



新 能 源 系 列 教 材

太阳能热利用基础



TAIYANGNENG
RE LIYONG JICHU

王晓梅 主编



化学工业出版社



新 能 源 系 列 教 材

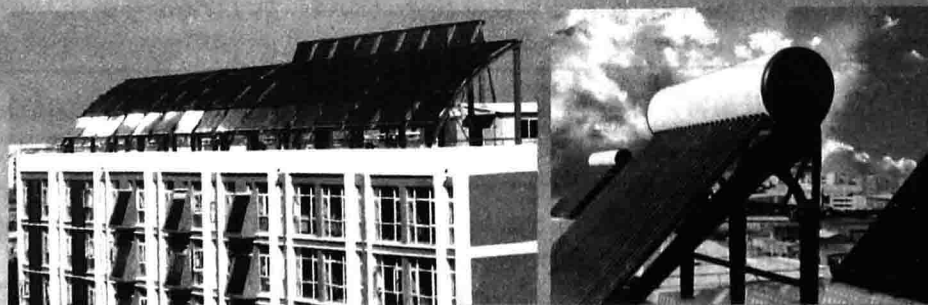
太阳能热利用基础



TAIYANGNENG
RE LIYONG JICHU

王晓梅 主编

张培明 扈恩华 李清杰 副主编



化学工业出版社

本书从太阳能光热转换的基本理论出发,对目前比较成熟的太阳能生活热水系统、太阳能采暖系统、太阳能制冷空调系统等的特点、工作原理及主要性能进行了介绍,并结合典型实例给予具体说明。

本教材可供高职高专太阳能应用技术专业、太阳能建筑一体化专业、新能源应用技术等专业使用,亦可作为企业对太阳能安装员工的岗前培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能热利用基础/王晓梅主编. —北京:化学工业出版社, 2014. 8
新能源系列教材
ISBN 978-7-122-20943-6

I. ①太… II. ①王… III. ①太阳能利用-教材
IV. ①TK519

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 127986 号

责任编辑:刘 哲
责任校对:边 涛

装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京云浩印刷有限责任公司

装 订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 8 $\frac{3}{4}$ 字数 218 千字 2014 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 24.00 元

版权所有 违者必究

前言

太阳能热利用基础
TAIYANGNENG RELIYONG JICHU

太阳能作为当今世界最具发展潜力的新能源之一,由于其具有其他新能源无可比拟的优势,近几年取得了长足的发展。国内太阳能产业高增长的速度、较大的市场空间和较为丰厚的利润,吸引了众多资本聚焦太阳能行业。我国目前太阳能利用产品生产厂商已经超过 4000 家,预计到 2015 年,仅全国住宅用太阳能热水器将达到 2.32 亿平方米的拥有量,普及率将达到 50%,太阳能产业前景被看好。山东是我国太阳能热利用大省,拥有力诺、皇明、桑乐等行业领军企业和海尔、天丰、黄金等一大批太阳能利用产品品牌,形成了济南和德州两个太阳能核心产业基地,拥有完整的太阳能光热产业链。

在太阳能产业因超常规快速发展而显现的一派繁荣的背后,是其人才培养渠道,尤其是高素质技能型专门人才相对薄弱的矛盾愈发凸显,高职高专太阳能技术专业的设置在省内屈指可数,而面向太阳能产业培养高素质技能型专门人才的专业教材就更少。本书将从太阳能光热转换的基本理论出发,对目前比较成熟的太阳能生活热水系统、太阳能采暖系统、太阳能制冷空调系统等特点、工作原理及主要性能进行了介绍,并结合典型实例给予具体说明。

本教材与《太阳能光电利用基础》结合,可供高职高专太阳能应用技术专业、太阳能建筑一体化专业、新能源应用技术等专业使用,亦可作为企业对太阳能安装员工的岗前培训教材。

本书由济南工程职业技术学院王晓梅主编,济南工程职业技术学院张培明、扈恩华,济南市政工程设计研究院(集团)有限责任公司李清杰工程师为副主编。全书主要内容分为四个模块,具体的编写分工为:模块一由济南工程职业技术学院的孙敏和张晓云编写,模块二由济南工程职业技术学院的王晓梅及济南市政工程设计研究院(集团)有限责任公司的李清杰编写,模块三由衢州职业技术学院的廖东进和济南工程职业技术学院的扈恩华共同编写,模块四由济南工程职业技术学院的王晓梅、张蓓共同编写。全书由王晓梅统稿。在编写过程中济南工程职业技术学院肖明和刘强提出了很多宝贵意见,并得到了山东力诺集团、济南市政工程设计研究院(集团)有限责任公司以及山东建筑大学节能研究所的大力支持,在此一并感谢。

