

高等学校“专业综合改革试点”项目

太阳能热利用技术丛书

平板太阳能 技术及应用

胡晓花 袁家普 孙如军 主编

清华大学出版社

太阳能热利用技术丛书

平板太阳能 技术及应用

胡晓花 袁家普 孙如军 主编

清华大学出版社

内 容 简 介

目前在太阳能的各种利用技术中,光热利用技术发展最为成熟,其中使用的平板集热器集热效率高、承压性能好、组成大系统时性能稳定、加工方便、与建筑物的结合性良好,具有广阔的发展前景。本书介绍了太阳能热利用、平板集热器原理等基础知识,研究了平板太阳能热水系统、平板太阳能集热器的生产、平板太阳能热水系统与建筑结合等问题,并在最后附上企业的实际工程案例。本书可供新能源开发研究和利用者、建筑设备工程师、建筑师、建筑开发商和城市规划者阅读参考,也可供高校的学生及专业人员学习和培训使用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

平板太阳能技术及应用/胡晓花,袁家普,孙如军主编.--北京:清华大学出版社,2014

(太阳能热利用技术丛书)

ISBN 978-7-302-34357-8

I. ①平… II. ①胡… ②袁… ③孙… III. ①太阳能利用 IV. ①TK519

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 257329 号

责任编辑:杨倩 洪英

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:三河市君旺印装厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×230mm 印 张:11.25

字 数:222 千字

版 次:2014 年 1 月第 1 版

印 次:2014 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:25.00 元

产品编号:054847-01

太阳能热利用技术丛书

编委会

顾 问：贾铁鹰

主 任：程洪智 袁家普

委 员（按姓氏拼音排序）：

李彩霞	孙如军	王宝泉	王冬梅	王 会
卫江红	魏希德	姚俊红	赵 岩	赵玉磊

丛 书 序 言

能源是人类社会赖以生存和发展的物质基础。纵观人类社会发展的历史,人类文明的每一次重大进步都伴随着能源的改进和更替,能源的开发利用极大地推进了世界经济和人类社会的发展。进入 21 世纪后,全球经济快速发展和人口不断增长,使得一次能源消费量不断增加。人们在物质生活和精神生活不断提高的同时,也越来越感受到大规模使用化石能源带来的严重后果:资源日益枯竭,生态环境不断受到威胁,还诱发了不少国与国之间、地区之间的政治经济纠纷,甚至冲突和战争。因此,人类必须寻求清洁、安全、可靠的新能源和可再生能源。

太阳能是开发和利用新能源与可再生能源的重要内容。太阳能具有资源丰富,取之不尽、用之不竭,处处均可开发利用,无须开采和运输,无污染等特点。因此,太阳能的开发利用有着巨大的市场前景。我国是太阳能资源十分丰富的国家之一,2/3 的地区年辐射总量大于 $5020\text{MJ}/\text{m}^2$,年日照时数在 2200 小时以上。尤其是大西北,太阳能的开发利用有巨大的潜力。

太阳能光热利用是太阳能热利用的一种基本方式。太阳能低温热利用产生的是热水,象征产品是太阳能热水器、商用的太阳能热水系统和工业用的太阳能热水系统;太阳能中温热利用产生的是热能,是太阳能热利用未来 10~20 年内主要的发展方向;太阳能高温热利用产生的是热电,主要作用于“政府”公共工程以及商业领域,是未来太阳能热利用的最高阶段,也将成为替代常规能源的主要途径。

清华大学出版社和德州学院顺应时代需要,组织联系一批学者和太阳能光热企业技术人员,出版了这套“太阳能热利用技术丛书”。本套丛书共七本,从太阳能热利用概述到热水系统设计、施工管理,再到

专业英文文献,体系完整。每本书在编写时,思路清晰,内容丰富充实,不仅有理论介绍,更有大量翔实的案例,既具有很强的实用价值,又具有较高的学术价值。本套丛书不仅可以作为能源类太阳能相关领域的专业图书和教材,还可以作为太阳能相关企业工程技术人员的专业培训用书和参考书。

我们期待本套丛书的出版发行,并希望它能在太阳能光热的研究开发与应用进程中作出应有的贡献。

是以为序。

贾铁鹰

2013 年 7 月

前言

太阳能是各种可再生能源中最重要的基本能源,生物质能、风能、海洋能、水力能等都来自太阳能。大规模利用太阳能是世界各国政府和学者都十分重视的热门课题,我国已经把太阳能利用作为后续能源战略中可再生能源的重要组成部分,并出台了一系列的政策指导性文件鼓励和支持太阳能转化研究和应用事业的发展。

