



全国高等院校新能源专业规划教材

育新能源类“十三五”精品规划教材

太阳能转换原理与技术

Principles and Technology for Solar Energy Conversion

主 编 戴松元

副主编 古丽米娜 王景甫 卢 宇



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

能源专业规划教材

高等教育新能源类“十三五”精品规划教材

太阳能转换原理与技术

Principles and Technology for Solar Energy Conversion

主 编 戴松元

副主编 古丽米娜 王景甫 卢 宇



West China Press
www.westchina.com.cn

内 容 提 要

本书是为新能源类专业本科生编写的教材。本书主要介绍了太阳能基本知识、太阳能光热转换原理与技术、太阳能光伏转换原理与技术、太阳能光热电转换原理与技术、太阳能的其他转换方式与技术、太阳能应用工程等方面的内容。

本书既可作为普通高等院校有关专业的教材,也适合于太阳能及其相关行业的从业人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能转换原理与技术 / 戴松元主编. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2018. 6
全国高等院校新能源专业规划教材 全国普通高等教
育新能源类“十三五”精品规划教材
ISBN 978-7-5170-6596-8

I. ①太… II. ①戴… III. ①太阳能利用—高等学校
—教材②太阳能光伏发电—高等学校—教材 IV.
①TK519②TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第147572号

书 名	全国高等院校新能源专业规划教材 全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材 太阳能转换原理与技术 TAIYANGNENG ZHUANHUAN YUANLI YU JISHU
作 者	主 编 戴松元 副主编 古丽米娜 王景甫 卢宇
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14.25印张 338千字
版 次	2018年6月第1版 2018年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	49.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

丛书编委会

顾问 褚君浩 (中国科学院上海技术物理研究所)

徐建中 (中国科学院工程热物理研究所)

贺德馨 (中国风能协会)

刘吉臻 (华北电力大学)

杨德仁 (浙江大学)

张百良 (河南农业大学)

主任 杨勇平 (华北电力大学)

副主任 戴松元 (华北电力大学)

陈汉平 (华中科技大学)

黄志高 (福建师范大学)

汪建文 (内蒙古工业大学)

委员 (按姓氏笔画排序)

王 谦 (江苏大学)

王少清 (济南大学)

王景甫 (北京工业大学)

田 德 (华北电力大学)

邢作霞 (沈阳工业大学)

许 昌 (河海大学)

孙后环 (南京工业大学)

李 岩 (东北农业大学)

李 涛 (青海师范大学)

杨 晨 (重庆大学)

杨世关 (华北电力大学)

陈 荐 (长沙理工大学)

林 鹿 (厦门大学)

周建斌 (南京林业大学)

周继承 (中南大学)

钱 斌 (常熟理工学院)

本书编委会

主 编 戴松元（华北电力大学）

副 主 编 古丽米娜（华北电力大学）

王景甫（北京工业大学）

卢 宇（福建师范大学）

编写人员 陈水源（福建师范大学）

陈建林（长沙理工大学）

吴玉庭（北京工业大学）

赵 雷（中国科学院电工研究所）

朱红路（华北电力大学）

宋记锋（华北电力大学）

序

可再生能源的发展及进步对于人类的生存和可持续发展是一个非常重要的保障。随着各国经济的快速发展、人民生活水平的持续提高,人们对传统能源的消耗也快速增长,从而带来了环境污染、能源短缺等一系列问题。因此,大力发展无碳、低碳可再生能源是实现能源和环境可持续发展的重要途径之一。人类直接应用太阳能的历史很长,从早期的利用太阳能晒干物品,到现在的利用聚光原理的太阳灶应用等。太阳能的利用主要有光热转换和光电转换两种方式,广义上的太阳能也包括地球上的风能、化学能、生物质能和水能等。目前,太阳能光伏发电作为太阳能利用的一种重要方式,越来越受到世界各国的重视。作为可再生能源,太阳能光伏发电在近年来得到了急速发展,目前全球太阳电池的年产量平均增长率超过40%。据欧盟联合研究中心(joint research center, JRC)预测,到2030年可再生能源在总能源结构中占到30%以上,太阳能光伏发电在世界总电力供应中占到10%以上,到21世纪末可再生能源在能源结构中占到80%以上,太阳能发电占到60%以上,显示出重要的战略地位。在这种情况下,对太阳能转换原理及其技术、应用工程的把握无疑是非常重要的,尤其对年轻学子以及从事该行业的研究人员来说至关重要。

