

中央广播电视大学教材

光伏技术 与应用概论

GUANGFU JISHU
YU YINGYONG GAILUN

周潘兵 等编



中央广播电视大学出版社

中央广播电视大学教材

光伏技术与应用概论

周潘兵 等编

中央广播电视大学出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

光伏技术与应用概论/周潘兵等编. —北京: 中央广播电视大学出版社, 2011. 8

中央广播电视大学教材

ISBN 978 - 7 - 304 - 05173 - 0

I. ①光… II. ①周… III. ①太阳能发电—广播电视大学—教材 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 146258 号

版权所有, 翻印必究。

中央广播电视大学教材

光伏技术与应用概论

周潘兵 等编

出版·发行: 中央广播电视大学出版社

电话: 营销中心 010 - 58840200 总编室 010 - 68182524

网址: <http://www.crtvup.com.cn>

地址: 北京市海淀区西四环中路 45 号 邮编: 100039

经销: 新华书店北京发行所

策划编辑: 杜建伟

版式设计: 何智杰

责任编辑: 王国华

责任版式: 韩建冬

责任印制: 赵联生

责任校对: 张 娜

印刷: 北京云浩印刷有限责任公司

印数: 0001~3000

版本: 2011 年 8 月第 1 版

2011 年 8 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 12.75 字数: 283 千字

书号: ISBN 978 - 7 - 304 - 05173 - 0

定价: 20.00 元

(如有缺页或倒装, 本社负责退换)

光伏发电技术及应用专业系列 教材编写委员会

主 任	沈建华	江西广播电视大学
	罗玉峰	新余学院
副主任	钟志贤	江西广播电视大学
	谷 良	中央广播电视大学
委 员	陈江鸿	江西广播电视大学
	廖卫兵	新余学院
	曾宪宁	江西广播电视大学
	邹运明	江西广播电视大学
	黄纯斌	江西广播电视大学
	陈 丽	江西广播电视大学
秘书长	陈 丽	江西广播电视大学

前言

太阳能是取之不尽、用之不竭的无污染的清洁能源，在人类发展中起着举足轻重的作用。太阳能光伏产业是21世纪最具竞争力的朝阳产业之一。科学的发展和技术的竞争最终还是靠人才。太阳能光伏产业刚刚起步，技术人才缺乏，培养人才是当务之急。为了产业的发展和人才的培养，编写优良的光伏教材具有重大的意义。

光伏产业链包括硅料、硅片、电池片、电池组件、应用系统五个环节。本课程是学习光伏发电技术及应用专业（专科）其他课程的基础，是学生掌握光伏发电技术及应用专业（专科）知识的第一道门槛。全书总共7章，由太阳能及其开发利用、太阳辐射知识、光伏技术发展概要、光伏材料、太阳电池、光伏发电系统及光伏技术的典型应用组成；主要从太阳能的开发利用，太阳的辐射知识，光伏材料、光伏电池的工作原理及制备技术，光伏发电系统的种类、应用，光伏技术的发展及典型应用等方面综合阐述。学生学习时应注重知识的广度，而不是强调知识的深度，要以光伏产业链为学习的主线，重点掌握各章的基本原理和基本概念，以及它们之间的相互关系。本书难度适中，容易读懂，适合大中专院校学生作为教材和光伏产业的技术人员阅读。

本书由南昌大学太阳能光伏学院和江西广播电视大学合作编写。具体分工如下：第1章由南昌大学太阳能光伏学院周潘兵编写；第2章由江西广播电视大学陈江鸿编写；第3章由江西广播电视大学邹运明编写；第4~7章由江西广播电视大学陈丽编写。全书由周潘兵、陈丽负责统稿。

