



普通高等教育“十二五”规划教材

太阳能光伏组件技术

第二版

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

(第二版)

薛春荣 钱 斌
江学范 周承柏



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,内容由浅入深,由理论到应用。

本书可作为高等院校新能源相关专业本科生、专科生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的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. —2版. —北京:科学出版社, 2015.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-045318-1

I. ①太… II. ①薛… III. ①太阳能电池-高等学校-教材
IV. ①TM914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第181797号

责任编辑:余江 张丽花 / 责任校对:桂伟利

责任印制:霍兵 / 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>

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

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

2015年8月第二版 印张:15 1/2

2015年8月第二次印刷 字数:321 000

定价:39.00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，能满足可持续发电的要求。从能量转换技术上说，太阳能光伏发电只需要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 10 章，从内容上分为以下 3 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，注意启发式教学，旨在培养学生学习的主动性和创造性。在具体实施过程中，建议利用问题法教学，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，实施过程中应注重和企业接轨，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，实施过程中建议通过工程法教学，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，书中难免有不妥之处，恳请广大读者予以指正。

作 者

2015 年 4 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 太阳能利用特点	3
1.3 太阳辐射特性	7
1.4 太阳能电池、组件和发电系统.....	12
思考题	15
第 2 章 晶硅太阳能电池	16
2.1 半导体基础.....	16
2.2 晶硅太阳能电池特性.....	29
2.3 晶硅太阳能电池的设计.....	42
2.4 晶硅太阳能电池发展.....	55
2.5 晶硅太阳能电池质量控制.....	62
2.6 小结.....	65
思考题	65
第 3 章 薄膜太阳能电池	66
3.1 太阳能电池分类.....	66
3.2 薄膜太阳能电池的特性.....	67
3.3 透明导电氧化物薄膜.....	68
3.4 多结叠层太阳能电池.....	71
3.5 硅基薄膜太阳能电池.....	74
3.6 无机化合物薄膜太阳能电池.....	81
3.7 有机太阳能电池.....	94
3.8 高效太阳能电池探索	108
思考题.....	113
第 4 章 太阳能光伏组件设计	114
4.1 太阳能光伏组件概述	114
4.2 光伏组件的封装密度	114
4.3 光伏组件的电路设计	115
4.4 光伏组件中的错配效应	116
4.5 光伏组件的温度效应	125

4.6	光伏组件的电力保护和机械保护	128
4.7	光伏组件的退化机制	128
4.8	光伏组件的功率设计	130
4.9	制约组件输出功率的因素	131
4.10	太阳能光伏阵列	132
	思考题	138
第 5 章	太阳能光伏组件封装工艺	139
5.1	太阳能光伏组件封装概述	139
5.2	太阳能电池的分选与划片	143
5.3	太阳能电池的焊接	145
5.4	叠层与层压	149
5.5	装框与清洗	153
5.6	终检与包装	154
	思考题	155
第 6 章	太阳能光伏组件封装材料	156
6.1	晶硅太阳能电池	156
6.2	前表面材料	162
6.3	EVA 胶膜	165
6.4	背板材料	167
6.5	边框材料	170
6.6	其他材料	173
	思考题	177
第 7 章	太阳能光伏组件封装设备	178
7.1	光伏设备简介	178
7.2	单片分选仪	180
7.3	组件测试仪	182
7.4	激光划片机	183
7.5	焊接设备	184
7.6	组件层压机	186
7.7	组框装框机	189
7.8	玻璃清洗机	190
	思考题	190
第 8 章	太阳能光伏组件测试	191
8.1	组件电性能测试	193
8.2	组件耐压绝缘测试	194
8.3	组件 EL 测试	195

8.4	组件机械载荷测试	199
8.5	组件湿热湿冷实验	199
8.6	组件冰雹实验	200
8.7	组件紫外老化实验	200
	思考题	201
第9章	太阳能光伏组件故障分析	202
9.1	组件辨别	202
9.2	组件常见问题	203
9.3	组件常见问题分析	205
9.4	图解组件产品质量问题	207
9.5	组件的衰降和失效	218
	思考题	220
第10章	太阳能光伏组件应用	221
10.1	光伏组件的应用领域	221
10.2	光伏系统	222
10.3	光伏建筑	229
10.4	太阳能汽车	236
	思考题	238
	参考文献	239