该教材突出的特点是集中地介绍了太阳能的转换原理及其技术方面的基本知识,并介绍太阳能光电、光热和其他利用的各种原理与技术,阐述了太阳能在发展过程中的各种利用方式,从工程案例出发,详细介绍太阳能的各种应用工程类型,并分析目前利用太阳能转换原理与技术工程的优势和“瓶颈”,同时对其关键技术问题及未来技术的突破前景做了简要介绍。该教材还就最近几年发展的新材料、新结构和新概念等进行了简要介绍,提出太阳能光伏产业的应用不受地域限制,相较于其他可再生能源会有更广阔的应用市场。

该教材的作者都是我国在各类太阳能及应用工程方面具有教学及研究经验的大学教师。书中很多内容和观点体现了作者们多年的实践体会和认识。

从该教材的组织到文字的撰写,以及后续的思考等方面,作者颇具匠心,力求深入浅出,图文并茂。太阳能应用的发展并非一帆风顺,这也预示着太阳能的转换利用技术也需要迎接更多的挑战,但凭着太阳能自身的优势和潜力,只要有努力,它的未来更美好。与此同时,相信该教材的出版,能对我国太阳能应用技术与工程的发展起到促进与推动作用。该教材主要适用于大学本科开设新能源科学与工程和新能源材料与器件等相关专业的教学使用,同时对太阳能的应用及太阳电池行业相关从业人员有所帮助,对从事太阳能光电和光热应用工程研究的研究生和专业人员提供帮助和指导。



2018年6月

丛 书 前 言

总算不负大家几年来的辛苦付出，终于到了该为这套教材写篇短序的时候了。

这套全国高等院校新能源专业规划教材、全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材建设的缘起，要追溯到2009年我国启动的国家战略性新兴产业发展计划，当时国家提出了要大力发展包括新能源在内的七大战略性新兴产业。经过不到十年的发展，我国新能源产业实现了重大跨越，成为全球新能源产业的领跑者。2016年国务院印发的《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》，提出要把战略性新兴产业摆在经济社会发展更加突出的位置，强调要大幅提升新能源的应用比例，推动新能源成为支柱产业。

产业的飞速发展导致人才需求量的急剧增加。根据联合国环境规划署2008年发布的《绿色工作：在低碳、可持续发展的世界实现体面劳动》，2006年全球新能源产业提供的工作岗位超过230万个，而根据国际可再生能源署发布的报告，2017年仅我国可再生能源产业提供的就业岗位就达到了388万个。

为配合国家战略，2010年教育部首次在高校设置战略性新兴产业相关专业，并批准华北电力大学、华中科技大学和中南大学等11所高校开设“新能源科学与工程”专业，截至2017年，全国开设该专业的高校已超过100所。

上述背景决定了新能源专业的建设无法复制传统的专业建设模式，在专业建设初期，面临着既缺乏参照又缺少支撑的局面。面对这种挑战，2013年华北电力大学力邀多所开设该专业的高校，召开了一次专业建设研讨会，共商如何推进专业建设。以此次会议为契机，40余所高校联合成立了“全国新能源科学与工程专业联盟”（简称联盟），联盟成立后发展迅速，目前已有近百所高校加入。

联盟成立后将教材建设列为头等大事，2015年联盟在华北电力大学召开了首次教材建设研讨会。会议确定了教材建设总的指导思想：全面贯彻党的教育方针和科教兴国战略，广泛吸收新能源科学研究和教学改革的最新成果，认真对标中国工程教育专业认证标准，使人才培养更好地适应国家战略性新兴产业的发展需要。同时，提出了“专业共性课+方向特色课”的新能源专业课程体系建设思路，并由此确定了教材建设两步走的计划：第一步以建设新能源各个专业方向通用的共性课程教材为核心；第二步以建设专业方向特色课程教材为重点。此次会议还确定了第一批拟建设的教材及主编。同时，通过专家投票的方式，选定中国水利水电出版社作为教材建设的合作出版机构。在这次会议的基础上，联盟又于2016年在北京工业大学召开了教材建设推进会，讨论和审定了各部教材的编写大纲，确定了编写任务分工，由此教材正式进入编写阶段。