由于编者水平有限、经验不足且时间仓促，书中难免存在错误和疏漏之处，欢迎广大读者提出宝贵意见，使本书不断改进、不断完善。

编 者

2011年4月

目 录

专业学习指南	(1)
第 1 章 太阳能及其开发利用	(6)
1.1 太阳简介	(7)
1.1.1 太阳的质量与能量	(7)
1.1.2 太阳的结构和能量传递方式	(7)
1.2 太阳能利用的分类	(9)
1.3 太阳能开发利用的步骤	(9)
1.3.1 太阳能采集	(9)
1.3.2 太阳能转换	(10)
1.3.3 太阳能储存	(10)
1.3.4 太阳能输送	(10)
1.4 太阳能开发利用的特点	(10)
1.5 太阳能开发利用的历史	(12)
第 2 章 太阳辐射知识	(18)
2.1 地球绕太阳的运行规律	(19)
2.2 太阳常数和太阳光谱	(20)
2.2.1 太阳常数	(20)
2.2.2 太阳光谱	(21)
2.3 地球表面的太阳辐射	(23)
2.3.1 大气光学质量	(23)
2.3.2 大气的吸收、散射、反射	(24)
2.4 日照量的计算和测量	(25)
2.4.1 太阳光辐照度	(25)
2.4.2 测量仪表	(26)
2.5 世界和我国太阳能资源分布情况	(27)
2.5.1 气候带的划分	(27)
2.5.2 世界太阳能资源分布	(27)
2.5.3 我国太阳能资源分布	(27)

第3章 光伏技术发展概要	(32)
3.1 光伏技术的产生	(33)
3.1.1 光生伏特效应的发现	(33)
3.1.2 光生伏特效应	(33)
3.2 光伏技术的发展与现状	(35)
3.2.1 太阳能光伏已成为全球发展最快的能源	(35)
3.2.2 提高转换效率、降低成本是光伏技术发展的关键	(36)
3.2.3 光伏新技术发展日新月异	(36)
3.2.4 光伏产业发展现状与潜在风险分析	(37)
第4章 光伏材料	(46)
4.1 半导体材料简介	(47)
4.1.1 半导体材料的定义及分类	(47)
4.1.2 半导体材料的特性参数	(49)
4.1.3 半导体器件材料的特性要求	(49)
4.1.4 半导体硅材料	(50)
4.2 太阳能电池硅晶材料	(52)
4.2.1 单晶硅材料	(53)
4.2.2 铸造多晶硅材料	(53)
4.2.3 单晶硅与铸造多晶硅材料的应用与区别	(55)
4.2.4 高纯硅料在光伏产业链中的地位	(55)
4.2.5 未来硅材料发展趋势及预测	(56)
4.3 太阳能电池硅材料的制备	(59)
4.3.1 冶金级硅生产工艺	(60)
4.3.2 高纯多晶硅的生产	(60)
4.3.3 单晶硅的生产	(68)
4.3.4 铸造多晶硅的生产	(72)
4.3.5 太阳能电池硅片加工	(75)
4.4 薄膜电池材料	(85)
4.4.1 多晶硅薄膜电池材料	(85)
4.4.2 非晶硅薄膜电池材料	(86)
4.4.3 多元化合物薄膜电池材料	(87)
4.5 GaAs 半导体材料	(88)
4.6 其他太阳能电池材料	(88)

4.6.1 聚合物电池材料	(88)
4.6.2 纳米晶化学电池材料	(88)
第5章 太阳电池	(93)
5.1 太阳电池的基本原理	(94)
5.2 太阳电池的工艺简介	(96)
5.3 太阳电池的基本特性	(108)
5.3.1 等效电路	(108)
5.3.2 输出特性	(108)
5.3.3 短路电流	(109)
5.3.4 开路电压	(110)
5.3.5 太阳电池伏安特性曲线	(110)
5.3.6 填充因子	(110)
5.3.7 转换效率	(111)
5.3.8 太阳电池的光谱响应	(111)
5.4 太阳电池的种类	(112)
5.4.1 晶体太阳电池	(112)
5.4.2 薄膜太阳电池	(115)
5.5 太阳电池的发展趋势	(124)
5.6 太阳电池技术面临的问题	(128)
5.6.1 太阳电池的转换效率问题	(129)
5.6.2 太阳电池的材料和制造工艺问题	(131)
5.7 太阳电池组件	(134)
5.7.1 太阳电池组件的类型	(134)
5.7.2 太阳电池组件的封装材料	(136)
5.7.3 太阳电池组件的封装工艺	(140)
5.7.4 太阳电池组件的产业化	(141)
第6章 光伏发电系统	(146)
6.1 太阳能光伏发电系统的种类和用途	(147)
6.2 独立光伏发电系统	(149)
6.2.1 独立光伏发电系统的特点及用途	(150)
6.2.2 独立光伏发电系统的构成	(150)
6.2.3 独立光伏发电系统的种类	(153)
6.2.4 独立光伏发电系统设计方法	(155)

