



国际电气工程先进技术译丛



WILEY

www.wiley.com

太阳能物理

Physics of Solar Energy

(美) 陈成钧 著
连晓峰 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



太阳能是一种新型可再生能源,也是 21 世纪大力发展的新能源。本书涉及与太阳能、太阳辐射等相关的物理学、材料学、电化学等学科,重点介绍了太阳能原理及其相关物理基础,包括电磁波理论、光子理论、太阳基本参数与结构、太阳方位天文学、大气效应与浅层地热能、热力学、量子力学、太阳电池、光合作用、电化学等知识,同时还介绍了太阳能热水器和太阳能集热器、太阳能建筑等具体应用和实例。

本书可作为从事新能源方向的工程和研究人员的参考书,也可用于高等院校物理、电气工程及材料相关专业研究生及教师的参考教材。

PHYSICS OF SOLAR ENERGY, ISBN: 978-0-470-64780-6.

Copyright © 2011 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有,翻印必究。

本书版权登记号:图字 01-2011-5823 号

图书在版编目(CIP)数据

太阳能物理/(美)陈成钧著;连晓峰等译. —北京:机械工业出版社, 2012. 7

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Physics of Solar Energy

ISBN 978-7-111-39016-9

I. ①太… II. ①陈…②连… III. ①太阳能-物理学 IV. ①TK511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 143490 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:顾 谦 责任编辑:任 鑫

版式设计:纪 敬 责任校对:陈立辉

封面设计:马精明 责任印制:乔 宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·18 印张·8 插页·377 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-39016-9

定价:78.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服 务 中 心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

太阳能作为 21 世纪重点发展的新能源，是世界上最丰富的绿色能源。本书涉及与太阳能、太阳辐射等相关的物理学、材料学、电化学等学科。随着经济发展以及煤矿、石油、天然气等传统能源的逐渐减少，大力发展太阳能已在国民经济发展中产生越来越重要的作用。

本书是美国哥伦比亚大学的陈成钧教授在太阳能物理领域多年的教学和研究工作的积累。本书系统地介绍了太阳能原理及其相关物理基础，包括热力学、量子力学、太阳辐射、光合作用、电化学等知识，同时还介绍了太阳电池、光伏发电、太阳能建筑等具体应用和实例。

本书第 1 章首先阐述了人类目前所面临的能源问题，并对包括水力发电和风力发电等不同类型的可再生能源进行了比较。第 2 章介绍了麦克斯韦的电磁波理论以及爱因斯坦的光子理论，并详细介绍了黑体辐射的相关知识。第 3 章是有关太阳基本参数和结构的天体物理学，阐述了恒星能量来源的开尔文引力收缩理论和贝特的核聚变理论。第 4 章介绍了基础的太阳方位天文学，包括坐标变换公式的基本推导，以及时间方程、太阳时与民用时之差的详细推导。第 5 章介绍了大气效应以及浅层地热能。同时给出了太阳光散射或漫射的简化模型。第 6 章在热力学基本概念的基础上，阐述了热泵和制冷机基本原理。第 7 章根据狄拉克符号阐述了量子力学的基本概念，并以有机分子和半导体为例，全面推导了黄金法则和细致平衡原理。第 8 章主要阐述了太阳电池的基本概念，主要涉及 pn 结原理。第 9 章则主要介绍了半导体太阳电池，包括 Shockley-Queisser 极限的推导，并详细讨论了晶体硅太阳电池、薄膜太阳电池和叠层太阳电池的工作原理与结构。第 10 章分析了植物的光合作用以及人工光合作用的研究，并介绍了包括染料敏化太阳电池和双层有机太阳电池在内的各种类型有机太阳电池。第 11 章讨论太阳能的热应用，包括太阳能热水器和太阳热发电，重点介绍了真空管太阳能集热器。另外还介绍了槽式、抛物面碟状、定日镜和紧凑型线性菲涅尔聚光器等四种聚光式太阳能集热器。第 12 章介绍太阳能的能量存储，包括显热存储和相变热能存储系统以及充电电池。最后一章介绍了太阳能应用与土木工程相结合的太阳能建筑的结构原理。