按照上述指导思想和建设思路，首批组织出版9部教材：面向大一学生编写了《新能源科学与工程专业导论》，以帮助学生建立对专业的整体认知，并激发他们的专业学习兴趣。

趣；围绕太阳能、风能和生物质能3大新能源产业，以能量转换为核心，分别编写了《太阳能转换原理与技术》《风能转换原理与技术》《生物质能转化原理与技术》；鉴于储能技术在新能源发展过程中的重要作用，编写了《储能原理与技术》；按照工程专业认证标准对本科毕业生提出的“理解并掌握工程管理原理与经济决策方法”以及“能够理解和评价针对复杂工程问题的工程实践对环境、社会可持续发展的影响”两项要求，分别编写了《新能源技术经济学》《能源与环境》；根据实践能力培养需要，编写了《光伏发电实验实训教程》《智能微电网技术与实验系统》。

上述9部教材虽然已完稿并将出版，但这只是这套系列教材建设迈出的第一步。在教育信息化和“新工科”建设背景下，教材建设必须突破单纯依赖纸媒教材的局面，所以，联盟将在这套纸媒教材建设的基础上，充分利用互联网，继续实施数字化教学资源建设，并为此搭建了两个数字教学资源平台：新能源教学资源网（<http://www.creeu.org>）和新能源发电内容服务平台（<http://www.yn931.com>）。

在我国高等教育进入新时代的大背景下，联盟将紧跟国家能源战略需求，坚持立德树人的根本使命，继续探索多学科交叉融合支撑教材建设的途径，力争打造出精品教材，为创造有利于新能源卓越人才成长的环境、更好地培养高素质的新能源专业人才奠定更加坚实的基础。有鉴于此，新能源专业教材建设永远在路上！

丛书编委会

2018年1月

本书前言

人类意识到并将太阳能作为一种能源和动力加以利用,仅有 300 多年的历史。近年来,随着各种功能材料制备技术,包括半导体技术的进步,以及晶硅类太阳电池的诞生,人类迎来了太阳能转换利用技术与应用的高速发展时代。目前,太阳能的转换及利用技术不仅在基础理论上有很大的进步,在实际应用及工程方面也在日趋成熟,已出现了几十种太阳电池的种类,其中晶硅类太阳电池阵列实现了并网运行。但是,各种不同类型的电池,在其应用中也存在着不同程度的技术缺陷,因此对其工程应用的开发也逐渐得到了研究人员的重视。

本教材主要从太阳能资源的基础知识展开,进而介绍太阳电池的应用类型。进一步介绍了各种类型太阳电池的基本原理、技术工艺手段。最后还介绍了太阳能利用工程方面的知识。与国内外已出版的同类书相比,本教材着重阐述太阳能转换原理及其技术应用方面的知识点及其技术问题,探讨了太阳能转换过程中的实用化技术。全书共分 6 章,其中第 1 章由戴松元、古丽米娜编写,主要介绍了太阳能的基本知识及太阳能资源状况、利用方式;第 2 章由王景甫、吴玉庭编写,详细介绍了太阳能光热转换原理与技术;第 3 章由戴松元、古丽米娜、赵雷、陈水源编写,该章系统介绍了太阳能的光电转换利用原理,并详细介绍了各种类型的太阳电池,讨论了不同太阳电池的优缺点及其相似与不同之处;第 4 章由王景甫、吴玉庭、卢宇编写,主要介绍了太阳能的光热电转换原理与技术利用;第 5 章由陈建林编写,主要介绍了太阳能转换的其他方式与技术;第 6 章由卢宇、陈水源编写,主要介绍了太阳能的工程应用及案例,如太阳能光热发电工程、光伏发电工程、热发电工程、综合利用工程等。

