2 阳光跟踪的意义	232	10.5 思考与练习	248
10.2 阳光聚集系统	233	第 11 章 光伏建筑一体化检测与控制	
10.2.1 聚光光伏电池及其应用中的 技术要求	233	系统实例	249
10.2.2 太阳聚光器	234	11.1 光伏建筑一体化系统介绍	249
10.2.3 反射器的组成	237	11.2 BIPV 系统检测与控制技术介绍	252
10.3 阳光跟踪系统	239	11.2.1 本地监测系统	252
10.3.1 跟踪系统的分类	240	11.2.2 5kW 并网逆变器控制系统	253
10.3.2 跟踪方法及跟踪方式的 选择	241	11.2.3 分布式微型光伏并网发电 系统	256
10.4 基于步进电机的太阳跟踪系统 设计	243	11.2.4 远程监测系统	259
10.4.1 系统结构与功能	243	11.2.5 防逆流控制系统	261
10.4.2 系统设计与实现	244	11.2.6 人工调节倾角式支架系统	262
10.4.3 软件设计	246	11.3 未来发展方向	264
		参考文献	265

太阳是万物之源，太阳能是最原始也是永恒的能量。太阳能资源丰富、取之不尽、用之不竭，它还会不会污染环境和破坏生态平衡。世界各国都在大力研究和利用太阳能应用技术，我国是太阳能资源十分丰富的国家之一，太阳能的开发利用将有巨大的潜力和市场前景。它不仅能带来良好的社会效益，而且具有明显的经济效益。

1.1 太阳能资源

1.1.1 中国太阳能资源分布及特点

1. 中国的太阳能资源分布

在中国广阔富饶的土地上，有着十分丰富的太阳能资源。全国各地太阳年辐射总量为 $3\,340\sim 8\,400\text{MJ}/\text{m}^2$ ，中值为 $5\,852\text{MJ}/\text{m}^2$ 。

从中国太阳年辐射总量的分布来看，西藏、青海、新疆、宁夏南部、甘肃、内蒙古南部、山西北部、陕西北部、辽宁、河北东南部、山东东南部、河南东南部、吉林西部、云南中部和西南部、广东东南部、福建东南部、海南岛东部和西部以及台湾省的西南部等广大地区的太阳辐射总量很大。尤其是青藏高原地区，该地区平均海拔高度在 $4\,000\text{m}$ 以上，大气层薄而清洁、透明度好、纬度低、日照时间长。例如，人们称为“日光城”的拉萨市，1961年~1970年的年平均日照时间为 $3\,005.7\text{h}$ ，相对日照为 68% ，年平均晴天为 108.5d ，阴天为 98.8d ，年平均云量为 4.8 ，年太阳总辐射量为 $8\,160\text{MJ}/\text{m}^2$ ，比全国其他省区和同纬度的地区都高。全国以四川和贵州两省及重庆市的太阳年辐射总量最小，尤其是四川盆地，该地区雨多、雾多、晴天较少。素有“雾都”之称的重庆市年平均日照时数仅为 $1\,152.2\text{h}$ ，相对日照为 26% ，年平均晴天为 24.7d ，阴天达 244.6d 。其他地区的太阳年辐射总量居中。