由于编者水平有限,书中难免会有不足之处,恳请读者批评指正,不胜感谢。

编者

2014 年 6 月

目 录

太阳能热利用基础
TAIYANGNENG RELIYONG JICHU

绪 论

1

0.1 太阳能利用的意义	1
0.2 太阳能利用的特点	1
0.3 太阳能热利用简史	2
0.4 本书的主要内容	5

模块一 基础理论

7

课题一 太阳辐射学基础	7
1.1 概述	7
1.2 中国的太阳能资源	7
1.3 太阳的能量	8
1.4 地球表面的太阳辐射	9
1.5 测量太阳辐射的主要仪器	16
课题二 流体静力学基础	17
2.1 概述	17
2.2 流体的主要物理性质	17
2.3 流体的静力学基础	19
2.4 流动阻力和能量损失	22
课题三 热力学基础	24
3.1 热力学发展史	24
3.2 热传导	25
3.3 对流换热	26
3.4 辐射换热	26

模块二 太阳能集热技术

35

课题四 太阳能集热器涂层材料	35
4.1 光谱选择性吸收涂层	36
4.2 光谱选择性透过涂层	40
4.3 减反射涂层	41

课题五 太阳能集热器	42
5.1 集热器的基本组成及原理	43
5.2 平板集热器	43
5.3 真空管集热器	49
5.4 热管式真空集热器	52
5.5 聚光集热器	54
5.6 空气集热器	55
课题六 太阳能储热技术	57
6.1 显热储存	57
6.2 相变储存	58
6.3 化学反应储存	59

模块三 太阳能热利用技术应用 61

课题七 太阳能热水系统	61
7.1 太阳能热水系统的分类	61
7.2 自然循环太阳能热水系统	63
7.3 强制循环太阳能热水系统	64
7.4 直流式太阳能热水系统	65
7.5 太阳能热水系统调节、增压及辅助加热设备	66
7.6 管材、附件及管道敷设、保温	68
7.7 热水器的选择及连接方式	71
课题八 太阳能采暖系统	73
8.1 概述	73
8.2 液体太阳能采暖系统	74
8.3 空气太阳能采暖系统	78
8.4 太阳能采暖系统的设计方案	80
课题九 其他太阳能应用系统	84
9.1 太阳灶	84
9.2 太阳能制冷空调	88
9.3 太阳能干燥技术应用	98

模块四 案例集合及分析 102

课题十 太阳能系统案例	102
10.1 山东建筑大学生态公寓案例	102
10.2 太阳能采暖应用系统案例	126
10.3 太阳能应用控制案例	127

附录 130

参考文献 133



绪 论

能源是人类社会运行和发展的基础物质条件，短时期内不可再生的传统化石能源储量的有限性与人类社会日益增长的能源需求之间产生了越来越不可回避的矛盾，传统的能源一天天减少，国际油价持续攀升，而目前全球约有 20 亿人得不到正常的能源供应。与此同时，全球化石能源的大量开采是造成生态破坏的主要原因之一。因此，在当今世界能源紧张，各种能源价格飞涨的形势下，各国都将眼光投向了可再生能源，一则这种能源可再生，取之不尽、用之不竭；再则，可再生能源对环境友好，对地球及人类生存环境的危害几乎可以忽略不计。在可再生能源中，太阳能无疑是最引人瞩目的。

太阳可以说是地球的母亲，是人们每天抬头都能见到的天体，地球上绝大部分的能源都来自于太阳，今天人类所使用的能源也都来自太阳。尽管如此，人类、甚至地球对太阳所赐予的能量的应用仍然十分有限，人类每年消耗的能量只占太阳能总量的 1%~2%。足见人类对太阳能的开发还处于初级阶段，可以说太阳能是未来人类最好的可再生能源。为了人类的可持续发展，对太阳能进行进一步的开发是非常有必要的。

0.1 太阳能利用的意义

太阳能是永不枯竭的清洁能源，是 21 世纪以后人类可期待的最有希望的能源之一，世界各国政府无不对太阳能利用予以相当的重视。

我国是世界上太阳能资源最为丰富的国家之一，太阳能年辐照总量超过 502 万千焦，每年地表吸收的太阳能约相当于 17 万亿吨标准煤。我国北方冬季晴天较多，日照时间普遍较长，太阳辐射强度较大，以北京为例，一月的日照时数为 204.7h，总辐射为 283.4MJ/m²。而许多太阳能利用已经普及的欧洲城市，一月的日照时数仅有几十小时，总辐照只有 100MJ/m² 左右，即我国太阳能资源优势超过欧洲。

我国每平方米太阳能热水器年平均得热量相当于 1000 度电、500kg 煤或 150kg 液化气的得热量，节能效益巨大，作为绿色清洁能源，太阳能更是具有特殊的环保优势。

0.2 太阳能利用的特点

太阳能作为一种能源，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) 资源丰富、随处可用

太阳光普照大地，无论是陆地或海洋，还是高山或岛屿，处处皆有，可直接开发和利



用, 无须开采和运输, 对交通不便的地区尤为有利。

(2) 清洁无污染

开发利用太阳能不会污染环境, 不会产生“三废”、噪声等, 更不会影响生态平衡, 它是最洁净的能源之一, 在环境污染越来越严重的今天, 这一点极其宝贵。

(3) 能量巨大

每年到达地球表面的太阳辐射能约相当于 $6 \times 10^{17} \text{ kW} \cdot \text{h}$, 约合 74 万亿吨标准煤发出的能量, 相当于全球总能耗的几百万倍, 其总量属当今世界上可以开发的最大能源, 也是地球未来的主要能源。