本教材来源于作者长期从事半导体材料、薄膜太阳电池、太阳能应用工程的基础研究、教学实践和技术研发的经验,图文并茂,物理图像表述清晰。在编写过程中,作者参考了一些国内外有关领域最新进展的成果,引用了参考文献中的部分内容、图表和数据,在此表示诚挚的谢意。本教材形成过程中,华北电力大学、北京工业大学、福建师范大学的教授们做出了不同程度的贡献。此外,本教材是在中国水利水电出版社的大力支持下出版的,作者对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。

本教材力求反映目前太阳能转换技术与应用中的发展现状及未来发展趋势,希望能有利于将来人们对太阳能的利用或研究,有益于相关高校本科生、硕士生、博士生和研究人员的培养以及研究水平的提高,使读者对太阳能转换利用及技术的未来发展有所启发,并

希望能够成为有实用价值的太阳能领域教科书及参考书。

近年来，由于太阳能转换技术的迅速发展，新材料、新器件和新观点等不断涌现，限于作者知识水平，书中难免会出现不妥甚至错误之处，恳请各位专家学者和广大读者批评指正，以使本书再版中能得到改正。

作者

2018年6月

目 录

序

丛书前言

本书前言

第1章 太阳能基本知识	1
1.1 太阳能概况	1
1.2 太阳能资源分布	9
1.3 太阳能转换与利用方式	12
思考题	17
参考文献	18
第2章 太阳能光热转换原理与技术	19
2.1 太阳能集热器	19
2.2 太阳热水器	36
2.3 太阳能干燥	39
2.4 太阳房	43
2.5 太阳灶	48
2.6 太阳炉	52
2.7 太阳能海水淡化技术	53
2.8 太阳能制冷技术	56
思考题	58
参考文献	58
第3章 太阳能光电转换原理与技术	60
3.1 太阳能光伏转换原理	60
3.2 太阳能光伏转换材料及应用	66
3.3 太阳能光伏发电系统	91
思考题	99
参考文献	99
第4章 太阳能光热电转换原理与技术	100
4.1 概述	100
4.2 太阳能热发电系统	101

4.3 槽式太阳能热发电原理与技术	107
4.4 塔式太阳能热发电系统	112
4.5 碟式太阳能热发电系统	116
4.6 线性菲涅尔式太阳能热发电系统	121
4.7 其他太阳能热发电技术	127
思考题.....	128
参考文献.....	129
第5章 太阳能的其他转换方式与技术.....	131
5.1 光催化分解水制氢	131
5.2 光纤光导照明系统	140
思考题.....	143
参考文献.....	144
第6章 太阳能应用工程.....	145
6.1 太阳能热发电工程	145
6.2 光伏发电	159
6.3 光热利用	176
6.4 太阳能光热光电综合利用	201
思考题.....	210
参考文献.....	210

第1章 太阳能基本知识

太阳能是一种清洁能源，它的应用已受到世界各国的重视，它的开发和利用正在融入人们的生产、生活中。本章主要介绍太阳能的概况、资源分布、转换与利用方式及相应的基础知识，无论对于太阳能利用的理论研究还是对太阳能利用的实践研究都具有重要的意义。

1.1 太阳能概况

1.1.1 太阳能概况

21 世纪人类文明急速发展，人口的增加、经济的发展必然会导致能源需求的增加。而目前主要的能源供应形式为化石能源。这必然会带来诸多严重的问题。大量地使用化石能源，将致使其短缺，同时导致严重的环境污染、生态破坏。

根据 BP 石油公司《2017 年世界能源统计报告》的数据（表 1.1），我国化石能源在 2016 年年底的储量及产量在全球储量及产量中所占比例较少。同时，表 1.1 中通过储产比（储采比）数据给出了化石能源在我国及全球的可开采年数。我国煤炭的储采比为 72 年，远低于世界平均水平（153 年）。对于石油和天然气的可开采年数，我国分别为 17.5 年和 38.8 年，均分别低于世界平均水平（50.6 年和 52.5 年）。由此可见，我国化石能源短缺，控制化石能源的消耗不仅是保护环境和减少碳排放的需要，而且从资源禀赋的角度来看也是十分必要的。