全书语言精练，内容深入浅出，阐述严谨，是太阳能物理学方面的一部精品著作。

本书第 1~8 章由连晓峰翻译，第 9 章由张晓伟翻译，第 10 章由毋冬翻译，第 11 章由贾琦翻译，第 12 章由闫峰翻译，第 13 章由潘峰翻译。全书由连晓峰审校整理，

IV 太阳能物理

并对原书中的错误进行修正。

本书可作为从事新能源方向的工程和研究人员的参考书，也可用于高等院校物理、电气工程及材料相关专业研究生及教师的参考教材。

限于译者的经验和水平，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

译 者

原 书 前 言

21 世纪人类面临的最大挑战之一就是能源问题。从 18 世纪工业革命开始，化石燃料（如煤炭、石油和天然气）成为了人类社会日常生活必需的主要能源。它们所提供的大量能量被广泛应用于包括从蒸汽机到汽油发动机和柴油发动机、从电力到建筑的供暖和制冷、从烹饪到供应热水、从照明到各种电力电子工具，以及大多数交通工具在内的人类社会的各个方面。然而，地球在几亿年的过程中存储太阳能的化石燃料资源经过度开采将很快枯竭。另外，燃烧化石燃料还会造成地球环境的污染和恶化。

因此研究和利用可代替资源或可再生能源显得十分必要。作为太阳能衍生的水力发电，目前可占全世界能耗的 2% 左右。水力发电技术成熟且可用资源已得到了大力开发。风能，也是太阳能的衍生，目前也得到快速应用。但这种高度间歇性能源的资源是有限的。核能并不是可再生能源，并且铀矿产资源也有限。同时，事故预防和核废料管理等问题依然悬而未决。

对人类来说，最丰富的可用能源就是太阳能。每年约有 $4 \times 10^6 \text{ EJ}$ ，是 2007 年全球能源消耗的 1 万倍。例如，如果照射在新墨西哥州的太阳光的 50% 都转化为有用能源，则可满足整个美国的能源需求。

太阳能的应用与人类历史一样悠久。然而，直到今日，在所有不同类型的可再生能源中，太阳能的应用最少。目前，仅占全球能源消耗的 0.1%，或可用太阳辐射的 0.00001%。不过，随着深入研究和发展的，太阳能的应用，尤其是太阳光伏，将会以令人惊叹的速度发展。因此，有理由相信在 21 世纪的后半叶，太阳能将超过所有化石燃料能源而成为主要能源。

类似于其他领域的技术，成功应用太阳能的第一步是深入理解其基本原理。三年前，哥伦比亚大学推出了一个太阳能科学与工程方面的硕士学位课程。本人负责讲授关于太阳能物理的研究生课程。在 2009 年的春季学期，第一次开设这门课时，有 46 名学生选修。哥伦比亚大学的网络视频（CVN）决定全程录制该课程，并提供给未选课的学生。由于录制要求较高，对正常选修的学生重复了两个多学期，而太阳能物理的 CVN 课程重复了连续 7 个学期。本书就是基于该课程笔记整理而成的。

全书结构如下：第 1 章总结了能源问题并对不同类型的可再生能源进行比较，包括水力发电和风力发电。第 2 章“太阳辐射特性”主要介绍了麦克斯韦（Maxwell）的电磁波理论以及爱因斯坦的光子理论。理解黑体辐射对于太阳辐射的理解