2. 中国太阳能资源分布的特点

中国太阳能资源分布的主要特点如下。

(1) 太阳能的高值中心和低值中心都处在北纬 $22^\circ\sim 35^\circ$ 这一带，青藏高原是高值中心，四川盆地是低值中心。

(2) 太阳年辐射总量，西部地区高于东部地区，而且除西藏和新疆两个自治区外，基本上是南部低于北部。

(3) 由于南方多数地区云多、雨多，在北纬 $30^\circ\sim 40^\circ$ 地区，太阳能的分布情况与一般的太阳

能随纬度而变化的规律相反, 太阳能不是随着纬度的升高而减少, 而是随着纬度的升高而增多。

1.1.2 中国太阳能资源带的等级划分

为了按照各地的不同条件更好地利用太阳能, 20 世纪 80 年代中国的科研人员根据各地接受太阳总辐射量的多少, 将全国划分为如下 5 类地区。

(1) 一类地区。该类地区全年日照时数为 3 200~3 300h。在每平方米面积上一年内接受的太阳辐射总量为 6 680~8 400MJ, 相当于 225~285kg 标准煤燃烧所发出的热量。该类地区主要包括宁夏北部、甘肃北部、新疆东南部、青海西部、西藏西部等。该类地区是中国太阳能资源最丰富的地区, 与印度和巴基斯坦北部的太阳能资源相当, 尤其以西藏西部的太阳能资源最为丰富, 全年日照时数达 2 900~3 400h, 年辐射总量高达 7 000~8 000MJ/m², 仅次于撒哈拉大沙漠, 居世界第 2 位。

(2) 二类地区。该类地区全年日照时数为 3 000~3 200h。在每平方米面积上一年内接受的太阳能辐射总量为 5 852~6 680MJ, 相当于 200~225kg 标准煤燃烧所发出的热量。该类地区主要包括河北西北部、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。该类地区为中国太阳能资源较丰富区, 相当于印度尼西亚的雅加达一带。

(3) 三类地区。该类地区全年日照时数为 2 200~3 000h。在每平方米面积上一年内接受的太阳辐射总量为 5 016~5 852MJ, 相当于 170~200kg 标准煤燃烧所发出的热量。该类地区主要包括山东东南部、河南东南部、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、江苏北部、安徽北部、天津、北京、台湾西南部等。该类地区为中国太阳能资源的中等类型区, 相当于美国的华盛顿地区。

(4) 四类地区。该类地区全年日照时数为 1 400~2 200h。在每平方米面积上一年内接受的太阳辐射总量为 4 190~5 016MJ, 相当于 140~170kg 标准煤燃烧所发出的热量。该类地区主要包括湖南、湖北、广西、江西、浙江、福建北部、广东北部、陕西南部、江苏南部、安徽南部以及黑龙江、台湾东北部等。该类地区是中国太阳能资源较差的地区, 相当于意大利的米兰地区。

(5) 五类地区。该类地区全年日照时数为 1 000~1 400h。在每平方米面积上一年内接受的太阳辐射总量为 3 344~4 190MJ, 相当于 115~140kg 标准煤燃烧所发出的热量。该类地区主要包括四川、贵州、重庆等地。此类地区是中国太阳能资源最少的地区, 相当于欧洲的大部分地区。

一、二、三类地区年日照时数大于 2 200h, 太阳年辐射总量高于 5 016MJ/m², 是中国太阳能资源丰富或较丰富的地区, 面积较大, 占全国总面积的 2/3 以上, 具有利用太阳能的良好条件。四、五类地区虽然太阳能资源条件较差, 但是也有一定的利用价值, 其中有的地方是有可能开发利用的。总之, 从全国来看, 中国是太阳能资源相当丰富的国家, 具有发展太阳能利用得天独厚的优越条件, 只要扎扎实实地努力工作, 太阳能利用事业在我国是有着广阔的发展前景的。

1.2 太阳能应用技术

1.2.1 太阳能的采集

太阳辐射的能流密度低, 在利用太阳能时为了获得足够的能量, 或者为了提高温度, 必

须采用一定的技术和装置,对太阳能进行采集,通常称其为集热器。集热器按是否聚光,可以划分为聚光集热器和非聚光集热器两大类。非聚光集热器能够利用太阳辐射中的直射辐射和散射辐射,集热温度较低;聚光集热器能将阳光汇聚在面积较小的吸热面上,可获得较高温度,但只能利用直射辐射,且需要跟踪太阳。