表 1.1 2016 年我国和全球化石能源储量、产量、储产比数据对比

	2016 年底储量	2016 年产量	储产比
石油	全球：2407 亿 t 中国：35 亿 t	全球：43.824 亿 t 中国：1.997 亿 t	全球：50.6 年 中国：17.5 年
天然气	全球：186.6 万亿 m ³ 中国：5.4 万亿 m ³	全球：35516 亿 m ³ 中国：1384 亿 m ³	全球：52.5 年 中国：38.8 年
煤炭	全球：11393.31 亿 t 中国：2440.1 亿 t	全球：36.564 亿 t 中国：16.857 亿 t	全球：153 年 中国：72 年

储采比是指上年的某种化石能源的剩余可采储量与上年的采出量之比，可以大致反映某种化石能源按照当前开采速度还能够再用多少年。由表 1.1 的结果可见，全球范围内，



在今后的几十年到一百年左右的时间内这些传统能源将会枯竭。因此，在人口增加、能源需求量大、环境污染、传统能源枯竭等问题的压力下，解决办法之一是减少使用传统能源，并寻找替代能源，如大力推广太阳能等清洁、可再生能源的应用。

可再生能源的种类很多，其中太阳能是主体。此外，可再生能源还包括风能、生物质能、水能、地热能、氢能和核能等。随着时间的推移，这些具有各种资源形式的新兴能源将逐渐成为主要能源，将会对人类生产、生活的文明发展带来重大影响。太阳能是一种取之不尽、用之不竭的能源。其完全不同于石油、煤炭等传统能源。首先，太阳能的利用不会导致“温室效应”，也不含有害物质，不会污染环境，因此为清洁能源。其次，处处都有太阳辐射，没有地域和资源的限制，就地可用，无需运输或输送，使用方便且安全。这对于山区、沙漠、海岛等偏僻边远地区更显示出它的优越性，因此太阳能具有广泛性。随着社会的发展和人类文明的进步，太阳能将会扮演更加重要的角色，其应用也已受到世界各国的重视，并逐渐成为一种非常理想的清洁能源。

太阳位于银河系的对称平面附近，距离银河系的中心约 33000 光年（银河系边缘距中心约 40000 光年），是银河系中 15000 亿颗恒星中的一员。太阳是一个处于高温、高压下的巨大火球，其直径约 $1.39 \times 10^6 \text{ km}$ ，比地球直径大 109 倍；其质量为 $2.2 \times 10^{17} \text{ t}$ ，比地球质量大 33 倍；体积比地球大 130 万倍；平均密度为地球的 $1/4$ ；表面温度约为 6000K，中心温度约达 $1.4 \times 10^7 \text{ K}$ ；压力约为 $1.96 \times 10^{13} \text{ kPa}$ ，太阳的物理数据见表 1.2。在这样的温度和压力下，太阳内部持续不断地进行着由氢聚变成氦的核聚变反应，同时其不断地以光线的形式向广阔宇宙空间辐射出巨大的能量，即太阳能。在该反应过程中，太阳内部产生数百万摄氏度的高温，表面温度达 5762K，这正是太阳向空间辐射出巨大能量的源泉。地球所接收到的太阳能相当于全球所需能量的 3 万~4 万倍，其总量是现今世界上可以开发利用的最大能量量，可见来自太阳的能量多么巨大。人们推测太阳的寿命至少还有几十亿年，因此对人类来说，太阳能是一种无限的能源。如果合理利用太阳能，将会为人类提供充足的能源。因此，太阳能的研究和应用是今后人类能源发展的主要方向之一。