(4) 长久

根据目前太阳产生的核能速率估算, 氢的储量足够维持上百亿年, 而地球的生命也约为几十亿年。从这个意义上讲, 可以说太阳的能量是用之不竭的。

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, 但作为能源利用时, 也有其固有的缺点。

(1) 分散性

尽管到达地球表面的太阳辐射总量很大, 但是能流密度很低。平均来说, 在北回归线附近, 夏季天气较为晴朗的情况下, 正午时太阳辐射的辐照度最大, 在垂直于太阳光方向 1 m^2 面积上接收到的太阳能平均有 1000W 左右; 若按全年日夜平均, 则只有 200W 左右。而在冬季太阳的辐射量大致只有夏季的一半, 阴天一般只有 $1/5$ 左右, 这样的能流密度是很低的。因此, 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, 因此, 到达某一地面的太阳辐照度既是间断的, 又是极不稳定的, 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, 从而最终成为能够与常规能源竞争的替代能源, 就必须很好地解决蓄能问题, 即把晴朗白天的太阳辐射能尽量存储起来, 以供夜间或阴雨天使用。目前蓄能是太阳能利用中较为薄弱的环节之一。

(3) 效率低和成本高

目前太阳能利用的发展水平, 有些方面在理论上是可行的, 技术上也是成熟的, 但有的太阳能利用装置, 因为效率偏低, 成本较高, 总的来说, 其经济性还不能与常规能源相竞争。在今后相当长一段时期内, 太阳能利用的进一步发展, 主要会受到经济性的制约。

0.3 太阳能热利用简史

据记载, 人类利用太阳能已有 3000 多年的历史, 而将太阳能作为一种能源和动力加以利用, 只有 300 多年的历史。真正将太阳能作为“近期急需的补充能源”、“未来能源结构的基础”, 则是近来的事。20 世纪 70 年代以来, 太阳能科技突飞猛进, 太阳能利用日新月异。近代太阳能利用历史可以从 1615 年法国工程师所罗门·德·考克斯在世界上发明第一台太阳能驱动的发动机算起。该发明是一台利用太阳能加热空气使其膨胀做功而抽水的机器。在 1615—1900 年, 世界上又研制成功多台太阳能动力装置和一些其他太阳能装置。这些动力装置几乎全部采用聚光方式采集阳光, 发动机功率不大, 工质主要是水蒸气, 价格昂贵, 实



用价值不高,大部分为太阳能爱好者个人研究制造。20 世纪以来 100 年间,太阳能科技发展历史大体可分为 7 个阶段,下面分别予以介绍。

第一阶段 (1900—1920)

在这一阶段,全世界太阳能研究的重点仍是太阳能动力装置,但采用的聚光方式多样化,且开始采用平板集热器和低沸点工质,装置逐渐扩大,最大输出功率达 73.64kW,实用目的比较明确,但造价仍然很高。建造的典型装置有:1901 年,在美国加州建成的一台太阳能抽水装置,采用截头圆锥聚光器,功率为 7.36kW;1902—1908 年,在美国建造的 5 套双循环太阳能发动机,采用平板集热器和低沸点工质;1913 年在埃及开罗以南建成的一台由 5 个抛物槽镜组成的太阳能水泵,每个长 62.5m,宽 4m,总采光面积达 1250m²。

第二阶段 (1920—1945)

在这 25 年中,太阳能研究工作处于低潮,参加研究工作的人数和研究项目大为减少,其原因与矿物燃料的大量开发利用和发生第二次世界大战(1935—1945)有关,而太阳能又不能解决当时对能源的急需,因此太阳能研究工作逐渐受到冷落。

第三阶段 (1945—1965)

在第二次世界大战结束后的 20 年中,一些有远见的人士注意到石油和天然气资源正在迅速减少,他们呼吁人们重视这一问题,从而逐渐推动了太阳能研究工作的恢复和开展,并且成立了太阳能学术组织,举办学术交流和展览会,再次兴起太阳能研究热潮。在这一阶段,太阳能研究工作取得了一些重大进展,比较突出的有:1955 年,以色列泰伯等在第一次国际太阳热科学会议上提出选择性涂层的基础理论,并研制成实用的黑镍等选择性涂层,为高效集热器的发展创造了条件;1954 年,美国贝尔实验室研制成实用型硅太阳能电池,为光伏发电的大规模应用奠定了基础。此外,在这一阶段还有其他一些重要成果,比较突出的有:1952 年,法国国家研究中心在比利牛斯山东部建成一座功率为 50kW 的太阳炉;1960 年,在美国佛罗里达建成世界上第一套用平板集热器供热的氨-水吸收式空调系统,制冷能力为 5 冷吨;1961 年,一台带有石英窗的斯特林发动机问世。在这一阶段,太阳能基础理论和基础材料的研究得以加强,取得了太阳能选择性涂层和硅太阳能电池等技术上的重大突破;平板集热器有了很大的发展,技术上逐渐成熟;太阳能吸收式空调的研究取得了进展,建成了一批实验性太阳房;对难度较大的斯特林发动机和塔式太阳能热发电技术进行了初步研究。