6.3 并网光伏发电系统	(157)
6.3.1 有逆流型并网系统	(158)
6.3.2 无逆流型并网系统	(158)
6.3.3 切换型并网系统	(159)
6.3.4 直、交流型并网系统	(159)
6.3.5 地域型并网系统	(160)
6.3.6 孤岛效应	(160)
6.3.7 某 100 kWp 太阳能光伏并网发电系统设计方案	(161)
6.4 混合系统	(169)
6.4.1 光、热混合太阳能光伏系统	(169)
6.4.2 光、柴混合太阳能光伏系统	(170)
6.4.3 风、光互补太阳能光伏系统	(170)
6.5 技术标准和认证	(171)
第 7 章 光伏技术的典型应用	(176)
7.1 光伏建筑一体化 (BIPV)	(177)
7.1.1 光伏建筑一体化 (BIPV) 的概念	(177)
7.1.2 光伏建筑一体化 (BIPV) 应用的意义	(177)
7.1.3 光伏建筑一体化 (BIPV) 的主要形式	(178)
7.1.4 光伏建筑一体化 (BIPV) 的主要优缺点	(180)
7.1.5 光伏建筑一体化 (BIPV) 的未来展望	(181)
7.2 用户太阳能电源	(182)
附录 1 单晶硅棒的主要技术参数	(187)
附录 2 某企业的单晶硅电池片技术参数表	(188)
附录 3 主要光伏企业和研究机构一览表	(189)
附录 4 光伏电池产业链各环节间的关系和光伏电池 产业链流程与各环节的主要设备	(192)
参考文献	(193)

专业学习指南

引 言

近年来,国内外光伏产业发展迅速,产业人才需求急剧升温,为适应我国光伏发电产业的发展、满足地方经济社会发展对光伏应用型高等专业人才的需要、构建应用型光伏发电技术及应用专业课程平台、增强专业的适用性,中央广播电视大学和江西广播电视大学进行了认真细致的专业需求调研,在现有开放教育专业课程的基础上,开设光伏发电技术及应用专业(专科)。

太阳能光伏发电技术作为太阳能利用中最具现实意义的技术,已成为世界各国竞相研究应用的热点。

在国际上,日本、德国、美国等发达国家走在光伏发电技术研究与应用的前列,如日本的太阳能发电容量占世界太阳能发电总容量的 50%,2010 年的光伏发电使用量达到 482 万 kW。

在国内,“十一五”期间,我国一方面以户用光伏发电系统和建设小型光伏电站为主,建设光伏发电容量 20 万 kW,为 200 万户偏远地区农牧民(即目前我国无电人口的三分之一)提供最基本的生活用电;另一方面借鉴发达国家发展屋顶系统的经验,在经济较发达、城市现代化水平较高的大中城市,在公益性建筑物和其他建筑物以及在道路、公园、车站等公共设施照明中推广使用光伏电源,2010 年建设总容量 5 万 kW 的屋顶光伏发电项目。此外,我国还开展了大型并网光伏发电系统的示范,为在光伏发电成本下降到一定水平时开展大型并网光伏系统的大规模应用作准备。“十一五”末期,光伏系统这三方面的应用总量达到约 40 万 kW。目前,中国光伏产业连续两年产量居世界第一。2008 年太阳电池的产量是 2 500 MW。继 2005 年无锡尚德在纽约证券交易所上市以来,浙江昱辉、天威英利、河北晶澳、天合光能、南京中电、江苏林洋、江西赛维 LDK、江西晶科能源等十多家重量级国内光伏企业相继在国外上市,大力推动中国光伏产业走向一个新的发展阶段,江西、四川、河北、江苏、青海、宁夏、云南、上海、甘肃、安徽、北京、海南、内蒙古、湖北、浙江都已形成规模以上光伏产业群。

光伏产业的发展获得了政府及政策的强力支持。例如,2009 年 3 月 23 日,财政部、住

房和城乡建设部出台《关于加快推进太阳能光电建筑应用的实施意见》与《太阳能光电建筑应用财政补助资金管理暂行办法》。2009年7月21日,财政部、科学技术部、国家能源局联合宣布在我国正式启动金太阳示范工程,三部门联合印发了《关于实施金太阳示范工程的通知》,决定综合采取财政补助、科技支持和市场拉动方式,加快国内光伏发电的产业化和规模化发展,并计划在2~3年内,采取财政补助方式支持不低于500 MW的光伏发电示范项目。2009年国家出台的政策推动了国内光伏发电市场的发展,中国的光伏发电市场“已经开始启动”。又如,国家发展和改革委员会在《可再生能源发展“十一五”规划》中提出2010年光伏发电要达到10万kW,在我国政府强有力的政策引导下,光伏产业不仅让国内企业看到了机遇,而且已经吸引了世界的目光。再如,江西省政府已制定光伏产业重点支持发展规划,要在现有规模的基础上将光伏产业建设成为世界级的产业集群。等等。