1. 平板集热器

在太阳能低温利用领域,平板集热器的技术经济性能远比聚光集热器好。为了提高效率,降低成本,或者为了满足特定的使用要求,人类开发研制了许多种平板集热器。按工质划分有空气集热器和液体集热器,目前大量使用的是液体集热器;按吸热板芯材料划分有钢板铁管、全铜、全铝、铜铝复合、不锈钢、塑料及其他非金属集热器等;按结构划分有管板式、扁盒式、管翅式、热管翅片式、蛇形管式集热器,还有带平面反射镜集热器和逆平板集热器等;按盖板划分有单层或多层玻璃、玻璃钢或高分子透明材料、透明隔热材料集热器等。为了减少集热器的热损失,可以采用中空玻璃、聚碳酸酯阳光板及透明蜂窝等作为盖板材料,但这些材料价格较高。

图 1-1 所示为平板集热器。

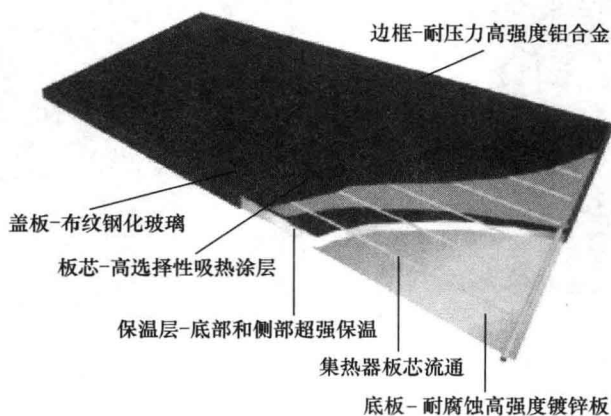


图 1-1 平板集热器

2. 真空管集热器

为了减少平板集热器的热损、提高集热温度,国际上 20 世纪 70 年代研制成功真空集热管,其吸热体被封闭在高度真空的玻璃真空管内,大大提高了热性能。将若干支真空集热管组装在一起,即构成真空管集热器,为了增加太阳光的采集量,有的在真空集热管的背部还加装了反光板。真空集热管大体可分为全玻璃真空集热管、U 形真空集热玻璃管、金属热管真空集热管、直通式真空集热管和储热式真空集热管等。我国还研制成全玻璃热管真空集热管和新型全玻璃直通式真空集热管。我国自 1978 年从美国引进全玻璃真空集热管的样管以来,经多年的努力,已经建立了拥有自主知识产权的现代化全玻璃真空集热管的产业,用于生产集热管的磁控溅射镀膜机在百台以上。典型产品为太阳能热水器,产品质量达到世界先进水平,产量雄居世界首位。我国自 20 世纪 80 年代中期开始研制热管真空集热管,经过多年的努力,攻克了热压封等许多技术难关,建立了拥有全部知识产权的热管真空管生产基地,产品质量达到世界先进水平,生产能力居世界首位。

图 1-2 所示为真空管集热器。

3. 聚光集热器

聚光集热器主要由聚光器、吸收器和跟踪系统三大部分组成。按照聚光原理区分，聚光集热器基本可分为反射聚光和折射聚光两大类，每类中按照聚光器的不同又可分为若干种。为了满足太阳能利用的要求，简化跟踪机构，提高可靠性，降低成本，在 20 世纪研制开发的聚光集热器品种很多，但推广应用的数量远比平板集热器少，商业化程度也低。在反射式聚光集热器中应用较多的是旋转抛物面镜聚光集热器（点聚焦）和槽形抛物面镜聚光集热器（线聚焦）。前者可以获得高温，但要进行二维跟踪；后者可以获得中温，只要进行一维跟踪。这两种聚光集热器在 20 世纪初就有应用，几十年来进行了许多改进，如提高反射镜面加工精度、研制高反射材料、开发高可靠性跟踪机构等，现在这两种抛物面镜聚光集热器完全能满足各种中、高温太阳能利用的要求，但由于造价高，限制了它们的广泛应用。