第四阶段 (1965—1973)

在这一阶段,太阳能的研究工作停滞不前,主要原因是太阳能利用技术处于成长阶段,尚不成熟,并且投资大,效果不理想,难以与常规能源竞争,因而得不到公众、企业和政府的重视和支持。

第五阶段 (1973—1980)

自从石油在世界能源结构中担当主角之后,就成了左右经济和决定一个国家发展的关键因素。在 1973 年 10 月爆发的中东战争中,石油输出国组织采取石油减产、提价等办法,维护本国的利益,其结果是使那些依靠从中东地区大量进口廉价石油的国家,在经济上遭到了沉重的打击。于是,西方一些人惊呼,世界发生了“能源危机”(有的称“石油危机”)。这次“危机”在客观上使人们认识到:现有的能源结构必须彻底改变,应加速向未来能源结构过渡,从而使许多国家,尤其是工业发达国家,重新加强了对太阳能及其他可再生能源技术发展的支持,在世界上再次兴起了开发利用太阳能的热潮。1973 年,美国制定了政府级阳光发电计划,太阳能研究经费大幅度增长,并且成立了太阳能开发银行,以促进太阳能产品



的商业化。日本在 1974 年公布了政府制定的“阳光计划”，其中太阳能的研究开发项目有太阳房、工业太阳能系统、太阳热发电、太阳能电池生产系统、分散型和大型光伏发电系统等。为实施这一计划，日本政府投入了大量人力、物力和财力。20 世纪 70 年代初世界上出现的开发利用太阳能热潮，对我国也产生了巨大影响。一些有远见的科技人员纷纷投身太阳能事业，积极向政府有关部门提建议，出书办刊，介绍国际上太阳能利用动态；在农村推广应用太阳灶，在城市研制开发太阳能热水器，空间用的太阳能电池开始在地面应用……1975 年，“全国第一次太阳能利用工作经验交流大会”在河南安阳召开，进一步推动了我国太阳能事业的发展。这次会议之后，太阳能研究和推广工作纳入了我国政府计划，获得了专项经费和物资支持。一些大学和科研院所纷纷设立太阳能课题组和研究室，有的地方开始筹建太阳能研究所。当时我国也兴起了开发利用太阳能的热潮。这一时期太阳能开发利用工作处于前所未有的大发展时期，具有以下特点。

① 各国加强了太阳能研究工作的计划性，不少国家制定了近期和远期阳光计划。开发利用太阳能成为政府行为，支持力度大大加强。国际间的合作十分活跃，一些第三世界国家开始积极参与太阳能开发利用工作。

② 研究领域不断扩大，研究工作日益深入，取得了一批较大的成果，如 CPC、真空集热管、非晶硅太阳能电池、光解水制氢、太阳能热发电等。

③ 各国制定的太阳能发展计划，普遍存在要求过高、过急问题，对实施过程中的困难估计不足，希望在较短的时间内取代矿物能源，实现大规模利用太阳能，例如，美国曾计划在 1985 年建造一座小型太阳能示范卫星电站，1995 年建成一座 500 万千瓦的空间太阳能电站。事实上，这一计划后来进行了调整，至今空间太阳能电站还未升空。

④ 太阳能热水器、太阳能电池等产品开始实现商业化，太阳能产业初步建立，但规模较小，经济效益尚不理想。

第六阶段（1980—1992）

20 世纪 70 年代兴起的开发利用太阳能热潮，进入 80 年代后不久就开始落潮，逐渐进入低谷。世界许多国家相继大幅度削减太阳能研究经费，其中美国最为突出。导致这种现象的主要原因是：世界石油价格大幅度回落，而太阳能产品价格居高不下，缺乏竞争力；太阳能技术没有重大突破，提高效率和降低成本的目标没有实现，以致动摇了一些人开发利用太阳能的信心；核电发展较快，对太阳能的发展起到了一定的抑制作用。受 80 年代国际太阳能研究低落的影响，我国太阳能研究工作也受到一定程度的削弱，有人甚至提出：太阳能利用投资大、效果差、储能难、占地广，认为太阳能是未来能源，主张外国研究成功后我国直接引进技术。在这一阶段，虽然太阳能开发研究经费大幅度削减，但研究工作并未中断，有的项目还进展较大，而且促使人们认真地审视以往的计划和制定的目标，调整研究工作重点，争取以较少的投入取得较大的成果。

第七阶段（1992 年至今）

由于矿物能源的大量燃烧，造成了全球性环境污染和生态破坏，对人类的生存和发展构成了威胁。在这种背景下，1992 年联合国在巴西召开“世界环境与发展大会”，会议通过了《里约热内卢环境与发展宣言》、《21 世纪议程》和《联合国气候变化框架公约》等一系列重要文件，把环境与发展纳入统一的框架，确立了可持续发展的模式。这次会议之后，世界各国加强了清洁能源技术的开发，将利用太阳能与环境保护结合在一起，使太阳能利用工作走出低谷，逐渐得到加强。“世界环境与发展大会”之后，我国政府对环境与发展十分重视，提出了 10 条对策和措施，明确要“因地制宜地开发和推广太阳能、风能、地热能、潮汐能、