按照太阳能利用的不同途径,太阳能利用技术可分为太阳能热利用、太阳能光利用、太阳能储存与转换利用三大类,以上各种技术中,太阳能光热利用技术发展最为成熟。光热利用的首要步骤为太阳能热量的吸收采集,目前应用较多的集热器一般可分为平板集热器、真空管集热器、聚光集热器和平面反射镜等几种类型。平板集热器具有集热效率高、承压性能好、组成大系统时性能稳定、加工方便等优点,更值得一提的是它与建筑物的结合性良好,特别适合于建筑一体化的要求,因此具有良好的发展前景。

本书的写作本着易懂和实用的原则,介绍了太阳能热利用、平板集热器原理等基础知识,研究了平板太阳能热水系统、平板太阳能集热器的生产、平板太阳能热水系统与建筑结合等问题,并在最后附上企业的实际工程案例。本书可供新能源开发研究和利用者、建筑设备工程师、建筑师、建筑开发商和城市规划者阅读参考,也可供高校的学生及专业人员学习和培训使用。

本书由德州学院胡晓花、孙如军和广东五星太阳能股份有限公司袁家普合作编写,陈洁、王慧、卫江红对本书的编写提出了宝贵意见,在

此表示感谢!

由于编者水平和掌握资料有限,书中难免有不足和欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2013 年 12 月

目 录

第 1 章 太阳能热利用基础	1
1.1 太阳能热利用基本知识	1
1.1.1 太阳的结构	1
1.1.2 太阳与地球	2
1.1.3 太阳辐射	6
1.1.4 我国的太阳能资源	9
1.1.5 太阳能的特点	11
1.2 太阳能热利用的一些基本概念	12
1.3 太阳能热利用设计程序	14
1.3.1 初步设计阶段	14
1.3.2 施工图设计阶段	15
第 2 章 平板太阳能集热器	17
2.1 平板型集热器的基本结构及材料	17
2.1.1 吸热板	17
2.1.2 透明盖板	21
2.1.3 隔热层	22
2.1.4 外壳	23
2.2 集热器的基本能量平衡方程	23
2.3 平板集热器的总热损系数	24
2.4 平板集热器的效率方程及效率曲线	26
2.4.1 集热器的效率方程	26

2.4.2	集热器的效率曲线	28
2.4.3	集热器的面积	29
2.5	平板型集热器的热性能试验	31
2.5.1	热性能试验的内容	31
2.5.2	瞬时效率特性的测定方法	31
第3章	平板太阳能热水系统	34
3.1	平板阳台壁挂式太阳能热水系统	34
3.1.1	平板阳台壁挂式太阳能热水系统原理	34
3.1.2	施工安装方案	38
3.2	别墅平板分体承压式系统	41
3.2.1	别墅平板分体承压式系统原理	41
3.2.2	别墅平板分体承压系统的安装	43
3.3	集中集热、分户储热式太阳能热水系统	49
3.3.1	集中集热、分户储热式太阳能热水系统及运行原理	49
3.3.2	集中集热、分户储热式太阳能热水系统的6种应用模式	52
3.3.3	集中集热、分户换热系统模式特点分析	58
3.3.4	集中集热、分户换热系统施工方案	59
3.4	集中集热、集中储热式太阳能热水系统	66
3.5	平板太阳能与空气源热泵复合热水系统	72
3.5.1	定时供水的特点与系统运行模式	72
3.5.2	分时段供水的特点与系统运行模式	77
3.5.3	全天候供应热水系统的特点与运行模式	81
第4章	平板集热器生产	88
4.1	平板集热器的生产	88
4.2	平板太阳能设备	93
4.3	平板太阳能集热器焊接设备工艺解析	103
第5章	平板太阳能热水器与建筑一体化	105
5.1	太阳能与建筑一体化概念及问题	105
5.1.1	太阳能与建筑一体化的概念	105
5.1.2	太阳能热水器与建筑一体化现状及存在的问题	106
5.2	太阳能建筑一体化的结合形式	106
5.2.1	屋顶型	106

5.2.2 墙面型·····	108
5.2.3 阳台型·····	109
5.2.4 其他造型结合·····	111
5.3 平板集热器与屋顶建筑结合安装·····	112
5.3.1 平板集热器与斜面屋顶建筑的结合安装·····	112
5.3.2 太阳能集热器与平屋面结合安装方法·····	115
5.3.3 平板太阳能集热器立墙面安装方法·····	117
5.3.4 平板集热器管路安装方法·····	117
5.4 平板太阳能系统安装·····	119
5.4.1 太阳能支架、水箱等设备基础施工程序·····	119
5.4.2 施工方法·····	119
第6章 平板太阳能应用案例·····	122
6.1 西安西岸国际花园平板阳台太阳能与建筑结合·····	122
6.2 青岛保利海上罗兰项目平板别墅分体系统·····	128
6.3 北京万科中粮假日风景太阳能热水系统建筑一体化设计·····	132
6.4 赛丽绿城丽园太阳能热水系统设计与应用·····	137
6.5 广州亚运城太阳能热水系统·····	143
6.6 长沙麓山国际学校平板太阳能热水系统·····	148
6.7 银川公厕太阳能采暖·····	154
6.8 内蒙古住宅建筑太阳能生活热水及采暖·····	161
参考文献·····	165