是十分关键的,在本章中进行了详细介绍。第3章“太阳能起源”总结了太阳能的天体物理学,包括太阳的基本参数和结构,并介绍了阐述恒星能量来源的开尔文(Lord Kelvin)引力收缩理论和贝特(Hans Bethe)核聚变理论。第4章“太阳光跟踪”自成一章,对于非天体物理专业的学生,介绍了基础的太阳方位天文学,包括坐标变换公式的基本推导,以及时间方程、太阳时与民用时之差的详细推导。正是根据上述时间的推导,对太阳光进行跟踪。本书附录B中进行了球面三角学的简要概述。通过图表对一年中各类表面上的日均直接太阳辐射进行了分析。第5章“太阳光与地球的相互作用”介绍了大气效应以及地球内部的太阳能存储,即所谓的浅层地热能。同时给出了太阳光散射或漫射的简化模型。第6章“太阳能热力学”首先介绍了热力学的基本概念,接下来针对太阳能应用的几个问题进行阐述,包括热泵和制冷机的基本概念。第7~10章主要是有关太阳光伏和太阳能电化学的基本物理学。第7章“量子跃迁”根据狄拉克(Dirac)符号介绍了量子力学的基本概念,并以有机分子和半导体为例,全面推导了黄金法则和细致平衡原理。第8章主要阐述太阳电池的基本概念——pn结。第9章则主要介绍半导体太阳电池,包括Shockey-Queisser极限的推导,并详细描述了晶体硅太阳电池、薄膜太阳电池和叠层太阳电池的详细结构。第10章“太阳能电化学”分析了植物的光合作用以及人工光合作用的研究,并介绍了不同类型的有机太阳电池,包括染料敏化太阳电池和双层有机太阳电池。第11章讨论了太阳热能,包括太阳能热水器和太阳热发电,重点介绍了真空管集热器和热管式太阳能集热器。另外还介绍了槽式、抛物面碟状、定日镜和紧凑型线性菲涅尔聚光器等四种聚光式太阳能集热器。第12章介绍能量存储,包括显热存储和相变热能存储系统以及充电电池,尤其是锂电池。最后一章“阳光建筑”,介绍了太阳能应用与土木工程结合的太阳能建筑的结构原理。

授课经验表明,学生的知识背景十分多元化,包括物理、化学、电子工程、机械工程、化工、建筑结构学、土木工程、环境科学、材料学、航空航天工程、经济和金融等多学科。尽管本课程是高年级本科生和研究生的前导课程,但必须适应具有多元化知识背景的学生。因此,需要介绍必要的科学背景知识。本书正是基于上述考虑来进行组织安排的。例如,包括太阳方位天文学、热力学和量子力学等背景知识。对于已经修过上述课程的学生,这些背景知识可作为复习回顾。另外,本书中出现的术语和符号也可作为参考。这些背景科学知识的介绍只是针对太阳能应用目的的简要介绍。例如,根据经验方法介绍量子力学,从隧道扫描显微镜开始展示量子态的直观印象。因此量子态不仅是数学工具还是一个可感知的实体。隧道扫描显微镜也是研究太阳能转化中新型设备的一个重要工具。

本书中包括大量图片和照片,用于直观阐述数学公式,从而有利于更好地理解这些概念。

在授课和备课过程中，作者遇到很多意想不到的困难。太阳能是多学科课题，涵盖有天文学、热力学、量子力学、固态物理学、有机化学、固态电子、环境科学、机械工程、建筑学和土木工程等学科领域。作为一本教材和参考书，书中所采用的术语和符号集应尽可能与各自领域中现有的术语和符号一致。在本书最后的符号表中列出了出现的所有符号。

在此，衷心感谢 Irving Herman 教授，Richard Osgood 教授和 Vijay Modi 教授帮助作者开设太阳能课程。尤其还要感谢太阳能领域的许多业务主管和研究人员提供非常有价值的信息：Steve O'Rourke，曾任德意志银行总经理兼研究分析师，现任 MEMC 电子的首席战略总监，主要负责太阳光伏工业的详细分析；John Breckenridge，Good Energies 投资银行总经理，主要负责世界可再生能源的信息；Robert David de Azevedo，巴西美国商会业务主管，负责巴西可再生能源的信息与洽谈；Loury A. Eldada，HelioVolt 公司首席技术总监，负责 CIGS 薄膜太阳能电池的生产制造技术；Ioannis Kymissis 教授是我哥伦比亚大学的同事，曾进行了关于有机太阳电池的两次讲座，本书 10.5 节主要是根据他所提供的文献资料编写而成；Vasili Fthenakis 教授也是我哥伦比亚大学的同事，主要研究太阳电池的经济与环境信息；John Perlin，著名的太阳能历史学家，给我发过两本其著作的电子版；George Kitzmiller，迈阿密 Plumbing and Solar Heating 公司负责人，引领作者参观了迈阿密的一些已使用 80 多年的太阳能热水器；Margaret O'Donoghue Castillo，美国建筑师学会主席，向我介绍了纽约 AIA 的地热供暖和制冷系统。Mitchell Thomashaw，缅因州联合大学校长，带我亲眼目睹了美国的太阳能历史，从卡特时代的白宫太阳能电池板到中国德州的太阳能博物馆；何祚庥院士，可再生能源的杰出倡导者，帮助我联系中国的可再生能源研究和工业；首都师范大学的李申生教授，赠送我一本他亲笔签名的 1996 年出版的著作《太阳能物理学》，这或许是最早的一本关于太阳能物理的著作；黄鸣先生，皇明太阳能集团的创始人和 CEO，国际太阳能协会副主席，作者与其进行了多次讨论，并邀请作者参观皇明公司，包括真空管太阳能集热器的生产线；黄学杰教授，长期从事锂电池研究，并成立星恒电源有限公司，与其多次讨论电动车，并参观生产线；马艳，英利绿色能源控股有限公司副总裁，给作者提供了大量信息，并带领作者参观该公司的太阳电池和太阳电池模块的整个生产过程。最后，没有妻子立清的支持和帮助，就没有这本书。