生物质能等清洁能源”，制定了《中国 21 世纪议程》，进一步明确了太阳能重点发展项目。1995 年，国家制定了《新能源和可再生能源发展纲要》（1996—2010），明确提出我国 1996—2010 年新能源和可再生能源的发展目标、任务以及相应的对策和措施。这些文件的制定和实施，对进一步推动我国太阳能事业发挥了重要作用。1996 年，联合国在津巴布韦召开了“世界太阳能高峰会议”，会后发表了《哈拉雷太阳能与持续发展宣言》，会上就《世界太阳能 10 年行动计划》（1996—2005）、《国际太阳能公约》、《世界太阳能战略规划》等重要文件进行了讨论。这次会议进一步表明了联合国和世界各国对开发太阳能的坚定决心，要求全球共同行动，广泛利用太阳能。1992 年以后，世界太阳能利用又进入一个发展期，其特点是：

① 太阳能利用与世界可持续发展和环境保护紧密结合，全球共同行动，为实现世界太阳能发展战略而努力；

② 太阳能发展目标明确，重点突出，措施得力，有利于克服以往忽冷忽热、过热过急的弊端，保证太阳能事业的长期发展；

③ 在加大太阳能研究开发力度的同时，注意将科技成果转化为生产力，发展太阳能产业，加速商业化进程，扩大太阳能利用领域和规模，经济效益逐渐提高；

④ 国际太阳能领域的合作空前活跃，规模扩大，效果明显。

通过以上回顾可知，在 21 世纪 100 年间太阳能发展道路并不平坦，一般每次高潮期后都会出现低潮期，处于低潮的时间大约有 45 年。太阳能利用的发展历程与煤、石油、核能完全不同，人们对其认识差别大，反复多，发展时间长。这一方面说明太阳能开发难度大，短时间内很难实现大规模利用；另一方面也说明太阳能利用还受矿物能源供应、政治和战争等因素的影响，发展道路比较曲折。

0.4 本书的主要内容

目前太阳能作为世界最清洁的能源，其基本利用方式可以分为三大类。

（1）光清洁热利用

将太阳辐射能收集起来，通过与物质的相互作用转换成热能并加以利用，可以分为低温利用（ $<200^{\circ}\text{C}$ ）、中温利用（ $200\sim 800^{\circ}\text{C}$ ）和高温利用（ $>800^{\circ}\text{C}$ ）。目前使用最多的是太阳能收集装置。

（2）太阳能发电

未来太阳能的大规模利用是发电，方式主要有：

① 光-热-电转换，即利用太阳辐射所产生的热能发电，一般用太阳能集热器将所吸收的热能转换为蒸汽，然后由蒸汽驱动汽轮机带动发电机发电，前一过程为光-热转换，后一过程为热-电转换；

② 光-电转换，基本原理是利用光生伏打效应将太阳辐射能直接转换为电能，它的基本装置是太阳能电池。

（3）光化利用

这是一种利用太阳辐射能直接分解水制氢的光-化学转换方式。

本书将从太阳能光热转换的基本理论出发，阐述太阳能热利用技术的特点、工作原理及主要性能，并结合典型实例给予具体说明。主要内容分为 4 个模块，分别为基础理论、太阳能集热技术、太阳能热利用技术应用和典型工程案例。模块一包含三部分，分别为太阳辐射



学基础、流体静力学基础及热力学基础；模块二太阳能集热技术，是太阳能热利用过程的第一步，太阳能集热器是用于将太阳能转化为热能的装置，也是太阳能热利用系统中至关重要的部件，此模块包含两个大方向：热收集和热存储。在集热器中介绍了太阳能集热器的基本类型，并论述了各类集热器的分类、特点及性能。模块三太阳能热利用技术是核心，介绍了当今比较成熟的太阳能热应用范围，包括太阳能热水、太阳能采暖和太阳能制冷空调及太阳灶，并在模块四中配以详细的案例介绍。

模块 一

基础理论

课题一 太阳辐射学基础

1.1 概述

太阳能热利用是指将太阳辐射能转换为热能并加以利用，因此，在太阳能利用的研究领域中，首先必须深入了解太阳辐射能。

本章介绍了太阳辐射学的一些基础知识，内容包括太阳的能量、地球表面的太阳辐射等，引入诸如太阳常数、太阳光谱、大气质量、总辐射、直接辐射、散射辐射等概念，具体分析太阳辐射在大气中的衰减情况，为今后设计太阳能热利用装置提供有关太阳辐射学方面的基本知识。本章还介绍了我国太阳能资源的区域划分，可作为太阳能热利用装置设计的资料依据。

1.2 中国的太阳能资源

中国地处北半球亚欧大陆的东部，主要处于温带和亚热带，具有比较丰富的太阳能资源。

据估算，我国陆地每年接受的太阳能辐射量约为 $5.02 \times 10^{22} \text{J}$ ，相当于 $1.7 \times 10^{12} \text{t}$ 标准煤，数量非常巨大。全国各地太阳能年辐射总量达 $3340 \sim 8370 \text{MJ/m}^2$ ，中值为 5860MJ/m^2 。因此，研究和发展太阳能的利用对我国今后能源与电力的发展有着特别重要的意义。