图 1-3 所示为聚光集热器示意图。



图 1-2 真空管集热器

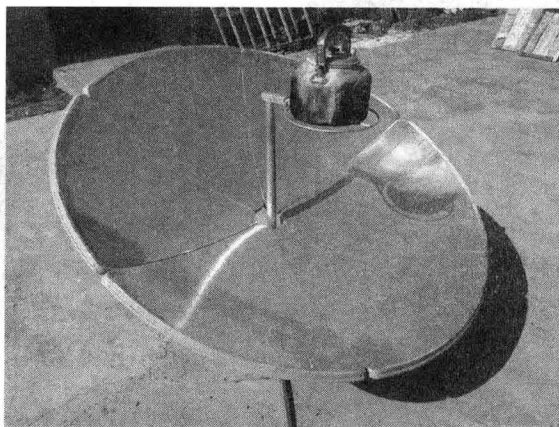


图 1-3 聚光集热器示意图

(1) 反射聚光

20 世纪 70 年代，国际上出现一种“复合抛物面镜聚光集热器”（CPC），它由两片槽形抛物面反射镜组成，不需要跟踪太阳，最多只需要随季节作稍许调整便可聚光，获得较高的温度。其聚光比一般在 10 以下，当聚光比在 3 以下时可以固定安装，不作调整。但目前，CPC 仍只是在少数示范工程中得到应用，并没有像平板集热器和真空管集热器那样大量投入使用。

其他反射式聚光器还有圆锥反射镜、球面反射镜、条形反射镜、斗式槽形反射镜、平面、抛物面镜聚光器等。还有一种应用在塔式太阳能发电站的聚光镜——定日镜。定日镜由许多平面反射镜或曲面反射镜组成，在计算机控制下这些反射镜将阳光都反射至同一吸收器上，吸收器可以达到很高的温度，获得很大的能量。

(2) 折射聚光

利用光的折射原理可以制成折射式聚光器。20 世纪 70 年代，国际上有人研制大型菲涅耳透镜，试图用于制作太阳能聚光集热器。菲涅耳透镜是平面化的聚光镜，重量轻、价格比较低，也有点聚焦和线聚焦之分，一般由有机玻璃或其他透明塑料制成，也有用玻璃制作的，主要用于聚光太阳能电池发电系统。

我国从20世纪70年代开始,对用于太阳能装置的非涅耳透镜开展了研制,有采用模压方法加工大面积的柔性透明塑料菲涅耳透镜的,也有采用组合成形刀具加工直径为1.5m的点聚焦菲涅耳透镜的。近年来,有人采用模压方法加工线性玻璃菲涅耳透镜,但精度不够。还有两种利用全反射原理设计的新型太阳能聚光器,虽然未获得实际应用,但具有一定启发性。一种是光导纤维聚光器,它由光导纤维透镜和与之相连的光导纤维组成,阳光通过光纤透镜聚焦后由光纤传至使用处。另一种是荧光聚光器,它实际上是一种添加荧光色素的透明板(一般为有机玻璃),可吸收太阳光中与荧光吸收带波长一致的部分,然后以比吸收带波长更长的发射带波长放出荧光。放出的荧光由于板和周围介质的差异,而在板内以全反射的方式导向平板的边缘面,其聚光比取决于平板面积和边缘面积之比,很容易达到10~100,这种平板对不同方向的入射光都能吸收,也能吸收散射光,不需要跟踪太阳。

1.2.2 太阳能的转换

太阳能是一种辐射能,具有即时性,必须即时转换成其他形式的能量才能储存和利用。将太阳能转换成不同形式的能量需要不同的能量转换器,集热器通过吸收面可以将太阳能转换成热能,利用光伏效应太阳电池可以将太阳能转换成电能,通过光合作用植物可以将太阳能转换成生物质能等。原则上,太阳能可以直接或间接转换成任何形式的能量,但转换次数越多,最终太阳能转换的效率便越低。

1. 太阳能—热能转换

黑色吸收面吸收太阳辐射,可以将太阳能转换成热能,其吸收性能好,但辐射热损失大,所以黑色吸收面不是理想的太阳能吸收面。选择性吸收面具有高的太阳吸收比和低的发射比,吸收太阳辐射的性能好,且辐射热损失小,是比较理想的太阳能吸收面。这种吸收面由选择性吸收材料制成,简称为选择性涂层。它是在20世纪40年代提出的,1955年达到实用要求,20世纪70年代以后研制成许多新型选择性涂层并进行批量生产和推广应用,目前已研制成功上百种选择性涂层。我国自20世纪70年代开始研制选择性涂层,取得了许多成果,并在太阳集热器上广泛使用,效果十分显著。