我国光伏产业发展快速,其技术水平与自动化程度等也在不断提高,在促进地方经济发展的同时,也提供了大量就业机会。光伏发电产业不仅是资金密集型企业,同时也是一个劳动密集型的产业。比如,目前江西新余工业园区的江西赛维LDK公司员工就达到1.3万人(根据公司发展,预计2012年可达8万人),整个中国光伏技术及产业的就业总人数达十余万人。根据中国电力专家的研究:2050年,光伏发电将达到装机容量10亿kWp^①,年生产和安装量将达1亿kWp,就业人口将超过500万人。

在我国光伏产业蓬勃发展的同时,光伏人才的培养却出现了滞后,这使得我国光伏产业在自主研发和创新上远远落后于德国、日本和美国等国家,光伏产业的关键技术都掌握在这些光伏强国手中。能否培养出自己的高素质光伏人才成为我国光伏产业能否持续发展的关键。为此,最近几年,许多地区在我国还没有统一的光伏产业相关教育政策情况下,在制定本地区光伏产业发展规划的同时,出台了相关科研、人才方面的实施意见。

例如,江西省委省政府在《江西省光伏产业发展规划》中要求教育部门调整招生计划、专业设置和课程安排,到2012年,力争为光伏产业培养20名博士、200名硕士、2万名本科生、4万名高职生、6万名中职生;在《关于加快光伏产业人才培养工作的实施意见》中要求全省各高校、各中等职业学校要站在全局的高度,以强烈的责任感和紧迫感加快光伏产业人才培养工作,并提出全省高校、中等职业学校要紧紧围绕加快光伏产业人才培养工作,集中人力、物力、财力,全力以赴做好整合教育资源、调整专业结构、扩大培养规模、深化教学改革等工作,力争到2015年,新设置1所本科太阳能光伏学院、1所太阳能职业学院、1批光伏本科和高职专业,建立6个光伏中等职业教育基地,为全省光伏产业培养各层次毕业生10万人。

又如,广西壮族自治区政府在扶持发展光伏产业的措施建议中和河南省安阳市在鼓励发展光伏产业的若干规定中都指出,要加大光伏产业的科研投入,强化光伏产业人才的培养。福建省出台了建设太阳能光伏产业实训基地的具体实施意见,要求福建大学等省内14所高

^① Wp 即峰值瓦,是太阳能电池的能量单位,代表在大气质量AM1.5、太阳辐射1000 W/m²时,太阳的输出功率W。

等院校共建实训基地,在材料科学与工程、光信息科学与技术、电子信息工程、物理学、应用物理学等专业开设 LED 和太阳能光伏产业方向,制订人才培养计划,面向相关企业培养适用人才。根据江西广播电视大学所属分校的分析,新余广播电视大学、上饶广播电视大学、萍乡广播电视大学、抚州广播电视大学都有很好的光伏应用专业的生源条件。因此,我们认为,随着国家光伏产业的发展以及国家光伏产业有关具体规划和实施意见的进一步健全与完善,相关政策也必定随之出台,以保证和促进光伏产业健康、持续发展。

目前,我国高校专门培养从事光伏产业工作的学生的专业还不多。其一,国内目前的光伏专业教育形式皆为全日制教学,且专业设置数量有限,人才缺口较大,专业人才培养存在断层的倾向。其二,光伏专业的远程开放教育及成人教育类型几近空白,而电大(即广播电视大学,后同)开放教育是高等教育的重要组成部分,是现代远程教育的主流和引领,其人才培养模式适时针对经济和社会发展的现实需要,培养对象以在职成人为主,能提供适合从业人员学习需求的专业和课程,整合优化的学习资源,以及天网、地网和人网合一的学习环境,以学习者自主学习为主,实施严格而有弹性的过程管理,培养能留得住、用得上的应用型高等专门人才;其“五统一”(教学计划、课程标准、教材、考试、评分标准)和“五要素”(教学资源、过程、学习支持服务、教学管理、系统运作)的质量保证体系能确保人才培养质量。其三,根据电大开放教育的特点,开设光伏发电技术及应用专业能满足行业人员学用结合、理论与实践相融合的需求,克服目前已有全日制光伏专业人才培养的局限,发挥错位竞争的优势。因此,开设光伏发电技术及应用专业的社会需求具有广泛的现实基础,社会需求量巨大,电大开放教育有责任,也有能力承担加快光伏产业人才培养工作的使命。