我国太阳能资源分布的主要特点是：太阳能的高值中心和中值中心都处在北纬 $22^\circ \sim 35^\circ$ 这一带。青藏高原是高值的中心，那里的平均海拔在 4000m 以上，大气透明度好，纬度低，日照时间长。有“日光城”之称的拉萨市，年平均日照时间为 3005.7h ，相对日照为 68% ，太阳年总辐射量为 816kJ/cm^2 。全国以四川省的太阳年辐射总量最小，那里雨多、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 1152.2h ，相对日照仅 26% ，年平均晴天 24.7 天，阴天 244.6 天，年平均云量高达 8.4 ，太阳年辐射量为 $335 \sim 419 \text{kJ/cm}^2$ 。就全国而言，西部地区的太阳年总辐射量高于东部地区，除西藏和新疆外，基本上是南部低于北部。

在北纬 $30^\circ \sim 40^\circ$ 地区，我国太阳能的分布情况与一般太阳能随纬度变化的规律相反。由于南方多数地区云、雾、雨多，太阳辐射能并不是随着纬度的增加而减少，而是随着纬度的

增加而增加。

从太阳能资源开发利用的角度看，还应考虑年日照时数和月平均气温等因素，表 1-1 列出了全国太阳能利用区划系统及分区特征，将全国分为 4 个区：太阳能资源丰富区Ⅰ、太阳能资源较丰富区Ⅱ、太阳能资源较贫乏区Ⅲ和太阳能资源贫乏区Ⅳ。

表 1-1 全国太阳能利用区划系统及分区特征

分区	太阳辐照度 /[MJ/(m ² ·a)]	主要地区	月平均气温≥10℃， 日照时数≥6h 的天数 /天
太阳能资源 丰富区Ⅰ	>6280	新疆南部、甘肃西北一角	275 左右
		新疆南缘、西藏北部、青海西部	275~325
		甘肃西部、内蒙古巴彦淖尔盟西部、青海一部分	275~325
		青海南部	250~300
		青海西南部	250~275
		西藏大部分	250~300
		内蒙古乌兰察布盟、巴彦淖尔盟及鄂尔多斯市一部分	>300
太阳能资源 较丰富区Ⅱ	5020~6280	新疆北部	275 左右
		黑龙江、吉林大部、内蒙古呼伦贝尔盟	225~275
		内蒙古锡林郭勒盟、乌兰察布、河北北部一隅	>275
		吉林、辽宁、长白山地区	<225
		山西北部、河北北部、辽宁大部分、河北大部分、北京、天津、山东西北部、吉林	250~275
		山西南部、河南大部及安徽、山东、江苏部分	200~250
		内蒙古鄂尔多斯市大部分	275~300
		陕北及甘肃东部一部分	225~275
		青海东部、甘肃南部、四川西部	200~300
		四川南部、云南南部一部分	200~250
		西藏东部、四川西部和云南北部一部分	<250
		云南东南一部分	175 左右
		云南西南一部分	175~200
		福建、广东沿海一带	175~200
		海南	225 左右
太阳能资源 较贫乏区Ⅲ	4190~5020	湖南、安徽、江苏南部、浙江、江西、福建、广东北部	150~200
		湖南东部和广西大部分	125~150
		湖南西部、广西北部部分地区、湖北、河南西部	125~175
		四川西部、陕西南部、贵州西部、云南东南一隅、广西西部	150~175
太阳能资源 贫乏区Ⅳ	<4190	四川、贵州大部分	<125
		成都平原	<100

1.3 太阳的能量

太阳是太阳系中最大的一颗星球，也是离地球最近的一颗恒星。目前地球上存在的 92



种化学元素中,有 68 种已在太阳中发现。构成太阳的主要成分是氢和氦,其中,氢占 78.4%,氦占 19.8%;至于种类繁多的金属和其他元素,总计只占 1.8%。太阳的直径约为 $1.392 \times 10^6 \text{ km}$,是地球直径的 109 倍。就体积而论,太阳比地球大 130 多万倍。太阳的体积硕大,其质量亦很可观。根据万有引力定律,在已知地球质量为 $6.0 \times 10^{21} \text{ t}$ 的情况下,可推算出太阳质量为 $1.989 \times 10^{27} \text{ t}$,即太阳质量是地球的 33 万倍,等于所有太阳系所有行星质量总和的 745 倍。知道了太阳系的体积和质量,就可求出太阳系的平均密度为 1.4 g/cm^3 ,即比水的密度约大 50%,实际上太阳内部的密度各处相差悬殊,外层的密度很小,内部在承受外部巨大压力的情况下,密度高达 160 g/cm^3 。正因如此,日心引力要比地心引力大 29 倍左右。