2. 太阳能—电能转换

电能是一种高品位能量,利用、传输和分配都比较方便。将太阳能转换为电能是大规模利用太阳能的重要技术基础,世界各国都十分重视,其转换途径很多,有光电直接转换,有光热电间接转换等。这里重点介绍光电直接转换器件——太阳电池。1941年出现有关硅太阳电池的报道,1954年研制成效率达6%的单晶硅太阳电池,1958年太阳电池应用于卫星供电。在20世纪70年代以后,对太阳电池的材料、结构和工艺进行了广泛研究,在提高效率和降低成本方面取得较大进展,其应用规模逐渐扩大,但从大规模利用太阳能而言,与常规发电相比,成本仍然很高。

2004年,世界上太阳电池的实验室效率最高水平为:单晶硅太阳电池24%(4cm²),多晶硅太阳电池18.6%(4cm²),InCaP/GaAs双结太阳电池30.28%,非晶硅太阳电池14.5%(初始)、12.8%(稳定),碲化镉太阳电池15.8%,硅带太阳电池14.6%,二氧化钛有机纳米太阳电池10.96%。

我国于1958年开始太阳电池的研究,多年来取得不少成果。2004年我国太阳电池的实验室效率最高水平为:单晶硅太阳电池20.4%(2cm×2cm),多晶硅太阳电池14.5%(2cm×2cm)、12%(10cm×10cm),GaAs太阳电池20.1%(1cm×1cm),GaAs/Ge太阳电池19.5%,

CuInSe 太阳电池 9% (1cm×1cm), 多晶硅薄膜太阳电池 13.6% (1cm×1cm, 非活性硅衬底), 非晶硅太阳电池 8.6% (10cm×10cm)、7.9% (20cm×20cm)、6.2% (30cm×30cm), 二氧化钛纳米有机太阳电池 10% (1cm×1cm)。

3. 太阳能—氢能转换

氢能是一种高品位能源。太阳能可以通过分解水或其他途径转换成氢能, 即太阳能制氢, 其主要方法如下。

(1) 太阳能电解水制氢。电解水制氢是目前应用较广且比较成熟的方法, 效率较高 (75~85%), 但耗电大, 使用常规电解水制氢, 从能量利用而言得不偿失。所以, 只有当太阳能发电的成本大幅度下降后, 才能实现大规模电解水制氢。

(2) 太阳能热分解水制氢。将水或水蒸气加热到 3 000K 以上, 水中的氢和氧便能分解。这种方法制氢效率高, 但需要高倍聚光器才能获得如此高的温度, 一般不采用这种方法制氢。

(3) 太阳能热化学循环制氢。为了降低太阳能直接热分解水制氢要求的高温, 采用一种热化学循环制氢方法, 即在水中加入一种或几种中间物, 然后加热到较低温度, 经历不同的反应阶段, 最终将水分解成氢和氧, 而中间物不消耗, 可循环使用。热化学循环分解的温度大致为 900~1 200K, 这是普通旋转抛物面镜聚光器比较容易达到的温度, 其分解水的效率在 17.5%~75.5%。存在的主要问题是中间物的还原, 即使按 99.9%~99.99%还原, 也要作 0.1%~0.01%的补充, 这将影响氢的价格, 并造成环境污染。

(4) 太阳能光化学分解水制氢。这一制氢过程与上述热化学循环制氢有相似之处, 在水中添加某种光敏物质做催化剂, 增加对阳光中长波光能的吸收, 利用光化学反应制氢。日本利用碘对光的敏感性, 设计了一套包括光化学、热电反应的综合制氢流程, 每小时可产氢 97L, 效率达 10%左右。