C. Julian Chen (陈成钧)

哥伦比亚大学

纽约

2011 年 4 月

目 录

译者序

原书前言

第1章 绪论	1
1.1 太阳能	1
1.2 走向后石油时代	4
1.3 其他可再生能源	8
1.3.1 水力发电	8
1.3.2 风力发电	10
1.3.3 生物质和生质能	12
1.3.4 浅层地热能	17
1.3.5 深层地热能	18
1.4 太阳光伏基础	19
1.4.1 现代太阳能电池的诞生	20
1.4.2 太阳能电池的相关概念	21
1.4.3 太阳能电池的类型	22
1.4.4 能量平衡	23
1.5 物理范畴之外	24
1.5.1 太阳能与经济	24
1.5.2 太阳能与和平	26
1.5.3 世界各地的太阳能热水器	28
1.5.4 光伏：趋向电网平价	31
习题	35
第2章 太阳辐射特性	37
2.1 光作为电磁波	37
2.1.1 麦克斯韦方程	37
2.1.2 矢量势	38

2.1.3 电磁波	39
2.1.4 平面波	40
2.1.5 光的偏振	40
2.1.6 电子在电场和磁场中的运动	40
2.2 光学薄膜	42
2.2.1 相对电介质常数和折射率	42
2.2.2 能量守恒和 Poynting 矢量	44
2.2.3 菲涅尔公式	45
2.3 黑体辐射	47
2.3.1 Rayleigh-Jeans 定律	47
2.3.2 普朗克公式和斯特藩-玻尔兹曼定律	49
2.4 光电效应和光子概念	52
2.4.1 爱因斯坦的光子理论	53
2.4.2 Millikan 的实验验证	54
2.4.3 波粒二象性	55
2.5 爱因斯坦的黑体方程推导	55
习题	57
第3章 太阳能起源	59
3.1 太阳的基本参数	59
3.1.1 距离	60
3.1.2 质量	60
3.1.3 半径	60
3.1.4 发射功率	60
3.1.5 表面温度	60
3.1.6 元素组成	61
3.2 Kelvin-Helmholtz 时间尺度	61
3.3 太阳能的来源	63
3.3.1 p-p 链	64
3.3.2 碳链	65
3.3.3 太阳的内部结构	65
习题	66
第4章 跟踪太阳光	67
4.1 地球自转: 纬度和经度	67