我国各级政府关于光伏产业发展的积极规划为光伏专业的生源提供了政策保障,强调专业实践能力、学以致用、知识与技能不断更新的光伏行业的人才需求为生源提供了现实基础。例如,江西省委省政府在《江西省光伏产业发展规划》和《关于加快光伏产业人才培养工作的实施意见》中对光伏产业人才培养的要求,以及江西省良好的光伏产业发展背景为电大开设光伏发电技术及应用专业提供了良好的生源保证。此外,四川、江苏、河北等省也有较大规模的相关产业基地,各地光伏专业人才的需求与专业建设滞后的矛盾比较突出。因此,光伏发电技术及应用专业的人才需求很大,就业市场前景广阔。

光伏发电技术及应用专业面向光伏发电系统或行业,培养德、智、体、美全面发展,适应光伏发电产业发展需要,具有光伏发电基础理论知识,系统掌握光伏发电及应用技术,具有现代企业管理意识,能在光伏发电及应用领域,包括电能检测、设备控制、发电技术管理等方面胜任岗位需要的高级技术应用型人才。

光伏发电技术及应用专业开设的课程主要分为公共基础课、专业基础课、专业课、专业拓展课、通识课和实践课六大模块,见表1、表2。

表 1 光伏发电技术及应用（光伏材料与器件方向）专业课程结构

课程模块	课程类型	具 体 课 程
公共基础课	统设必修课	邓小平理论和“三个代表”重要思想概论、开放教育入学指南、英语 I（1）、计算机应用基础、高等数学基础
	选修课	英语 I（2）、大学物理导论
专业基础课	统设必修课	电工电子技术、光伏技术与应用概论、机械制图、机械制造基础
	选修课	计算机绘图
专业课	统设必修课	光伏电池原理与工艺、光伏电池材料、光伏检测与分析
	选修课	光伏新技术讲座、光伏应用产品设计及制造
专业拓展课	选修课	硅材料科学与技术、光伏专用装备原理及维护
通识课	中央广播电视大学设置统一的通识课程平台	
实践课	统设必修课	电工与电子学实验、金工实习、综合实训（光伏）

表 2 光伏发电技术及应用（光伏电池与系统方向）专业课程结构

课程模块	课程类型	具 体 课 程
公共基础课	统设必修课	邓小平理论和“三个代表”重要思想概论、开放教育入学指南、英语 I（1）、计算机应用基础、高等数学基础
	选修课	英语 I（2）、大学物理导论
专业基础课	统设必修课	电工电子技术、光伏技术与应用概论、机械制图、机械制造基础
	选修课	计算机绘图
专业课	统设必修课	光伏电池原理与工艺、光伏发电系统设计与应用、光伏检测与分析
	选修课	光伏新技术讲座、光伏应用产品设计及制造
专业拓展课	选修课	工程计价与计量、光伏建筑一体化技术与应用
通识课	中央广播电视大学设置统一的通识课程平台	
实践课	统设必修课	电工与电子学实验、金工实习、综合实训（光伏）

专业课程学习重点

专业课程的先修课程为高等数学基础、大学物理导论、电工电子技术、机械制造基础等。

光伏技术与应用概论课程开设于第二学期，4 学分，课内学时 72 学时。它是学习光伏发电技术及应用专业（专科）其他各专业课程的基础，是学生掌握光伏发电技术及应用专业（专科）知识的第一道门槛，学生学习时应注重知识的广度，而不是强调知识的深度，要以光伏产业链为学习的主线，重点掌握各节点的基本原理和基本概念，以及它们之间的相

互关系。

光伏电池原理与工艺课程开设于第三学期，4 学分，课内学时 72 学时。重点需要学生掌握半导体的基本知识，包括半导体的导电性、pn 结、半导体表面理论、半导体的光学性质和光电效应等。

