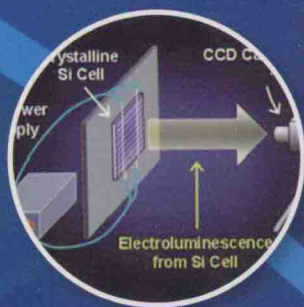




普通高等教育“十二五”规划教材

太阳能光伏组件技术

薛春荣 钱斌 江学范 周承柏 编著



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

太阳能光伏组件技术

薛春荣 钱 斌 江学范 周承柏 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以太阳能光伏组件的设计封装为主要内容,在简要介绍太阳能电池基本原理和技术的基础上,全面、深入地介绍了光伏发电系统的核心——太阳能光伏组件的设计、封装、检测和应用等各个方面。

本书围绕“如何设计并制备高效太阳能光伏组件”这个主题展开,在体系安排上遵循从基本原理到组件设计再到应用的步骤,内容由浅入深,由理论到应用。

本书内容丰富,图文并茂,深入浅出,可作为高等院校新能源相关专业本科、专科的教材或者参考用书,也可作为太阳能光电企业及相关领域工程技术人员的培训及参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏组件技术/薛春荣等编著. —北京:科学出版社,2014.1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-03-120667-9

I. ①太… II. ①薛… III. ①太阳能电池-研究 IV. ①TM914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第015291号

责任编辑:李岚峰 / 责任校对:刘小梅

责任印制:闫磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年1月第一版 开本:720×1000 B5

2014年1月第一次印刷 印张:11

字数:228 000

定价:28.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

能源技术的革新带动人类社会日益进步，并对社会发展起着巨大的推动作用。至今所采用的“化石燃料”能源，在带给人类文明与进步的同时，却因能源消耗的大幅提高以及随之而来的环境污染，给人类生存环境造成灾害。“改善能源结构，保护地球”成为全球的呼声，被世界各国所关注。在全球环境污染和能源危机日益严重的今天，研究太阳能利用对缓解能源危机、保护生态环境和促进经济的可持续发展具有重要意义。在太阳能利用中，最具优势的是太阳能光伏发电。太阳能光伏组件几乎可以在世界各地使用，能满足持续发电的要求。从能量转换技术上说，太阳能光伏发电只需一步就简捷地实现了光-电转换，避免了传统方式的热动力或机械传递的步骤。

本书旨在全面、深入地介绍光伏发电系统的核心——太阳能光伏组件的发电原理、设计、封装、检测和应用等各个方面；同时尽可能地反映目前生产和科研的最先进水平和技术，力求成为既有较深理论基础又有实用价值和实际指导意义的教科书。

本书共分 10 章，从内容上分为以下 3 个部分：

- 太阳能光伏组件基础理论与设计（第 1~4 章）；
- 太阳能光伏组件封装技术（第 5~7 章）；
- 太阳能光伏组件的检测、故障分析与应用（第 8~10 章）。

第 1 部分是教学的重点，侧重于基本概念、基础理论与设计，以课堂讲授为主，注重启发式教学，旨在培养学生学习的主动性和创造性。在具体实施过程中，利用问题法教学，通过提出和解决一个个亟待解决的问题达到掌握知识的目的。

第 2 部分侧重技术技能的培养，注重实践性和应用性，实施过程中注重和企业接轨，通过一定数量的实验达到掌握技术技能的目的。

第 3 部分是综合应用，侧重综合分析与设计。实施过程中运用工程法教学，通过工程设计，引导学生把所学知识融会贯通，设计完成一个工程发电项目或者一个小的光伏光电产品，提高学生对知识的综合运用能力和实践创新能力。