X 太阳能物理

4.2	天球	68
4.2.1	坐标变换: 直角坐标系	70
4.2.2	坐标变换: 球面三角法	71
4.3	基于太阳时的处理	73
4.3.1	黄赤交角和太阳赤纬	73
4.3.2	日出时间与日落时间	74
4.3.3	任意表面上的直接太阳辐射	75
4.3.4	每日直接太阳辐射能量	76
4.3.5	24 节气	80
4.4	基于标准时的处理	82
4.4.1	恒星时和太阳时	82
4.4.2	太阳的赤经	83
4.4.3	起源于黄赤交角的时差	83
4.4.4	远日点和近日点	85
4.4.5	起源于地球轨道离心率的时差	86
4.4.6	时间方程	86
4.4.7	太阳的赤纬	88
4.4.8	太阳的日行迹	88
	习题	88
第5章	太阳光与地球的相互作用	90
5.1	辐射与物质的相互作用	90
5.1.1	吸收率、反射率和透射率	90
5.1.2	发射率和基尔霍夫定律	91
5.1.3	Bouguer-Lambert-Beer 定律	91
5.2	太阳光与大气层的相互作用	93
5.2.1	AM1.5 的日射光谱辐照度	93
5.2.2	年均日照图	95
5.2.3	晴朗指数	95
5.2.4	直射和漫射太阳辐射	96
5.3	渗透到地球的太阳能	97
	习题	100
第6章	太阳能热力学	102
6.1	定义	102

6.2 热力学第一定律	103
6.3 热力学第二定律	105
6.3.1 卡诺循环	105
6.3.2 热力学温度	107
6.3.3 熵	108
6.4 热力学函数	108
6.4.1 自由能	109
6.4.2 焓	109
6.4.3 吉布斯 (Gibbs) 自由能	109
6.4.4 化学势	110
6.5 理想气体	110
6.6 地源热泵和空调	113
6.6.1 原理	113
6.6.2 性能系数	114
6.6.3 蒸气压缩热泵和制冷机	115
6.6.4 地热换热器	116
习题	121
第7章 量子跃迁	122
7.1 量子力学的基本概念	122
7.1.1 量子态: 能级和波函数	122
7.1.2 动态变量和运动方程	123
7.1.3 一维势阱	124
7.1.4 氢原子	126
7.2 多电子原子系统	127
7.2.1 单电子近似	128
7.2.2 量子态的直接观测	128
7.2.3 分子的量子态: HOMO 和 LUMO	129
7.2.4 纳米晶体的量子态	131
7.3 黄金法则	131
7.3.1 周期性扰动的时变微扰	132
7.3.2 连续光谱的黄金法则	134
7.3.3 细致平衡原理	134
7.4 与光子的交互作用	135
习题	136

第 8 章 pn 结	137
8.1 半导体	137
8.1.1 导体、半导体和绝缘体	137
8.1.2 电子和空穴	138
8.1.3 p 型和 n 型半导体	139
8.2 pn 结的形成	141
8.3 pn 结分析	144
8.3.1 偏置电压效应	145
8.3.2 过剩少数载流子的寿命	146
8.3.3 pn 结电流	146
8.3.4 Shockley 方程	147
习题	148
第 9 章 半导体太阳电池	150
9.1 基本概念	150
9.1.1 电能产生	152
9.1.2 太阳电池方程	153
9.1.3 最大功率和填充因子	153
9.2 Shockley-Queisser 极限	155
9.2.1 效率上限	155
9.2.2 载流子复合时间的影响	157
9.2.3 细致平衡处理	158
9.2.4 额定效率	159
9.2.5 Shockley-Queisser 效率极限	160
9.2.6 AM1.5 辐射的效率极限	161
9.3 无辐射复合过程	162
9.3.1 俄歇复合	163
9.3.2 陷阱态复合	163
9.3.3 表面态复合	164
9.4 抗反射涂层	164
9.4.1 矩阵法	165
9.4.2 单层抗反射涂层	167
9.4.3 双层抗反射涂层	169
9.5 晶体硅太阳电池	170