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、潮汐能等许多种，由于煤、油、气等常规能源具有污染环境和不可再生的缺点，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。生物质能是仅次于煤炭、石油、天然气的世界第四大能源，在世界能源消耗中，生物质能占总能耗的 14%，其中在发展中国家占 35% 以上。在我国，储存量是仅次于煤炭的第二大能源。

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。不论是水能资源蕴藏量，还是可能开发的水能资源，中国在世界各国中均居第一位。我国煤炭储量居世界第三位。

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还要大 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，称得上世界上最干净的能源。氢资源丰富，氢气可由水制取，而水是地球上最为丰富的资源。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。

图 1-1 所示是潮汐能的应用，图 1-2 所示是地热能的利用。目前开发利用的能源中，核能的能流密度最大。

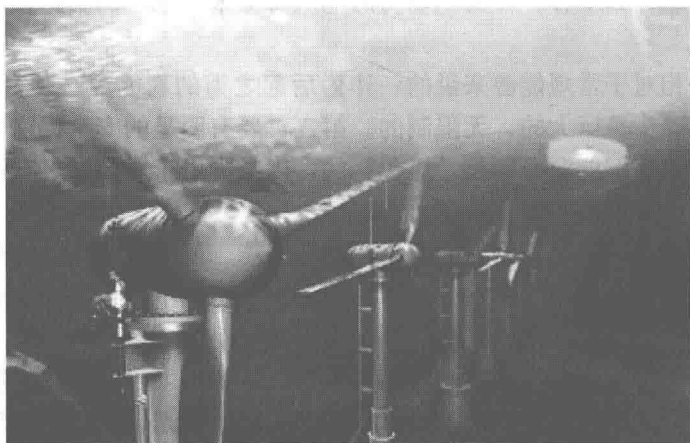


图 1-1 海底潮汐能发电机

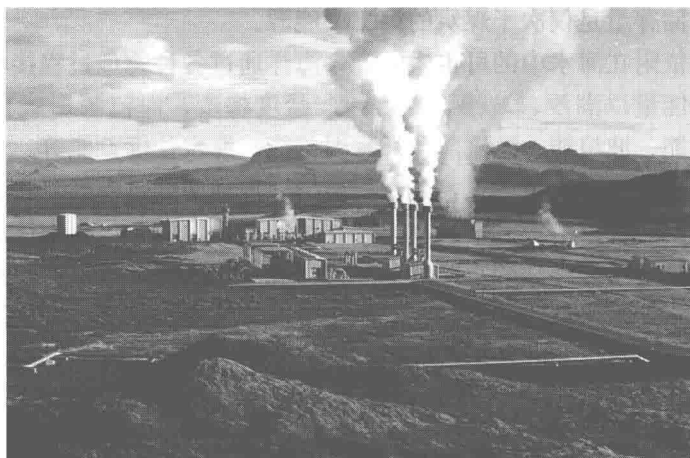


图 1-2 地热发电站

1.2 太阳能利用特点

在诸多新能源中，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

地球每秒钟接收到的太阳能是人类每年需求的能量总量的好几倍。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，无须开采和运输。

(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。每年到达地球表面上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。因此太阳能必将在世界能源结构转换中担当重任，太阳能发电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照度是间断的、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。图1-3所示为平板太阳能集热器。



图 1-3 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称为“集热器”，如集热器通过吸收面可以将太阳能转换成热能，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1-4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



图 1-4 光热光伏系统

电系统，如图 1-5 所示。在太阳能利用中，最具优势的是太阳能光伏发电，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。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无须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。



图 1-5 太阳能光伏发电系统

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 1-6 所示。

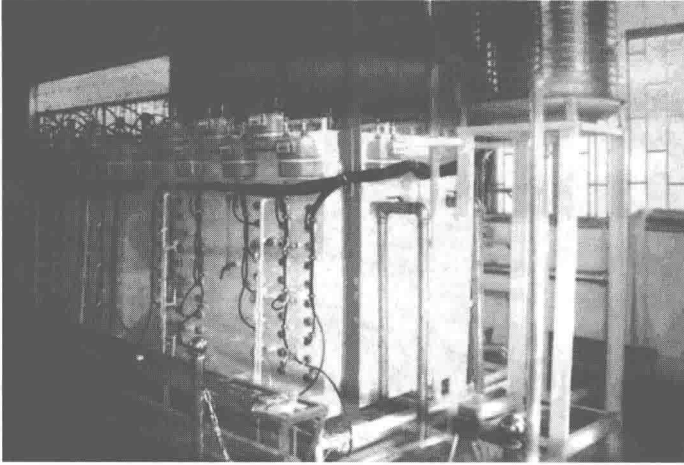


图 1-6 太阳能光合细菌连续制氢试验系统

(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) 太阳能传输。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。