表 1.2 太阳的物理数据

名 称	数 值	名 称	数 值
太阳直径/km	1.39×10^6	光球表面温度（相对于黑体辐射）/K	5762
在日地平均距离上太阳的径向角	$32'2.4''$	阳光辐照度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	615×10^7
太阳表面积/ km^2	6.036×10^{12}	太阳表面抛物线速度/ $(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	617
太阳质量/g	1.989×10^{33}	太阳自转周期/d	24.65
太阳体积/ cm^3	1.4122×10^{33}	太阳成分（按质量）元素	氢 75%，氦 24.25%， 其他元素 0.75%
表面加速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$	2.7398×10^4		
日冠温度/K	$\approx 10^6$	太阳常数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	1353

1.1.2 太阳辐射

太阳光穿过大气照射到地球时，其辐射能量中只有不到二十二亿分之一到达地球。到达地球表面的太阳辐射能总量具有不确定性，主要有以下原因：



首先, 由于太阳能具有分散性。虽然到达地球表面的太阳辐射能总量很大, 但是能流密度却很低, 每单位面积上的入射功率很小。

其次, 太阳能具有间歇性。由于太阳高度角在一年内不断变化, 因此即使在同一个地区, 一天 24h 内的太阳辐照度变化也较大。再加上受到季节以及晴、阴、雨、云等气象变化因素的影响, 到达同一地面的太阳辐照度既是间断的又是极不稳定的。

再次, 太阳能具有地域性。辐射到地球表面的太阳能, 随地点不同而有所变化。它不仅与各地的地理纬度、海拔有关, 还与各地的大气透明度(污染、混浊等)和气象变化等诸多因素有关。因此, 在地面上测得的太阳光频谱往往由于受大气层吸收和扰乱的影响, 以及受大气质量、气候、大气状态等因素的影响会发生很大的变化。

太阳能的可用量是不稳定的, 随机性较大。总的来说, 利用太阳能既有前述的各种优点, 也有严重的缺点。因此在考虑太阳能利用时, 不仅应从技术方面考虑, 还应从经济、环境、生态、居民福利, 特别是国家建设的整体方针等方面来全面考虑研究。

太阳辐射到地面有两种形式: 一种是从光球表面发射出的光辐射, 由可见光和不可见光组成; 另一种是微粒辐射, 由带正电荷的质子和大致等量的带负电荷的电子以及其他粒子组成的粒子流。微粒辐射平时较弱, 能量也不稳定。在太阳活动剧烈时, 其对人类和地球高层大气有一定的影响, 但从能量角度而言, 对地球的影响微乎其微。因此, 通常所说的太阳辐射指的是光辐射。这部分光照射到地球时, 其中有一部分被反射或散射, 一部分被吸收, 只有剩下的部分才以直射光或散射光的形式到达地球表面。到达地球表面的太阳光又有一部分被物体表面所吸收, 另一部分被发射回大气层。太阳光入射地面示意图如图 1.1 所示。

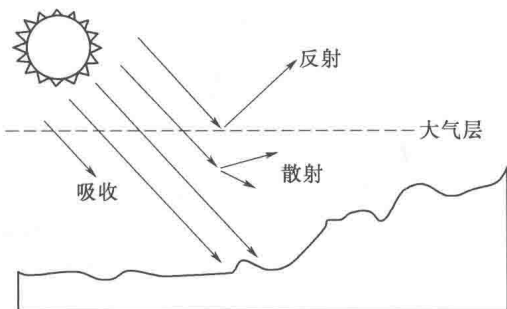


图 1.1 太阳光入射地面示意图

在地面上的任何地方都不可能排除大气吸收对太阳辐射的影响。实际测量的太阳辐射不仅和测试的时间、地点有关, 也和当时的气象条件有关。为了描述大气吸收对太阳辐射的能量及其光谱分布的影响, 引入大气质量 (air mass, AM) 概念, 即由于大气导致太阳光减少的比例与大气的厚度有关, 定量地表示大气厚度的单位称为大气圈通过空气量 (即上述所指大气质量)。大气质量为 0 的状态 (AM0), 是指在地球外空间接收太阳光的情况, 适用于人造卫星和宇宙飞船等应用场合; 大气质量为 1 的状态 (AM1), 是指太阳光直接垂直照射到地球表面的情况, 相当于晴朗夏日在海面上所接收的太阳光。这两者的区别在于大气对太阳光的衰减, 主要包括臭氧层对紫外线的吸收、水蒸气对红外线的吸收以及由大气中尘埃和悬浮物导致的散射等。大气质量为 1.5 的状态 (AM1.5), 是指在典型的晴天时, 太阳光照射到一般地面的情况, 常用于地面太阳电池和组件效率测试。