本书编写过程中得到常熟阿特斯阳光电力科技有限公司的大力协助，在此表示深深的感谢。

本书部分内容材料来自互联网，其原作者无法一一查证和联系，对此深表歉意和感谢！

由于作者水平有限，书中不妥之处难免，恳请广大读者予以指正。

作者

2013年12月

目 录

前言

第 1 章 太阳能利用	1
1.1 社会发展需要新能源	1
1.2 太阳能特性及应用	3
1.2.1 太阳能利用的优缺点	3
1.2.2 太阳能利用技术	4
1.3 太阳辐射相关的物理量	6
1.3.1 太阳辐射强度	7
1.3.2 太阳常数	7
1.3.3 大气质量	8
1.3.4 太阳辐射的光谱特性	8
1.4 太阳能电池、光伏组件和发电系统	9
思考题	11
第 2 章 太阳能电池材料及其分类	12
2.1 太阳能电池材料与分类	12
2.1.1 太阳能电池材料	12
2.1.2 太阳能电池分类	12
2.2 晶硅太阳能电池及前沿技术	15
2.2.1 晶硅太阳能电池的制备及特点	15
2.2.2 晶硅太阳能电池的发展趋势	16
2.2.3 晶硅太阳能电池转换效率的损失机理	18
2.2.4 提高晶硅太阳能电池转换效率的方法	18
2.3 硅基薄膜太阳能电池	20
2.3.1 硅基薄膜太阳能电池特点	20
2.3.2 多晶硅薄膜太阳能电池 (poly-si)	20
2.3.3 非晶硅薄膜太阳能电池 (a-Si)	21
2.4 化合物薄膜太阳能电池	23
2.4.1 II-VI 族化合物太阳能电池	23
2.4.2 铜铟镓硒 (CIGS) 薄膜太阳能电池	24
2.4.3 III-V 族化合物太阳能电池	25
2.5 有机太阳能电池	28

2.5.1	有机太阳能电池的分类	28
2.5.2	染料敏化太阳能电池	29
2.6	高效太阳能电池探索	30
2.6.1	高效太阳能电池的研究方向	31
2.6.2	聚光太阳能电池	31
2.6.3	多结太阳能电池	32
2.6.4	热载流子太阳能电池	32
2.6.5	碰撞离化太阳能电池	33
2.6.6	杂质带和中间带太阳能电池	33
2.6.7	上下转换太阳能电池	33
2.6.8	量子点太阳能电池	34
2.6.9	下一代太阳能电池	34
	思考题	35
第3章	晶硅太阳能电池原理与设计	36
3.1	晶硅太阳能电池原理	36
3.1.1	半导体材料对光的吸收	36
3.1.2	P-N结	37
3.1.3	太阳能电池的工作原理	38
3.2	晶硅太阳能电池特性	39
3.2.1	太阳能电池的I-V特性	39
3.2.2	太阳能电池的输出特性	42
3.2.3	太阳能电池的光谱特性	43
3.2.4	太阳能电池的照度特性	44
3.2.5	太阳能电池的温度效应	44
3.2.6	太阳能电池的辐照效应	45
3.3	晶硅太阳能电池的设计	46
3.3.1	基础太阳能电池设计	46
3.3.2	光学设计	46
3.4	影响太阳能电池转换效率的主要因素	51
3.5	小结	54
	思考题	55
第4章	太阳能光伏组件设计	56
4.1	太阳能光伏组件概述	56
4.2	太阳能光伏组件设计	56
4.2.1	太阳能电池的连接与失配	56
4.2.2	太阳能光伏组件设计	58

4.2.3	太阳能光伏组件的串联和并联	60
4.2.4	太阳能光伏组件的热岛效应	61
4.2.5	制约太阳能光伏组件输出功率的因素	61
4.3	太阳能光伏阵列	62
4.3.1	光伏阵列的基本构成	62
4.3.2	光伏阵列设计	63
4.3.3	光伏阵列安装角度设计	66
4.4	小结	68
	思考题	68
第5章	太阳能光伏组件封装工艺	70
5.1	太阳能光伏组件封装概述	70
5.2	太阳能电池片的分选与划片	72
5.2.1	太阳能电池的外观检测	72
5.2.2	太阳能电池的电性能测试	74
5.2.3	激光划片	74
5.3	太阳能电池片的焊接	74
5.3.1	焊带裁剪与处理	75
5.3.2	单片焊接	76
5.3.3	串联焊接	77
5.4	叠层与层压	78
5.4.1	EVA、TPT 裁剪	79
5.4.2	叠层工艺	79
5.4.3	中道检验	82
5.4.4	层压固化	82
5.5	装框与清洗	83
5.5.1	太阳能光伏组件装框	83
5.5.2	安装接线盒	83
5.5.3	太阳能光伏组件清洗	84
5.6	终检与包装	84
5.6.1	终检	84
5.6.2	包装	85
5.6.3	打托	85
	思考题	85
第6章	太阳能光伏组件封装原材料	86
6.1	太阳能晶硅电池片	86
6.1.1	晶硅太阳能电池片的分类	86