1.2.3 太阳能资源分布

地球上太阳能资源的分布与各地的纬度、海拔高度、地理状况和气候条件有关。资源丰度一般以全年总辐射量(单位为千卡/(厘米²·年)或千瓦/(厘米²·年))

和全年日照总时数表示。就全球而言，美国西南部、非洲、澳大利亚、中国西藏、中东等地区的全年总辐射量或日照总时数最大，为世界太阳能资源最丰富地区。

我国地处北半球，土地辽阔，幅员广大，国土总面积达 960 万平方公里。南从北纬 4°的曾母暗沙，北到北纬 52.5°的漠河，西自东经 73°的帕米尔高原，东至东经 135°的黑龙江与乌苏里江汇流处，距离都在 5000 千米以上。在我国广阔富饶的土地上，有着丰富的太阳能资源。全国各地的年太阳辐射总量为 928~2333kW·h/m²，平均年辐射量为 1626kW·h/m²。按接收太阳能辐射量的大小，全国大致可分为五类地区。

一类地区：为我国太阳能资源最丰富的地区，包括宁夏北部、甘肃北部、新疆东部、青海西部和西藏西部等地。尤以西藏西部最为丰富，居世界第二位，仅次于撒哈拉大沙漠。

二类地区：为我国太阳能资源较丰富地区，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地。

三类地区：为我国太阳能资源中等类型地区，主要包括山东、河南、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、苏北、皖北、台湾西南部等地。

四类地区：是我国太阳能资源较差地区，包括湖南、湖北、广西、江西、浙江、福建北部、广东北部、陕西南部、江苏北部、安徽南部以及黑龙江、台湾东北部等地。

五类地区：主要包括四川、贵州两省，是我国太阳能资源最少的地区。

1.3 太阳辐射特性

太阳光有很多重要的特性，如入射光的光谱分布、太阳辐射的功率强度、太阳光入射到太阳能电池的角度、一年或一天，太阳光照射到特定表面的总能量，这些特性在决定入射光与太阳能电池如何作用时非常重要。

1.3.1 光的基本特性

光子的能量与波长之间存在反比例关系，方程如下：

$$E = hc/\lambda \quad (1-1)$$

式中， h 是普朗克常数， c 表示光速。可见由光子组成的光的能量越高（如蓝光），波长就越短。能量越低（如红光），波长越长。当描述光子、电子等粒子时，共同使用的能量单位是“电子伏特”（eV），而不是“焦耳”（J）。一个电子伏特的能量相当于把一个电子的电势提高一伏所需要做的功，所以 $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\text{J}$ ，由此得到下式：

$$E(\text{eV}) = 1.24/\lambda(\mu\text{m}) \quad (1-2)$$

光子通量被定义为单位时间内通过单位面积的光子数量：

$$\Phi = \frac{\#(\text{光子数量})}{S(\text{m})^2} \quad (1-3)$$

光子通量是决定太阳能电池产生的电子数量和电流大小的重要因素。然而，单光子通量并不足以确定太阳能电池产生的电流大小或说明光源的特性。光子通量没有包含关于入射光子的能量或波长的信息。对于一群能量相同（单色光）且光子能量已经知道的光子，总的辐射功率强度以 W/m^2 为单位可以用以下公式计算：

$$H\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right) = \Phi E(\text{eV}) = \Phi \frac{hc}{\lambda} \quad (1-4)$$

式中， Φ 指的是光子通量， E 是以单位 eV 计算的光子能量。式 (1-4) 表明了要获得同样的辐射强度，高能量的光子（短波）所需的光子通量比低能量的光子（长波）所需的光子通量小。