光伏电池材料课程开设于第四学期，4 学分，课内学时 72 学时。是光伏发电技术及应用专业（光伏材料与器件方向）的一门主干专业课程，重点需要学生掌握基本的物理、化学、电工电子、机械的基本概念、定理以及光伏电池材料的基本特性、制备原理、制备技术等，熟知光伏电池发展的现状及前景。

光伏发电系统设计及应用课程开设于第四学期，4 学分，课内学时 72 学时。是光伏发电技术及应用专业（光伏电池与系统方向）的一门主干专业课程，重点需要学生掌握光伏发电系统设计与应用基本理论知识，具备初步独立开发光伏发电系统的能力。

光伏检测与分析课程开设于第四学期，3 学分，课内学时 54 学时。主要讲授光伏测量仪器的构造、原理和使用方法，重点使学生掌握常见仪表的构造、原理及使用和维护方法，能够排除简单故障。

光伏新技术讲座课程开设于第四学期，2 学分，课内学时 36 学时。主要讲授光伏新技术领域发展现状及趋势。

光伏应用产品设计及制造课程开设于第四学期，4 学分，课内学时 72 学时。主要介绍典型光伏产品，如光伏路灯、光伏信号灯、草坪灯、便携电源等的设计及制造工艺知识。

实践环节要求

光伏发电技术及应用专业实践环节主要包括电工与电子学实验、金工实习、综合实训（光伏）。

电工与电子学实验 2 学分，金工实习 4 学分，综合实训（光伏）10 学分，均为光伏发电技术及应用专业必修实践环节。

第 1 章

太阳能及其开发利用

学习目标

- 熟练掌握：太阳能利用的分类。
- 掌握：太阳能开发利用的步骤和特点。
- 了解：太阳能开发利用的历史。

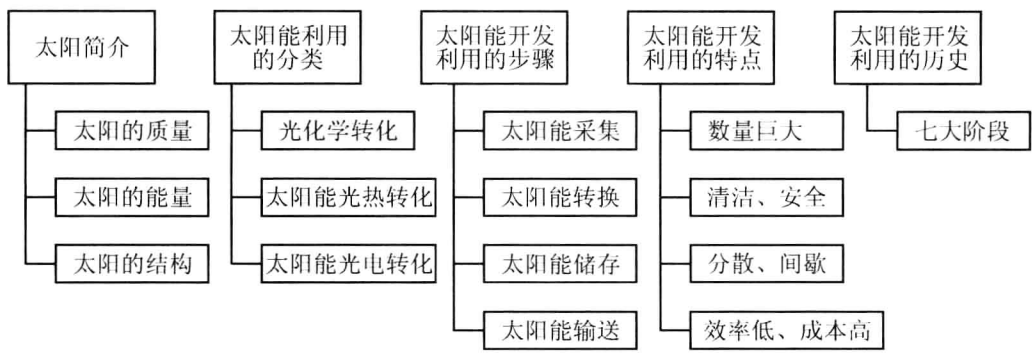
学习重点

太阳能利用的分类。

关键词

太阳 太阳能 光化学 光热 光电 采集 转换 储存 输送 可再生

本章知识结构图



对于人类而言,太阳是非常重要的一颗恒星,为人类提供光和热。太阳高温、高压,蕴藏着巨大能量,不断地通过光线向宇宙放射,太阳能是人类重要的无污染新型能源。当太阳光线到达地球时,一部分被云层和其他大气成分反射回宇宙空间,一部分被大气吸收,一部分被大气散射,其余部分可以直接照射到地球表面。地球的自转、季节、气候条件和大气层成分等因素,都对地球上接收到的太阳能产生影响,也就是说,地球上不同地区受到的光照是不同的,我国的西藏自治区是地球上太阳能最丰富的地区之一。

本章主要内容包括太阳简介、太阳能利用的分类、太阳能开发利用的步骤和特点及太阳能开发利用的历史。

1.1 太阳简介

1.1.1 太阳的质量与能量

太阳是离地球最近的一颗恒星,也是太阳系的中心天体,它的质量占太阳系总质量的99.865%。太阳也是太阳系里唯一自己发光的天体,它给地球带来光和热。如果没有太阳光的照射,地面的温度将会很快地降低到接近0 K。由于太阳光的照射,地面平均温度才会保持在14℃左右,形成了人类和绝大部分生物生存的条件。除了原子能、地热和火山爆发的能量外,地面上大部分能源均直接或间接同太阳有关^①。