粗略地讲,太阳是由大气和内部两大部分组成的。太阳大气自里向外分为光球、色球和日冕 3 个层次,太阳内部自外向内侧是对流层、中间层和核心 3 个层次。

虽然从远处望去,太阳像是一个稳定的发光体,但其实它时刻都处在剧烈的运动之中,黑子群的出没、日珥的变化、耀斑等爆发等都是明证。此外,通过天文望远镜还可以观察到变化的米粒组织、针状物、喷焰、冲浪等。

太阳一刻不停地向四周空间放射出巨大的能量,其总量每秒可达 $3.865 \times 10^{17} \text{ J}$,相当于每秒烧掉 $1.32 \times 10^{16} \text{ t}$ 标准煤所释放出来的能量。而地球大气层所接收到的能量仅是其中的 22 亿分之一。尽管如此,每秒也有 $1.757 \times 10^{17} \text{ J}$,折合标准煤约 $6 \times 10^6 \text{ t}$ 。换句话说,假设整个太阳都是由煤构成的,如果按照这种烧法,只要几千年就烧光了。

那么,太阳的能量到底是怎么产生的呢?根据爱因斯坦相对论,通过热核反应,质量可以转化为能量。太阳表面的温度约为 6000 K ,而内部的温度可高达一两千万度,内部压力为 340 多亿兆帕。由于太阳内部的温度极高,压力极大,物质早已离子化,呈等离子体态。不同元素的原子核相互碰撞,引起一系列核子反应。

太阳的能源包括两类核子反应:一类是碳-氮循环过程,另一类是质子-质子循环过程。这两类反应都使 4 个氢原子核(质子)合成 1 个氦原子核(α 粒子)。

氢原子核的质量为 $1.672 \times 10^{-24} \text{ g}$,氦原子核的质量为 $6.644 \times 10^{-24} \text{ g}$ 。从 4 个质子形成一个 α 粒子的质量消耗为

$$\Delta m = (4 \times 1.672 - 6.644) \times 10^{-24} = 0.044 \times 10^{-24}$$

根据爱因斯坦相对论,有

$$E = mc^2 \quad (1-1)$$

式中, m 为质量; c 为真空加速度,值为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

太阳为了维持每秒 $3.865 \times 10^{26} \text{ J}$ 能量的辐射,要消耗掉的氢氦燃料的质量为

$$m = \frac{E}{c^2} = 3.865 \times 10^{26} / (3 \times 10^8)^2 = 4.29 \times 10^9 \text{ kg}$$

已知太阳质量为 $1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$,因而按目前的太阳辐射水平,太阳上氢含量足够维持 800 亿年。这个数字比由地质材料得出的地球年龄 46 亿年还大一个数量级。因此,原子核反应能够长期维持太阳的巨大辐射,可以说是取之不尽、用之不竭的。

1.4 地球表面的太阳辐射

1.4.1 太阳常数

太阳常数 I_0 是指在日地平均距离时,地球大气上界垂直于太阳光线的单位面积上,在单位时间内所接受到的太阳辐射的辐照度。其单位一般采用 kW/m^2 。

众所周知，地球每天绕地轴自西向东自转一周。每转一周（ 360° ）为一昼夜，一昼夜又分为 24h，所以地球每小时自转 15° 。地球除了自转外，还围绕太阳循着偏心率很小的椭圆轨道（黄道）运行，称为“公转”，地球在黄道上公转一周为一太阳年。这就说明太阳到地球之间的距离不是一个常数。如 1 月 1 日是近日点，日地距离 $1.471\times 10^8\text{km}$ ；7 月 1 日是远日点，日地距离 $1.521\times 10^8\text{km}$ ，一年中每天的日地距离都不一样。对于光和热来说，某一点的辐射强度与距光源（或热源）的距离平方成正比，这就意味着地球大气上界的太阳辐照度随日地距离不同而异。然而，由于日地间距很大，当日地距离等于其平均距离时，太阳张角才 $32'$ ，也就是说，地球大气层外的太阳辐照度几乎是一个常数。因此人们使用“太阳常数”来描述大气上界的太阳辐照度。

由于世界各地所定的太阳常数标度不统一，因此太阳常数的数值有差异。现在已能用气球、火箭、卫星等高新技术在空间进行测量，提高了太阳常数的测量精度。1981 年 10 月召开的世界气象组织仪器和观测方法委员会会议上，确定了太阳常数的数值为 $1367\text{W}/\text{m}^2$ 。

决定太阳常数的数值具有很重要的意义，因为掌握太阳辐射在大气中减弱的规律后，就可以根据已知的太阳常数计算出地面上的太阳辐照度。

1.4.2 太阳光谱

太阳表面的温度高达 6000°C ，因而太阳物质不可能是固体或液体，而是高温气体，它发射出连续光谱。所谓连续光谱，就是说它发射的光是由连续变化的不同波长的光混合而成，只要用三棱镜，就能把这种光束分解成红、橙、黄、绿、青、蓝、紫连续排列的各色光，也就是按波长分解成连续排列的各色光。由此可见，太阳的白光是由许多不同的单色光组合起来的。上面谈到的由各种颜色排列起来的光，都是人的眼睛可以看见的，所以叫做可见光谱，它的波长范围为 $0.4\sim 0.76\mu\text{m}$ 。在可见光中，波长较长的部分相当于红光，波长较短的部分相当于紫光，中间各色光排列的次序，就像前面列举的那样。可见光谱的能量约占太阳光辐射能量的 40.3% 。