光照度（记作 F ）作为光子波长（或能量）的对应量，是描述光源性质最常用的物理量。在分析太阳能电池时，通常既需要光子通量也需要光照度，它们之间的关系方程如下：

$$F\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \mu\text{m}}\right) = q\Phi E(\text{eV}) \frac{1}{\lambda(\mu\text{m})} = q\Phi \frac{1.24}{\lambda^2(\mu\text{m})} = q\Phi \frac{E^2(\text{eV})}{1.24} \quad (1-5)$$

式中， F 为光照度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)， Φ 为光子通量， $E(\text{eV})$ 和 $\lambda(\mu\text{m})$ 分别是光子的能量和波长。 q 、 h 和 c 都是常数。

发射自光源的总的功率强度可以通过所有波长或其对应的能量的光照度的叠加计算获得。然而，计算光源光照度的近似方程通常并不存在。取而代之的是，被测量出的光照度乘以所处波长范围，然后计算所有的波长的光照度，如下所示：

$$H = \int_0^{\infty} F(\lambda) d\lambda = \sum_{i=1}^{\infty} F(\lambda) \Delta\lambda \quad (1-6)$$

式中， H 为光源发出的总功率强度，以 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 为单位； $F(\lambda)$ 是以 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 为单位的光照度，而 $d\lambda$ 及 $\Delta\lambda$ 都是波长。

1.3.2 太阳辐射

地球大气层外的太阳辐射强度可通过太阳表面的辐射功率强度、太阳半径和地球与太阳之间的距离计算得到，约为 $1.36\text{kW}/\text{m}^2$ 。实际的功率强度会有轻微的变化，因为地球以椭圆形轨道围绕太阳公转以及太阳的辐射功率也是一直在改变着的。一般来说这些变化都是非常小的，对光伏应用来说，太阳光照度可看成一个常数。这个常数的值及其光谱已经被定为标准值，称为大气质量零辐射（air mass-zero radiation），记作 AM0，此时辐射值为 $1.353\text{kW}/\text{m}^2$ 。

当入射到地球大气层的太阳辐射相对稳定时，影响地球表面辐射的主要因素是大气效应（包括吸收和散射）、当地大气质量的不同（如水蒸气、云层和污染）、纬

度位置不同、一年中季节的不同和一天内时间的不同。在光伏应用领域，大气效应的主要影响如下。

- (1) 由大气吸收、散射和反射引起的太阳辐射能量的减少。
- (2) 由于大气对某些波长的较为强烈地吸收和散射而导致光谱含量的变化。
- (3) 分散的或间接的光谱组合被引入太阳辐射中。
- (4) 当地大气层的变化引起入射光能量、光谱和方向的额外改变。

当太阳光穿过大气层时，气体、灰尘和悬浮颗粒都将吸收入射光子。特殊的气体包括臭氧 (O_3)、二氧化碳 (CO_2) 和水蒸气 (H_2O) 都能强烈地吸收能量与其分子键能相近的光子。如多数波长大于 $2\mu m$ 的远红外光会被水蒸气和二氧化碳吸收。相似的，大多数波长小于 $0.3\mu m$ 的紫外光会被臭氧吸收。然而，这些大气中的特殊气体在改变地表太阳辐射的光谱含量的同时，并没有相应地明显减少辐射的总能量。而空气分子和尘埃通过对光的吸收和散射成为辐射能量减少的主要因素。这种吸收引起能量的减少（大小取决于穿过大气的路径长度）。当太阳处在头顶正上方时，大气分子引起的吸收会导致光谱中可见光领域一整片的减少，所以入射光呈现白色。然而，当路径变得越长，能量更高（波长更小）的光子能更有效地被吸收和散射。所以在早上和傍晚太阳会变得更红，强度也比中午低。

当光穿过大气层被吸收的同时也发生散射。大气中光的散射机制之一就是人们熟知的瑞利散射，它由大气中的分子引起。瑞利散射对短波光（如蓝光）作用效果显著，因为瑞利散射的强度与波长四次方成反比。蓝光的波长与大气中粒子线度相当，所以被强烈散射。红光的波长大于多数的粒子线度，不会受影响。除了瑞利散射之外，气溶胶和尘埃粒子也会使入射光产生散射。散射光的方向是杂乱无章的，所以它可以来自天空的任何地区。这种光也称为分散光。由于散射光主要是蓝光，所以除了太阳所处的区域外，来自天空所有区域的光都呈现蓝色。假如大气中没有散射，天空将变成黑色，而太阳则会变成一个圆盘状的光源。在天气晴朗的日子，入射光线中大概有 10% 会被散射。