6.1.2	晶硅太阳能电池片的检验	88
6.2	前表面材料	92
6.2.1	光伏玻璃	93
6.2.2	超白玻璃	93
6.2.3	增透自洁光伏玻璃	93
6.2.4	光伏玻璃检验	94
6.3	EVA 胶膜	95
6.3.1	EVA 胶膜的特性	95
6.3.2	EVA 胶膜的检验	97
6.4	背板材料	97
6.4.1	TPT 背板	98
6.4.2	含氟背板	98
6.4.3	氟碳涂料	99
6.4.4	背板性能测试	99
6.5	边框材料	100
6.5.1	铝合金边框	100
6.5.2	不锈钢边框	102
6.5.3	塑料边框	102
6.6	其他材料	103
6.6.1	助焊剂	103
6.6.2	焊带	103
6.6.3	有机硅胶	104
6.6.4	接线盒	104
6.6.5	二极管	106
	思考题	106
第 7 章	太阳能光伏组件封装设备	108
7.1	光伏设备简介	108
7.2	太阳能电池单片分选仪	110
7.3	太阳能光伏组件测试仪	112
7.4	激光划片机	113
7.5	焊接设备	114
7.5.1	电烙铁	114
7.5.2	焊接机	115
7.6	太阳能光伏组件层压机	116
7.7	光伏组框装框机	119
7.8	玻璃清洗机	119

思考题.....	120
第 8 章 太阳能光伏组件测试	121
8.1 太阳能光伏组件电性能测试	121
8.2 太阳能光伏组件耐压绝缘测试	123
8.3 太阳能光伏组件 EL 测试	124
8.4 太阳能光伏组件机械载荷测试	128
8.5 太阳能光伏组件湿热湿冷实验	128
8.6 太阳能光伏组件冰雹实验	128
8.7 太阳能光伏组件紫外老化实验	128
思考题.....	129
第 9 章 太阳能光伏组件故障分析	130
9.1 太阳能光伏组件常见问题	130
9.1.1 太阳能光伏组件生产中常见问题分析	133
9.1.2 图解太阳能光伏组件产品质量问题	134
9.2 太阳能光伏组件中的热产生	145
9.3 太阳能光伏组件的衰减和失效	146
9.3.1 太阳能光伏组件的衰减	146
9.3.2 太阳能光伏组件的失效模式	147
思考题.....	149
第 10 章 太阳能光伏组件应用	150
10.1 太阳能光伏组件的应用领域.....	150
10.2 发电系统分类.....	151
10.3 光伏建筑.....	154
10.3.1 光伏建筑分类	154
10.3.2 光伏建筑的实现形式	156
10.4 太阳能汽车.....	160
10.4.1 太阳能汽车的优越性	160
10.4.2 太阳能汽车的构造	161
思考题.....	163
参考文献	164

第 1 章 太阳能利用

1.1 社会发展需要新能源

从“蒸汽机”到“电动机”的一系列动力技术表明，能源技术的革新带动人类社会日益进步，是社会发展的动力。如今的“化石燃料”能源，带给人类文明与进步的同时，却因环境污染，给人类生存环境造成灾害。“改善能源结构，保护地球”成为全球的呼声。同时，石油、煤炭价格暴涨，地球上的常规能源在逐渐稀少。那么未来人类将靠什么生存？作为主动力的电从哪里来？唯一的出路就是尽早开发新能源！

新能源是相对于常规能源来说的，作为后起之秀的新能源必须具备以下要素：第一，能源的源头是巨大的、无限制的；第二，要有明显的安全保障性和技术可行性；第三，作为新型能源必须是“绿色”的，以减少由于燃烧煤、石油等常规能源对环境造成的严重污染和温室效应。

新能源包含太阳能、生物质能、海洋能、水能、风能、氢能、地热能、潮汐能等，由于煤、油、气等常规能源具有污染环境 and 不可再生的缺点，人类越来越重视新能源的开发和利用。

生物质能是指由光合作用而产生的各种有机体，是太阳能以化学能形式储存在生物中的一种能量形式。它直接或间接地来源于植物的光合作用，可转化成常规的固态、液态和气态燃料。