太阳是一个主要由氢和氦组成的炽热的气体火球,半径为 6.96×10^5 km (是地球半径的109倍),质量约为 1.99×10^{27} t (是地球质量的33万倍),平均密度约为地球的1/4。太阳表面的有效温度为5 762 K,而内部中心区域的温度则高达几千万摄氏度。太阳的能量主要来源于氢聚成氦的聚变反应,每秒有 6.57×10^{11} kg的氢连续产生 3.90×10^{23} kW能量。这些能量以电磁波的形式,以 3×10^5 km/s的速度穿越太空射向四面八方。地球只接受到太阳总辐射的二十二亿分之一,即有 1.77×10^{14} kW的太阳辐射达到地球大气层上边缘(“上界”),由于穿越大气层时发生衰减,最后约 8.5×10^{13} kW的太阳辐射到达地球表面,这个数量相当于全世界发电量的几十万倍^①。

根据目前太阳产生的核能速率估算,氢的储量足够维持600亿年,而地球内部组织因热核反应聚合成氦,它的寿命约为50亿年,因此,从这个意义上讲,太阳的能量是取之不尽、用之不竭的。

1.1.2 太阳的结构和能量传递方式

太阳的结构和能量传递方式如图1-1所示,简要说明如下。

^① 沈辉,曾祖勤.2005.太阳能光伏发电技术.北京:化学工业出版社。

太阳的质量很大，在太阳自身的重力作用下，太阳物质向核心聚集，核心中心的密度和温度很高，能够发生原子核反应。这些核反应是太阳的能源，所产生的能量连续不断地向空间辐射，并且控制着太阳的活动。根据各种间接和直接的资料，认为太阳从中心到边缘可分为核反应区、辐射区、对流区和太阳大气。

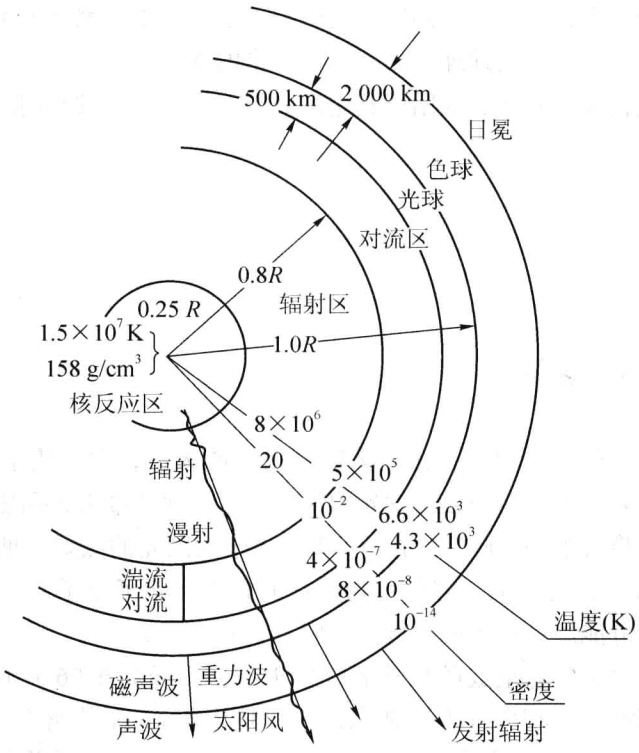


图 1-1 太阳的结构和能量传递方式

1. 核反应区

太阳半径 25%（即 0.25R）的区域是太阳的核心，集中了太阳一半以上的质量。此处温度大约为 1.5×10^7 K，压力约为 2 500 亿 atm（1atm = 101 325 Pa），密度接近 158 g/cm^3 。这部分产生的能量占太阳产生的总能量的 99%，并以对流和辐射方式向外辐射。氢聚合时放出 γ 射线，这种射线通过较冷区域时，消耗能量，波长变长，变成 X 射线或紫外线及可见光。

2. 辐射区

在核反应区的外面是辐射区，范围为 0.25R ~ 0.8R 的区域，温度下降到 1.3×10^6 K，密度下降为 0.079 g/cm^3 。在太阳核心产生的能量通过这个区域由辐射传输出去。

3. 对流区

在辐射区的外面是对流区（对流层），范围为 0.8R ~ 1.0R 的区域，温度下降为 5 000 K，密度为 10^{-8} g/cm^3 。在对流区内，能量主要靠对流传播。对流区及其里面的部分是看不见的，它们的性质只能靠同观测相符合的理论计算来确定。