由于大气的存在，太阳辐射能在到达地面之前受到很大的衰减，这种衰减的大小与太阳辐射穿过大气路程的长短有着密切的关系。太阳光线在大气中经过的路程越长，能量损失得就越多；路程越短，能量损失得越少。大气质量被定义为光穿过大气的路径长度，长度最短时的路径（即当太阳处在头顶正上方时）规定为“一个标准大气质量”。通常把太阳处于头顶，即太阳垂直照射地面时，光线所穿过的大气的路程，称为 1 个大气质量 (AM1)。太阳在其他位置时，大气质量都大于 1。“大气质量”量化了太阳辐射穿过大气层时被空气和尘埃吸收后的衰减程度。大气质量由下式给出：

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (1-7)$$

式中， θ 表示太阳光线与垂直线的夹角，当太阳处在头顶时，大气质量为 1。“大气

质量”描绘了太阳光到达地面前所需走过的路程与太阳处在头顶处时的路程的比例，也等于图 1-7 所示的 Y/X 。

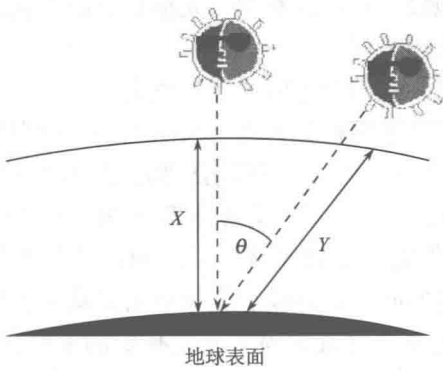


图 1-7 大气质量计算示意图

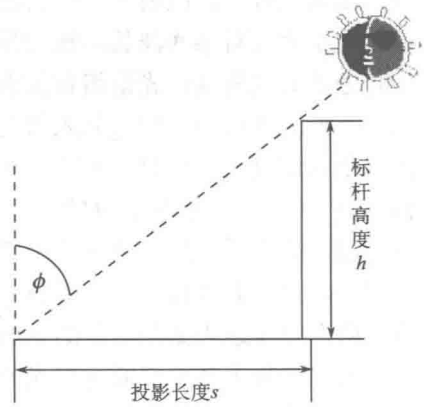


图 1-8 大气质量计算示意图

估算大气质量的一个最简单的方法就是测量一个垂直立着的标杆的投影长度，如图 1-8 所示。

大气质量等于斜边的长度除以标杆的高度 h ，然后由勾股定理得到：

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2} \quad (1-8)$$

太阳能电池的效率对入射光的能量和光谱含量都非常敏感。为了方便不同时间和不同地点太阳能电池的数据比较，人们定义了地球大气层外和地球表面的光谱和功率强度的标准值。

地球表面的标准光谱称为 AM1.5G (G 代表总的辐射，包括直接的和分散的辐射) 或者 AM1.5D (只包含直接的辐射)。AM1.5D 的辐射强度近似于减少 28% 能量后的 AM0 光谱的光谱强度 (18% 被吸收，10% 被散射)。总的光谱辐射强度要比直射的光谱强度高 10%。从上面的计算可得 AM1.5G 的值近似为 970W/m^2 。然而，由于整数计算比较方便以及入射太阳光存在固有的变化，人们规范了标准的 AM1.5G 光谱值为 1kW/m^2 。地球大气层外的标准光谱称为 AM0，因为光没有穿过任何大气。这个光谱通常被用来预测太空中太阳能电池的表现。

太阳的运动改变着射入地球的光线的直射分量角度，很大程度上影响太阳能收集器件获得的能量。当太阳光垂直入射到吸收平面时，在平面上的功率强度等于入射光的功率强度。然而，当太阳光与吸收平面的角度改变时，其表面的功率强度就会减小。当平面与太阳光平行时，功率强度基本上变为零。对于 0° 和 90° 之间的角，它们相对的功率强度为最大值乘以 $\cos\theta$ ，其中 θ 为太阳光与器件平面之间的夹角。太阳偏向角就是指赤道平面与地球中心点——太阳中心点的连线的夹角，计算