海洋能指依附在海水中的可再生能源，海洋通过各种物理过程接收、储存和散发能量，这些能量以潮汐、波浪、温度差、盐度梯度、海流等形式存在于海洋之中。包括潮汐能、波浪能、海流能、海水温差能、海水盐度差能等。这些能源都具有可再生性和不污染环境等优点，是一项亟待开发利用的具有战略意义的新能源。

水能资源是一种清洁无污染且能循环利用的可再生资源，指水体的动能、势能和压力能等能量资源。广义的水能资源包括河流水能、潮汐水能、波浪能、海流能等能量资源。

风是由太阳辐射热引起的，由于地球表面各处受热不同，产生温差，引起大气的对流运动而形成风。全球的风能约为 2.74×10^9 MW，其中可利用的风能为 2×10^7 MW，比地球上可开发利用的水能总量大 10 倍。

氢是宇宙中最常见的元素，宇宙质量的 75% 是氢。氢是能源载体和燃料，是一种极为优越的新能源，其燃烧热值很高，每千克氢燃烧后的热量约为汽油的 3 倍、酒精的 3.9 倍、焦炭的 4.5 倍。其燃烧的产物是水，不产生任何污染，称得上

是地球上最干净的能源。氢资源丰富，氢气可由水制取，而水是地球上最丰富的资源。氢能演绎了自然物质循环利用、持续发展的经典过程。

地热能是来自地球深处的热能，起源于地球的熔融岩浆和放射性物质的衰变。其储量比目前人们所利用的总能量多很多倍，而且集中分布在火山和地震多发区的构造板块边缘一带。如果地球深处的热量提取的速度不超过补充的速度，地热能便是可再生的。地热能在世界上很多地区应用相当广泛。但它的分布比较分散，开发难度大。

如图 1-1 (a) 所示是潮汐能的应用，图 1-1 (b) 所示是地热能的利用。

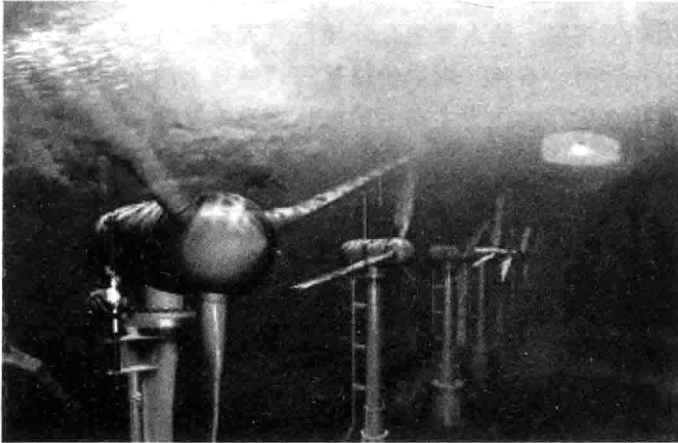


图 1-1 (a) 海底潮汐能发电机

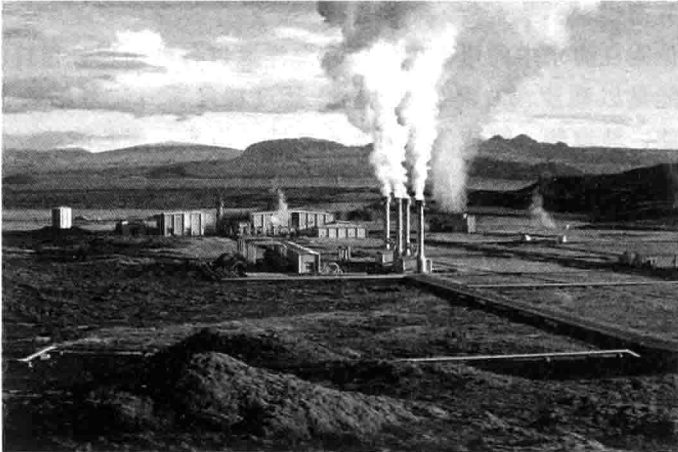


图 1-1 (b) 地热发电站

1.2 太阳能特性及应用

在诸多新型能源中，太阳能是一种取之不尽、用之不竭的清洁能源，在全球环境污染和能源危机日益严重的今天，研究太阳能利用对缓解能源危机、保护生态环境和促进经济的可持续发展具有重要意义。