9.5.1 纯硅的生产	170
9.5.2 太阳能电池设计和处理	171
9.5.3 模块组装	172
9.6 薄膜太阳能电池	173
9.6.1 CdTe 太阳能电池	173
9.6.2 CIGS 太阳能电池	174
9.6.3 非晶硅薄膜太阳能电池	175
9.7 叠层太阳能电池	175
习题	177
第 10 章 太阳能电化学	179
10.1 光合作用的物理学	179
10.1.1 叶绿素	180
10.1.2 ATP: 生物界的通用储能单元	181
10.1.3 NADPH 和 NADP^+	182
10.1.4 卡尔文循环	182
10.1.5 C_4 植物与 C_3 植物	184
10.1.6 叶绿体	184
10.1.7 光合作用的效率	184
10.2 人工光合作用	186
10.3 转基因藻类	186
10.4 染料敏化太阳能电池	187
10.5 双层有机太阳能电池	188
习题	190
第 11 章 太阳热能	191
11.1 早期太阳热能应用	191
11.2 太阳能集热器	193
11.2.1 选择性吸收表面	193
11.2.2 平板太阳能集热器	197
11.2.3 全玻璃真空管太阳能集热器	201
11.2.4 热管式太阳能集热器	202
11.2.5 高压真空管太阳能集热器	203
11.3 太阳能热水器	204
11.3.1 具有热管式太阳能集热器的系统	204

11.3.2 具有承压热交换器的系统	205
11.3.3 具有独立热交换水箱的系统	206
11.4 太阳热发电	206
11.4.1 抛物面槽式聚光器	207
11.4.2 定日镜和中央接收器	208
11.4.3 抛物面碟状聚光器和 Stirling 发动机	209
11.4.4 太阳能的组合集成	210
11.4.5 线性菲涅尔反射聚光器	211
习题	213
第 12 章 能量存储	215
12.1 显热存储	215
12.1.1 水	216
12.1.2 固体显热存储材料	217
12.1.3 合成油与填充床	218
12.2 相变存储	218
12.2.1 水-冰系统	219
12.2.2 石蜡和其他有机材料	220
12.2.3 盐水合物	222
12.2.4 PCM 封装	222
12.3 蓄电池	222
12.3.1 蓄电池的电化学	223
12.3.2 铅酸蓄电池	224
12.3.3 镍氢蓄电池	225
12.3.4 锂电池	225
12.3.5 锂的矿产资源	227
12.4 太阳能和电动汽车	228
习题	230
第 13 章 阳光建筑	231
13.1 早期太阳能建筑	232
13.1.1 古代太阳能建筑	232
13.1.2 中国农村房屋的整体结构	232
13.2 建筑材料	233
13.2.1 热阻	233

13.2.2 比热阻	233
13.2.3 热导系数: U 值	234
13.2.4 热质	235
13.2.5 玻璃窗	235
13.3 整体设计举例	236
13.4 太阳能社区的土地利用	239
习题	241
附录	242
附录 A 能量单位转换	242
附录 B 球面三角学	243
B.1 球面三角形	243
B.2 余弦公式	244
B.3 正弦公式	245
B.4 公式 C	246
习题	246
附录 C 量子力学基础	247
C.1 谐振子	247
C.2 角动量	249
C.3 氢原子	251
附录 D 粒子统计	253
D.1 麦克斯韦-玻尔兹曼统计	253
D.2 费米-狄拉克统计	255
附录 E AM1.5 参考太阳光谱	255
符号列表	263
参考文献	266

第 1 章 绪 论

1.1 太阳能

根据可靠的测量,地球大气层之外太阳辐射的平均功率密度为 $1366\text{W}/\text{m}^2$,这也就是大家所熟知的太阳常数。由图 1-1 可见,1m 定义为沿地球子午线从北极到赤道的距离的 $1/1 \times 10^7$ 。即使根据现代测量方法,该距离仍相当准确。由此可得,地球半径为 $(2/\pi) \times 10^7\text{m}$,则地球接收到的太阳辐射总功率为

$$\text{太阳功率} = 1366 \times \frac{4}{\pi} \times 10^{14}\text{W} \approx 1.73 \times 10^{17}\text{W} \quad (1-1)$$

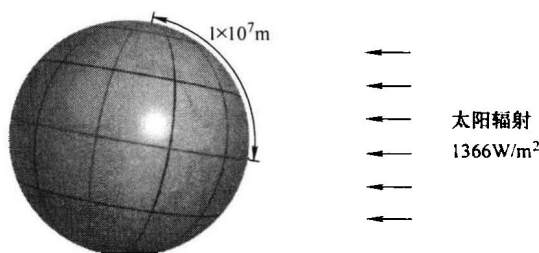


图 1-1 每年到达地球表面的太阳能
(地球上的平均太阳功率密度为 $1366\text{W}/\text{m}^2$ 。地球子午线的长度为 10000km 。每年到达地球表面的太阳能总量为 5460000EJ)