其实，可见光只占太阳光谱中一个极窄的波段。波长比红光更长的光叫做红外光谱。红外光谱波长大于 $0.76\mu\text{m}$ ，波长超过 $0.8\mu\text{m}$ 的红外线不能引起光化学反应（光合作用），仅能提高植物的温度并加速水分的蒸发。红外光谱区的能量约占太阳光辐射能量的 51.4% 。

波长比紫光更短的光叫做紫外光谱，为不可见光。波长小于 $0.4\mu\text{m}$ 的紫外线，有杀菌作用，但大量波长短于 $0.3\mu\text{m}$ 的紫外线对植物生长有害。紫外光谱约占太阳光辐射能量的 8.3% 。

太阳辐射能主要分布在 $0.4\sim 3.0\mu\text{m}$ 这个范围内，即集中在可见光和红外光谱区，表 1-2 列出了各种不同颜色光的波长，表 1-3 列出了不同光区的太阳辐射能量数值。

表 1-2 各种不同颜色光的波长

颜色	波长/ μm	标准波长/ μm
紫	0.390~0.455	0.430
蓝	0.455~0.485	0.470
青	0.485~0.505	0.495
绿	0.505~0.550	0.530
黄—绿	0.550~0.575	0.560
黄	0.575~0.585	0.580
橙	0.585~0.620	0.600
红	0.620~0.760	0.640



表 1-3 不同光区的太阳辐射能量数值

光区	紫外光区	可见光区	红外区
波长范围/ μm	0~0.40	0.40~0.76	0.76~ ∞
相应的辐射能流密度/(W/m^2)	95	640	618
所占总能量的百分数/%	8.3	40.3	51.4

太阳发出的辐射对于地球来说是至关重要的。地球上的气候完全受其入射量及其与地球大气、海洋和陆地相互作用的制约。地球接收到的太阳辐射能哪怕只有千万分之一的变化，只要是持续不断的，就会对气候产生重要的影响。

1.4.3 地面上的太阳辐射

到达地面的太阳辐射有两部分：一部分是太阳以平行光线的形式直接投射到地面上的，称为太阳直接辐射；另一部分是经过散射后由天空投射到地面的，称为散射辐射。太阳直接辐射与散射辐射之和称为总辐射。

(1) 直接辐射

太阳直接辐射的强弱与许多因子有关，其中最主要的有两个：太阳高度角和大气透明度。

① 太阳角的计算

a. 太阳的赤纬角与时角 地球公转一周形成四季，四季的重要特征有两点：一是气温高低不同，二是昼夜长短互异。四季的形成主要是由赤纬角 δ 的变化引起的。太阳光线与地球赤道平面夹角称为太阳赤纬角，简称赤纬，用 δ 表示，它是以为年为周期的变化量，并规定以北为正值。图 1-1 表示地球绕太阳运行的 4 个典型季节日的地球公转行程，图 1-2 表示对应于上述 4 个典型季节日地球受到太阳照射的情况。

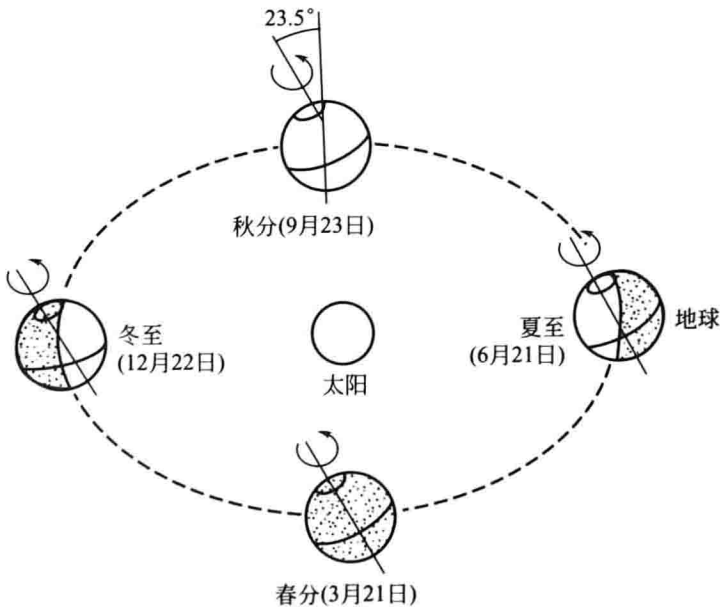


图 1-1 地球绕太阳运行示意图

由于地球绕太阳公转，每天地球都处在运转轨道的不同点，即每天太阳光线直射在地球上的纬度都不相同。例如，太阳光线在夏天最大变化到夏至日（约 6 月 21 日），正午时投射于北纬 $23^{\circ}27'$ ；冬天最小变化到冬至日（约 12 月 22 日），正午时投射于南纬 $23^{\circ}27'$ ；在春