1.2.1 太阳能利用的优缺点

太阳能具有储量无限的特点，是目前全球主要能源探明储量的 10000 倍，相对于常规能源，太阳能储量丰富。太阳能与煤炭、石油、天然气、核能等矿物燃料相比，具有以下明显的优点：

(1) 普遍：太阳光普照大地，无论陆地或海洋，高山或岛屿，处处皆有，可直接开发和利用，无需开采和运输。

(2) 无害：它是最清洁的能源之一，在环境污染越来越严重的今天，这一点是极其重要的。

(3) 巨大：每年到达地球表面的太阳辐射能约相当于 130 万亿吨标煤，是如今地球上可以开发的最大能源。

(4) 长久：根据目前太阳产生的核能速率估算，氢的储量可以维持上百亿年，而地球的使用寿命约为几十亿年，从这个意义上讲，太阳的能量是用之不竭的。

太阳能对于地球上绝大多数地区具有存在的普遍性，可就地取用，这为常规能源缺乏的国家和地区解决能源问题提供了绝佳的方案。从利用的经济性看，在目前的技术发展水平下，太阳能利用技术与现有电力的技术兼容，同时呈现高的安全保障性。因此太阳能必将在全球能源结构转换中担当重任，成为理想的替代能源。太阳能发电已成为世界新能源研究的热点。

太阳能资源虽然具有上述几方面常规能源无法比拟的优点，但其作为能源利用也有以下缺点：

(1) 分散性：尽管到达地球表面的太阳辐射的总量很大，但是能流密度很低。在利用太阳能时，想要得到一定的转换功率，往往需要面积相当大的一套收集和转换设备，造价较高。

(2) 不稳定性：由于受到昼夜、季节、地理纬度和海拔高度等自然条件的限制，以及晴、阴、云、雨等随机因素的影响，到达某一地区的太阳辐射度是间断的、极不稳定的，这给太阳能的大规模应用增加了难度。为了使太阳能成为连续、稳定的能源，必须很好地解决蓄能问题。目前，蓄能也是太阳能利用中较为薄弱的环节之一。

(3) 效率低和成本高：虽然目前太阳能利用涉及的很多方面在理论上是可行的，技术上也是成熟的，但因为效率偏低，成本较高，经济性还不能与常规能源相竞争。

在今后相当长的一段时期内，太阳能利用的进一步发展将主要受到经济性的制约。

1.2.2 太阳能利用技术

根据太阳能利用的实际特点，太阳能利用涉及的共性技术主要有 4 项，即太阳能采集、太阳能转换、太阳能储存和太阳能传输。

(1) 太阳能采集。因为太阳辐射的能流密度低，必须采用一定的技术和装置如集热器，对太阳能进行采集。集热器按是否聚光，可分为聚光集热器和非聚光集热器两大类。非聚光集热器如平板集热器、真空管集热器，它能利用太阳辐射中的直射辐射和散射辐射，但集热温度较低；聚光集热器能将阳光汇聚在面积较小的吸热面上，获得较高温度，但它只能利用直射辐射，且需要跟踪太阳。如图 1-2 所示为平板太阳能集热器。