太阳辐射的波长包含 $0.15 \sim 4\mu\text{m}$ 的波段范围。实际入射的太阳能应当是太阳光所包含的各种波长的光能之和。大气吸收不仅影响到达地面的太阳辐射通量而且影响太阳光谱的分布情况。依据国际电工委员会所给出的标准太阳光谱辐照度分布数据, 可以获得有大



气吸收的到达地面 (AM1.5) 的太阳光谱曲线以及无大气吸收的 (AM0) 大气上界的太阳辐射曲线, 太阳光谱分布曲线如图 1.2 所示。在波长 $0.3 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 波段内的太阳辐射能量约占总辐射能量的 90%, 在无大气吸收情况下, 光谱峰值约在 $0.5 \mu\text{m}$ 附近。

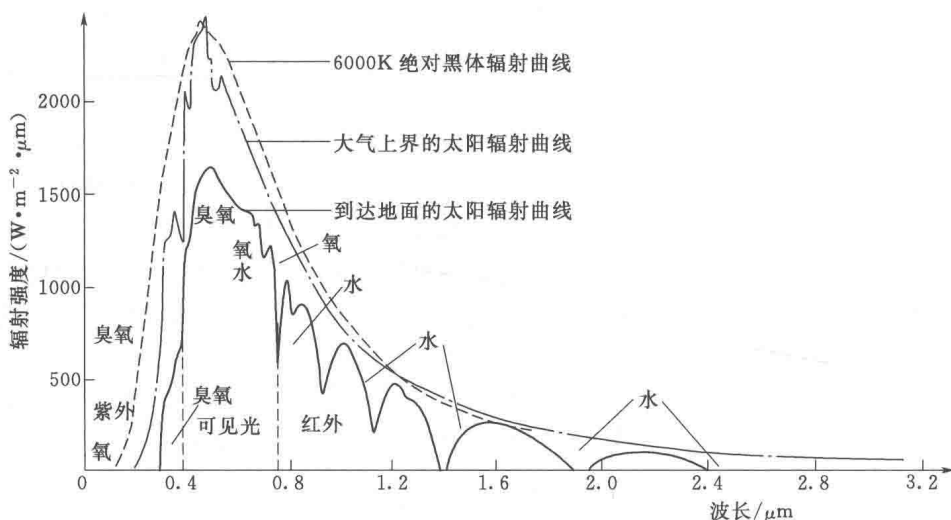


图 1.2 太阳光谱分布曲线

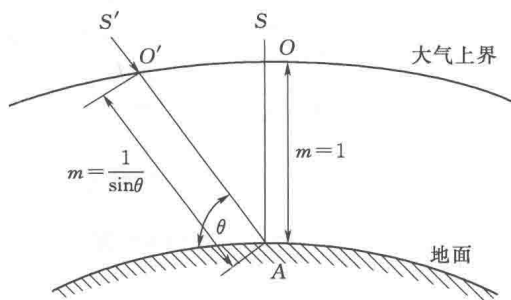


图 1.3 大气质量示意图

如果把太阳在天顶时垂直于海平面的太阳辐射穿过大气的高度作为一个大气质量, 则太阳在任意位置时的大气质量定义为从海平面看太阳通过大气的距离与太阳在天顶时通过大气的距离之比。平常所说大气质量是指相当于“一个大气质量”的若干倍, 大气质量是一个无量纲的量。大气质量示意图如图 1.3 所示。其中, A 为地球海平面上一点, 当太阳在天顶位置 S 时, 太阳辐射穿过大气层到达 A 点的路径为 OA, 而太阳位于