(5) 太阳能光电化学电池分解水制氢。利用 N 型二氧化钛半导体电极做阳极, 而以铂黑做阴极, 制成太阳能光电化学电池, 在太阳光照射下, 阴极产生氢气, 阳极产生氧气, 两电极用导线连接便有电流通过, 即光电化学电池在太阳光的照射下同时实现了分解水制氢、制氧和获得电能。但是, 光电化学电池制氢效率很低, 仅 0.4%, 只能吸收太阳光中的紫外光和近紫外光, 且电极易受腐蚀、性能不稳定, 所以很难达到实用要求。

4. 太阳能—生物质能转换

通过植物的光合作用, 太阳能把二氧化碳和水合成有机物 (生物质能) 并放出氧气。光合作用是地球上最大规模转换太阳能的过程, 现代人类所用燃料都是远古和当今光合作用转换太阳能的结果。目前, 光合作用机理尚不完全清楚, 能量转换效率一般只有百分之几, 今后对其机理的研究具有重大的理论意义和实际意义。

5. 太阳能—机械能转换

20 世纪初, 俄国物理学家通过实验证明光具有压力。20 世纪 20 年代, 前苏联物理学家提出利用在宇宙空间中巨大的太阳帆, 在阳光的压力作用下可推动宇宙飞船前进, 将太阳能直接转换成机械能。通常, 太阳能转换为机械能, 需要通过中间过程进行间接转换。

1.2.3 太阳能的存储

地面上接收到的太阳能, 受气候、昼夜、季节的影响, 具有间断性和不稳定性。因此, 太阳能储存十分必要, 尤其对于大规模利用太阳能更为必要。太阳能不能直接储存, 必须转换成其他形式的能量才能储存。大容量、长时间、经济地储存太阳能, 在技术上比较困难。

20 世纪初建造的太阳能装置几乎都不考虑太阳能储存问题，目前太阳能储存技术也未成熟，研究工作有待加强。

1. 热能储存

(1) 显热储存

物体不发生化学变化或相变化时，温度升高或降低所需要的热称为显热。利用材料的显热储能是最简单的储能方法，在实际应用中，水、沙、石子、土壤等都可作为储能材料，其中水的比热容最大，应用较多。20 世纪 70~80 年代曾有利用水和土壤进行跨季节储存太阳能的报道，但材料显热较小、储能量受到一定限制。

(2) 潜热储存

单位重量的纯物质在相变过程中温度不发生变化吸收或放出的热叫潜热。利用材料在相变时放出和吸入的潜热储能，其储能量大，且在温度不变的情况下放热。在太阳能低温储存中常用含结晶水的盐类储能，如 10 水硫酸钠、10 水氯化钙、12 水磷酸氢钠等。太阳能中温储存温度一般在 100°C 以上、 500°C 以下，通常在 300°C 左右。适宜于中温储存的材料有高压热水、有机流体、多晶盐等。太阳能高温储存温度一般在 500°C 以上，适宜于高温储存的材料有金属钠、熔融盐等。 1000°C 以上极高温储存，可以采用氧化铝和氧化锆耐火球。

(3) 化学储热

利用化学反应储热，储热量大、体积小、重量轻，化学反应产物可分离储存，需要时才发生放热反应，储存时间长。真正能用于储热的化学反应必须满足以下条件：反应可逆性好、无副反应；反应迅速；反应生成物易分离且能稳定储存；反应物和生成物无毒、无腐蚀、无可燃性；反应热大、反应物价格低等。目前已筛选出一些化学吸热反应能基本满足上述条件，如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的热分解反应，利用吸热反应储存热能，用热时则通过放热反应释放热能。但是， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在大气压下脱水反应温度高于 500°C ，利用太阳能在这一温度下实现脱水十分困难，加入催化剂可降低反应温度，但仍相当高。所以，对化学反应储存热能尚需进行深入研究，一时难以实用。其他可用于储热的化学反应还有金属氢化物的热分解反应、硫酸氢铵循环反应等。