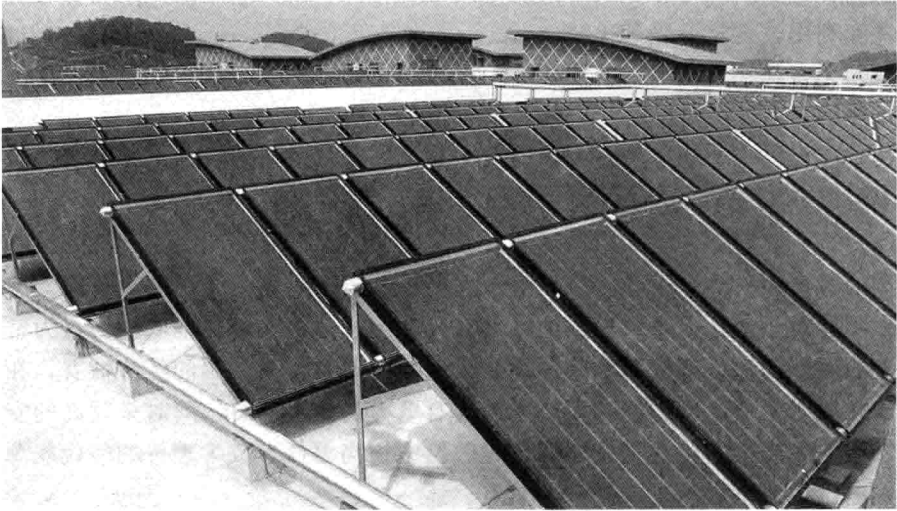


图 1-2 平板太阳能集热器

(2) 太阳能转换。因为太阳能具有即时性，因此只有转换成其他形式的能量才能更好地利用和储存。按能量转换的方式，太阳能利用主要有光热转换、光电转换和光化学转换三个领域，并且需要不同的能量转换器。光热转换即太阳能的热利用，是将太阳的辐射能转换为热能，实现这个目的的器件叫“集热器”。集热器通过吸收面将太阳能转换为热能，如太阳能热水器、太阳灶、太阳房、海水蒸馏器、太阳能热发电等，如图 1-3 (a) 所示。太阳能热利用的领域主要有太阳能空调降温、太阳能热发电、太阳房、太阳能灶等。

光电转换即利用太阳能电池的光伏效应将太阳能转换成电能，如太阳能光伏发电系统，如图 1-3 (b) 所示。在太阳能利用中，最具优势的即太阳能光伏发电。相比于光热发电受限于地理位置、需要较高的直接辐射，平板式（标准）太阳能光

伏组件几乎可以在世界各地使用，因为它在漫辐射和直接辐射下的光电转换效率几乎相同。另外，光伏技术在工作的过程中没有有害物质的排放或者物质变化（产生污染物），也不会产生任何噪声或其他副产品，能满足可持续发电的要求。同时，光伏发电仅一步就实现了能量转换，避免了传统方式的热动力或机械传递步骤。综上所述，各国选择大力发展光伏发电的原因可归纳为：（1）无枯竭危险；（2）安全可靠，无噪声，无污染排放，绝对干净（无公害）；（3）不受资源分布地域的限制，可利用建筑屋面的优势；（4）无需消耗燃料和架设输电线路即可就地发电供电；（5）能源质量高；（6）建设周期短，获取能源花费的时间短。