由于,一天有 86400s ,而平均每年有 365.2422 天。因此,一年中地球接收到的太阳辐射总量为

$$\text{年均太阳能} = 1.73 \times 10^{17} \times 86400 \times 365.2422 \approx 5.46 \times 10^{24}\text{J} \quad (1-2)$$

若能量值较大,可用单位 EJ ,即 10^{18}J 。因此到达地球的年均太阳能可表示为 5460000EJ 。如图 1-2 所示,2005~2010 年全球平均年能耗约为 511EJ 。这意味着仅太阳辐射总量的 0.01% 就能够满足全世界全年的能源需求。

但值得注意的是,进入地球大气层的太阳辐射并不是都能到达地球表面。在晴天,阳光直射的地球表面,太阳辐射功率密度大约为 $1\text{kW}/\text{m}^2$ 。该数值简单易记,已被太阳能行业定义为太阳辐射功率密度单位,即一个太阳(one sun),具体的定义参见本书第 5 章。由于纬度不同以及云量不同,地球上不同地区的日均累积太阳辐射能量(日照)都不同,见本书插图 3 到插图 5。

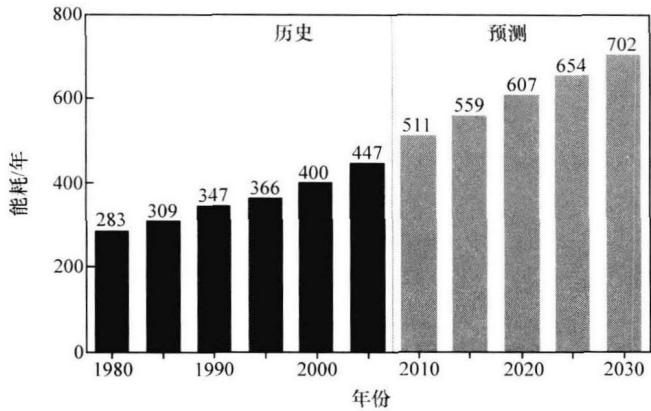


图 1-2 1980 ~ 2030 年全球市场能源消耗

来源：能源信息署（EIA），美国政府官方能源统计。历史：国际能源年报（2006 年 5 月-7 月）www.eia.doe.gov/iea。
预测：能源信息署，国际能源使用回顾与展望，2007 年

表 1-1 所示为到达地球的太阳能与各种化石燃料中能量存储总量相比较。数据表明化石燃料的总探明储量仅大约是每年地球表面接收太阳能的 1.4%。此处的化石燃料实际上是数百万年前作为生质能所存储的太阳能。目前，人类开采利用的只是太阳能中很小一部分。如今每年化石燃料的消耗大约为 300EJ。如果按照当前化石燃料的消耗水平，则所有化石燃料储量将会在 100 年左右枯竭。

表 1-1 各种化石燃料的探明储量

项 目	数 量	单 位 能 量	能量/EJ
原油	$1.65 \times 10^{11} \text{ t}$	$4.2 \times 10^{10} \text{ J/t}$	6930
天然气	$1.81 \times 10^{14} \text{ m}^3$	$3.6 \times 10^7 \text{ J/m}^3$	6500
高质煤	$4.9 \times 10^{11} \text{ t}$	$3.1 \times 10^{10} \text{ J/t}$	15000
劣质煤	$4.3 \times 10^{11} \text{ t}$	$1.9 \times 10^{10} \text{ J/t}$	8200
总计			36600

来源：世界能源统计一览，2007 年 6 月，英国石油。

目前，可再生能源的利用只占到整个能量消耗的一小部分，见表 1-2。图 1-3 给出 2006 年美国不同类型能源的比例。虽然利用光伏（PV）技术的太阳能应用仅占总能量消耗的 0.07%。但从全球范围而言，太阳光伏发电是发展最快的能源。正如 1.5.4 节中所述，太阳光伏发电将会成为人类能源的主要来源。图 1-4 是德国太阳能工业学会对可再生能源发展的预测。