(4) 塑晶储热

1984 年，美国在市场上推出一种塑晶家庭取暖材料。塑晶学名为新戊二醇 (NPG)，它和液晶相似，有晶体的三维周期性，但力学性质像塑料。它能在恒定温度下储热和放热，但不是依靠固-液相变储热，而是通过塑晶分子构型发生固-固相变储热。塑晶在恒温 44°C 时，白天吸收太阳能而储存热能，晚上则放出白天储存的热能。美国对塑晶的储热性能进行了广泛的研究，将塑晶融化到玻璃和有机纤维墙板中可用于储热，将调整配比后的塑晶加入玻璃和纤维制成的墙板中，能制冷降温。

(5) 太阳池储热

太阳池是一种具有一定盐浓度梯度的盐水池，可用于采集和存储太阳能。由于它简单、造价低和宜于大规模使用，引起人们的重视。20 世纪 60 年代以后，许多国家对太阳池开展了研究，以色列还建成 3 座太阳池发电站。20 世纪 70 年代以后，我国对太阳池也开展了研究，初步得到一些应用。

2. 电能储存

电能的储存比热能的储存困难，常用的是蓄电池，正在研究开发的还有超导储能。铅酸

蓄电池的发明已有 100 多年的历史，它是利用化学能和电能的可逆转换，实现充电和放电。铅酸蓄电池价格较低，但使用寿命短、体积大、重量重、需要经常维护。近年开发成功少维护、免维护铅酸蓄电池，使其性能有一定提高。目前，与光伏发电系统配套的储能装置，大部分为铅酸蓄电池。1908 年发明的镍—铜、镍—铁碱性蓄电池，其使用和维护方便、寿命长、重量轻，但价格较贵，一般在储能量小的情况下使用。现有的蓄电池储能密度较低，难以满足大容量、长时间储存电能的要求。新近开发的蓄电池有银锌电池、钾电池、钠硫电池等。某些金属或合金在极低温度下成为超导体，理论上电能可以在一个超导无电阻的线圈内储存无限长的时间。这种超导储能不经过任何其他能量转换直接储存电能，效率高、启动迅速、可以安装在任何地点，尤其是消费中心附近，不产生任何污染，但目前超导储能在技术上尚不成熟。

3. 氢能储存

氢可以大量、长时间储存。它能以气相、液相、固相（氢化物）或化合物（如氨、甲醇等）形式储存。

(1) 气相储存：储氢量少时，可以采用常压湿式气柜、高压容器储存；大量储存时，可以储存在地下储仓、不漏水土层覆盖的含水层、盐穴和人工洞穴内。

(2) 液相储存：液氢具有较高的单位体积储氢量，但蒸发损失大。将氢气转化为液氢需要进行氢的纯化和压缩，正氢—仲氢转化，最后进行液化。液氢生产过程复杂、成本高，目前主要用于火箭发动机燃料。

(3) 固相储存：利用金属氢化物固相储氢，储氢密度高，安全性好。目前，基本能满足固相储氢要求的材料主要是稀土系合金和钛系合金。金属氢化物储氢技术研究已有 30 余年历史，取得了不少成果，但仍有许多课题有待研究解决。我国对金属氢化物储氢技术进行了多年研究，取得一些成果，目前研究开发工作正在深入。

4. 机械能储存

太阳能转换为电能，推动电动水泵将低位水抽至高位，便能以位能的形式储存太阳能。太阳能转换为热能，推动热机压缩空气，也能储存太阳能。此外，在机械能储存中最受人关注的是飞轮储能。早在 20 世纪 50 年代有人提出利用高速旋转的飞轮储能设想，但一直没有突破性进展。近年来，由于高强度碳纤维和玻璃纤维的出现，用其制造的飞轮转速大大提高，增加了单位质量的动能储量。电磁悬浮、超导磁浮技术的发展，结合真空技术，极大地降低了摩擦阻力和风力损耗。电力电子的新进展，使飞轮电机与系统的能量交换更加灵活。所以，近来飞轮技术已成为国际上的研究热点，美国已研制成储能 $20\text{kW}\cdot\text{h}$ 的飞轮，正在研制 $5\sim 100\text{MW}\cdot\text{h}$ 的超导飞轮。我国已研制成储能 $0.3\text{kW}\cdot\text{h}$ 的小型实验飞轮。在太阳能光伏发电系统中，飞轮可以代替蓄电池用于蓄电。