光化学转换有植物通过光合作用将太阳能转换成生物质能；太阳能光解水制氢等，如图 1-3（c）所示。



图 1-3（a）光热光伏系统

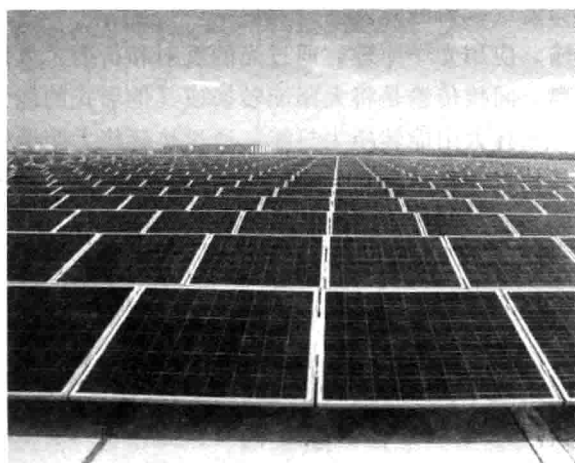


图 1-3（b）光伏发电系统

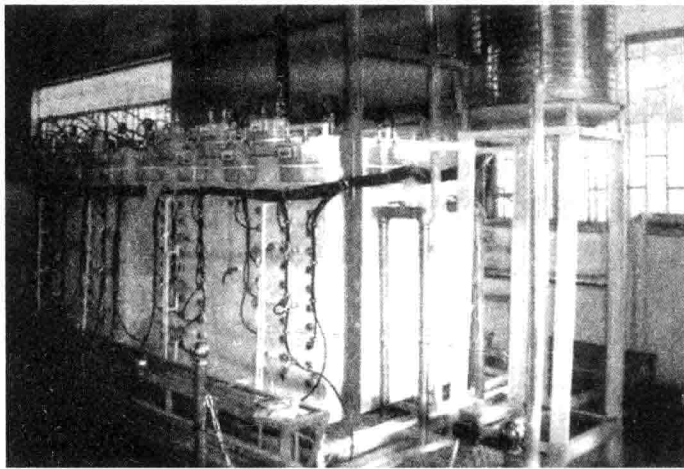


图 1-3 (c) 太阳能光合细菌连续制氢试验系统

(3) 太阳能储存。因为地面接收到的太阳能具有间断性和不稳定性，有必要储存。大容量、长时间、经济地储存太阳能，在技术上比较困难，目前太阳能转换成电能储存常用的是蓄电池，正在研究开发的是超导储能。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，它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，重量大，需要经常维护。近来开发成功了少维护、免维护的铅酸蓄电池，性能有一定提高。镍-铜、镍-铁碱性蓄电池使用维护方便，寿命长，重量轻，但价格较贵，一般在储能量小的情况下使用。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就可直接储存电能，效率高，启动迅速。但目前超导储能在技术上尚需继续研究开发。

(4) 太阳能运输。应用光学原理，通过光的反射和折射，太阳能可进行直接传输，适用于较短距离。间接传输是将太阳能转换成其他形式的能量进行传输，适用于不同距离和形式，如将太阳能转换为热能，通过热管将太阳能传输到室内；将太阳能转换为氢能或其他载能化学材料，通过车辆或管道输送到用能地点；空间电站将太阳能转换为电能，通过微波或激光将电能传输到地面等。

1.3 太阳辐射相关的物理量

太阳的光照强度在地球表面有空间和时间的变化。空间变化包括纬度变化：光照强度在赤道最大，随着纬度的增加，太阳高度变低，光照强度相应减弱；海拔变化：光照强度随着海拔高度的升高而增强，因为海拔高度越高，空气密度越小；坡

向和坡度变化：在北半球温带地区太阳的位置偏南，南坡受的光照要比平地多，北坡就比较少，反之亦然。

时间变化有四季和昼夜变化，一年中夏季光照最强，冬季最弱；一天中，中午光照最强，早晚最弱。

1.3.1 太阳辐射强度

太阳辐射强度是表示太阳辐射强弱的物理量，即在单位时间内垂直投射到单位面积上的太阳辐射能量。大气上界的太阳辐射强度取决于太阳的高度角、日地距离和日照时间。

太阳高度角越大，太阳辐射强度越大。因为同一束光线直射时，照射面积最小，单位面积所获得的太阳辐射则多；反之，斜射时照射面积大，单位面积上获得的太阳辐射则少，如图 1-4 所示。太阳高度角因时、因地而异。一日之中，太阳高度角正午大于早晚；夏季大于冬季；低纬地区大于高纬度地区。

日地距离是指地球环绕太阳公转时，由于公转轨道呈椭圆形，日地之间的距离会不断改变。地球上获得的太阳辐射强度与日地距离的平方呈反比。地球位于近日点时，获得的太阳辐射大于远日点。

太阳辐射强度与日照时间成正比，日照时间的长短随纬度和季节而变化。单位面积上的太阳辐射通量则称为太阳辐射照度，单位为瓦/平方米 (W/m^2)。

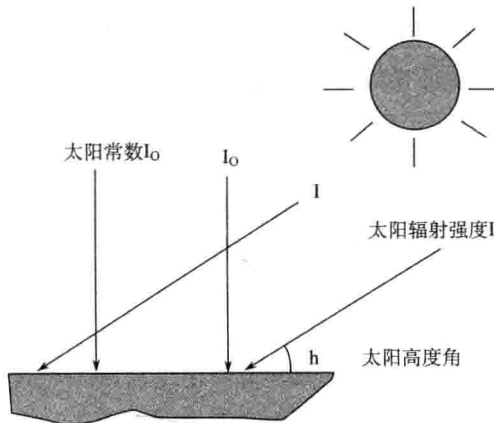


图 1-4 太阳高度角与太阳辐射强度

1.3.2 太阳常数

太阳常数指在日地平均距离处垂直于太阳光线的平面上，单位时间内单位面积上所接收到的太阳辐射能。1957 年，国际辐射委员建议在整个国际地球物理年观测资料中，将太阳常数的值取为 138.4 毫瓦/厘米² 或者 1384 瓦/米²。随着测量技术的