任一点 S' 时, 太阳辐射穿过大气层的路径为 $O'A$ 。则大气质量定义为

$$AM = O'A/OA = 1/\sin\theta \quad (1.1)$$

式中 θ ——直射入地球的太阳光线与地球水平面之间的夹角, 称为太阳高度角。

不同地域大气压力的差异, 反映阳光通过大气距离的不同, 也反映单位面积上大气柱中所含空气质量的不同, 如果 A 点不是处于海平面, 则大气质量需做修正, 即

$$AM = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1}{\sin\theta} \quad (1.2)$$

式中 P ——当地的大气压力;

P_0 ——标准大气压力, $P_0 = 101.3 \text{ kPa}$ 。

如上所述, 太阳在天顶时海平面处的大气质量为 1 即为 AM1 条件; 外层空间不通过大气时大气质量为 0 即 AM0 条件。太阳常数 I_0 为 AM0 条件下的太阳辐射通量。随着太



阳高度的降低,通过大气的光路径变长,大气质量大于1,大气吸收的增加使得到达地面的光辐照度下降。由于地面上 AM1 条件与人类生活地域的实际情况有较大差异,因此通常选择更接近人类生活现实的 AM1.5 条件作为评估地面用太阳电池及组件的标准。此时太阳高度角约为 41.8° ,光辐照度约为 $963\text{W}/\text{m}^2$ 。目前,国际标准化组织将 AM1.5 的辐照度定为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 。

太阳辐射在通过大气层到达地球表面的过程中,不仅受到大气层中的空气分子、水汽及灰尘的散射,而且受到大气中氧、臭氧、水和二氧化碳的吸收,因此到达地面上的太阳辐射发生了显著的衰减,且其光谱分布也发生了一定的变化。具体来说,根据研究人员测得的平均数据,太阳辐射中约有 43% 因反射和散射而折回宇宙空间,另有 14% 被大气所吸收,只有 43% 能够到达地面。但某一地点某一时刻的辐照情况,与当时当地的气象条件影响有关。从理论上较严格、具体地分析太阳辐射经大气层后的衰减情况,其相关因素主要有:

(1) 大气的吸收。

(2) 大气的散射。太阳辐射作为电磁波入射到大气层中时,与大气中物质(气、液、固)内的电子发生相互作用,电磁波的电场使物质中的电子受到加速,这些加速的电子沿不同方向辐射出电磁波。因此,沿原来入射波方向的辐射将有所减弱,所减弱的能量分布到其他方向上去。电磁波的散射是自然界中重要而普遍的现象之一,有着十分广泛的应用。

(3) 大气浑浊度、天气等随机因素所带来的影响。

(4) 由于地球除沿椭圆轨道绕日公转外,还绕地轴自转,因此从地面的观察者的角度来看,太阳在天空中的位置不断变化,这种变化直接影响着到达地面的太阳辐照度,从而决定着地面上可以利用的太阳能。

1.1.3 辐照度与太阳常数

辐照度,即单位面积上与单位时间内接受各种波长辐射能量的数值。由于历史原因,其单位有 $\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 、 W/m^2 、 $\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$ 等。国际单位制中采用 W/m^2 。

人们常把地球大气层上界与太阳光线垂直的单位面积上、单位时间内接受的太阳辐射能,在日地平均距离时的数值称为太阳常数,用符号 I_{sc} 表示。据中外专家测定,该常数为

$$I_{\text{sc}} = 1353\text{W}/\text{m}^2$$

太阳常数 $I_{\text{sc}} = 1353\text{W}/\text{m}^2$ 是地球上所接受的太阳辐照度最大极限值,实际上地球表面上任一处的倾斜或水平的接受面,所截获的太阳辐照度都比太阳常数小。经分析,地球表面上任一处采光面上所截获的太阳辐照度大小取决于太阳与地球距离,太阳相对地球某处、某时刻的相对位置;太阳辐射透过大气层的衰减情况;太阳能利用装置的采光面方位和倾角等。

1981 年 10 月在墨西哥召开的世界气象组织仪器和观测方法委员会第八次会议通过了太阳常数为 $(1367 \pm 7)\text{W}/\text{m}^2$ 的方案。这个数值在太阳活动的极大期和极小期变化都很小,仅为 2% 左右。