1.3 太阳能发电系统

太阳能发电是太阳能利用的一个最重要的方面，目前太阳能发电主要有两种方法。一种叫太阳能热发电，它是利用集热器将太阳能辐射能转换成热能，然后通过热力循环过程进行发电；另一种叫太阳能光伏发电，它是通过光电器件利用光生伏打原理将太阳能直接转换成电能。

1.3.1 太阳能热发电技术

1. 太阳能热发电系统组成

太阳能热发电系统由集热子系统、热传输子系统、蓄热与热交换子系统和发电子系统组成，如图 1-4 所示。

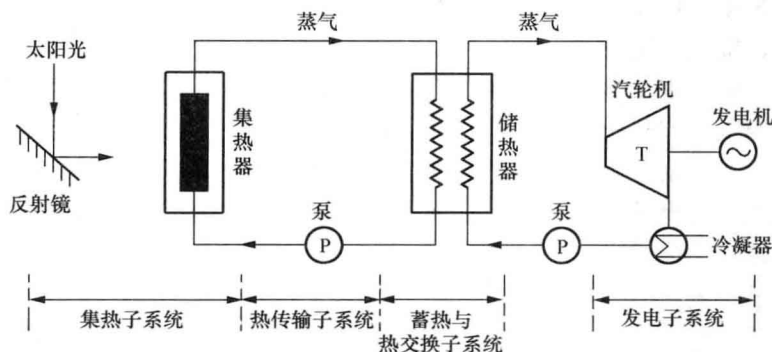


图 1-4 太阳能热发电系统组成

(1) 集热子系统

集热子系统是吸收太阳辐射能并将其转换为热能的装置。该系统主要包括聚光装置、接收器和跟踪机构等部件。不同功率和规模的太阳能发电系统有不同结构形式的集热子系统。100℃以下的小功率装置多采用平板式集热器。有的装置为增加单位面积上的受光量，还外加反射镜。由于工作温度低，因此集热子系统的效率一般在 5% 以下。对于在高温条件下工作的太阳能热发电系统来说，必须采用聚光集热装置来提高集热温度，从而提高系统效率。

聚光集热器主要有以下几种类型。

- ① 复合抛物面反射镜聚焦集热器。这种集热器需季节性调整其倾角。
- ② 线聚焦集热器。这种集热器常采用单轴跟踪的抛物柱面反射镜聚光。
- ③ 固定的多条槽型反射镜聚焦集热装置和固定的半球面反射镜线聚焦集热装置。这两种集热装置的吸热管都需跟踪活动。
- ④ 点聚焦方式。它提供了最大可能的聚光度，并且成像清晰，但需配备全跟踪机构。
- ⑤ 菲涅尔透镜。该透镜常用硬质或软质透明塑料模压而成，可做成成长的线聚焦装置或圆的点聚焦装置，要相应配置单轴跟踪机构或全跟踪机构。
- ⑥ 塔式聚光集热装置。该装置是大功率集中式太阳能热发电系统的聚光集热器的结构方式。

构成聚光装置反射面的主要材料是反射镜面，如把铝或银蒸镀在玻璃上，或蒸镀在聚四氟乙烯及聚酯树脂等膜片上。对于玻璃反射镜，可蒸镀在镜子的正面或反面。镀在镜子正面时，反射率高，光透过玻璃时没有损失，但不易保护，寿命较短；镀在镜子反面时，尽管由于阳光透过玻璃会引起一些损失，但镀层易保护，使用寿命较长。因而目前应用后者较多。

接收器的主要构成部件是吸收体。其形状有平面状、点状、线状，也有空腔结构。在吸收体表面往往覆盖有选择性吸收面，如经过化学处理的金属表面、由铝—铝—铝等多层薄膜