太阳能热利用基础

太阳是地球最主要的能量来源,除了核能之外,地球上的一切能源归根结底都来源于太阳能辐射。经测算表明,太阳每秒能够释放出 $3.91 \times 10^{23} \text{ kW}$ 的能量,而辐射到地球表面的能量虽然只有它的 22 亿分之一,但也相当于全世界目前发电总量的 8 万倍,因此太阳能资源十分丰富。太阳能作为一种洁净的能源,有着矿物能源不可比拟的优越性,是可再生能源中最引人注目、开发研究最多、应用最广的清洁能源。

1.1 太阳能热利用基本知识

1.1.1 太阳的结构

太阳是距离地球最近的一颗恒星。根据最新的测定,日地间的距离为 $1.4959 \times 10^8 \text{ km}$ 。从地球上望去,太阳的张角为 $31^\circ 59' 26''$,把角度转换成弧度,再乘以日地距离,便可得出太阳的直径为 $1.392 \times 10^6 \text{ km}$,是地球直径的 109 倍,就体积而论比地球大 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,在已知地球的质量是 $6.0 \times 10^{21} \text{ t}$ 的情况下,可推算出太阳的质量为 $1.989 \times 10^{27} \text{ t}$,即太阳的质量是地球质量的 33 万倍。知道了太阳的体积和质量,就不难求出太阳的平均密度为 1.4 g/cm^3 ,即约为水的密度的 1.5 倍。实际上太阳内部的密度也各不相同,外部的密度很小,内部在承受巨大的压力的情况下,密度高达 160 g/cm^3 ,因此日心的引力要比地心的引力大 29 倍。

粗略地讲,太阳是由大气和内部两大部分组成的(见图 1-1)。太阳的大气自里向外分为光球、色球和日冕三个层次,内部自外向内则是对流层、辐射层和日核三个层次。太阳物质的组成,就质量而言,氢占 78.4%,氦占 19.8%,至于种类繁多的金属和其他元素只占 1.8%。太阳一刻不停地向四周空间放射出巨大的能量,其总量平均每秒钟达 $3.865 \times 10^{26} \text{ J}$,相当于每秒烧掉 $1.321 \times 10^{26} \text{ t}$ 标准煤所释放出来的能量。而地球大气层所能接受的能量仅为其中的 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 $6.6 \times 10^6 \text{t}$ 。太阳核心温度为 $(8 \sim 40) \times 10^6 \text{K}$,表面温度为 6000K 左右。太阳内部通过核聚变把氢转变为氦,在反应过程中,产生巨大的热量,并向四周辐射。据估算太阳还将有 100 亿年的寿命,相对于人类的有限生存时间而言,太阳能可以说是取之不尽、用之不竭的。太阳能是最重要的基本能源,生物质能、风能、潮汐能、水能等都来自太阳能。太阳内部进行着由氢聚变成氦的原子核反应,不停地释放出巨大的能量,不断地向宇宙空间辐射能量,这就是太阳能。

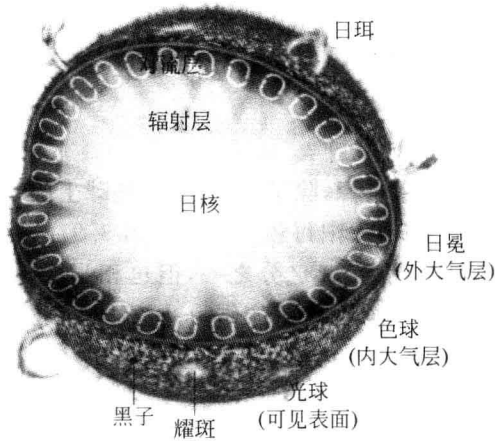


图 1-1 太阳结构示意图

1.1.2 太阳与地球

1. 经度和纬度

一切通过地轴的平面同地球表面相交而成的圆叫经度圈,经度圈都通过地球两极,因而都在南北极相交。这样每个经度圈都被南北两极等分成两个 180° 的半圆,这样的半圆叫经线,或子午线。全球分为 180 个经圈,360 条经线。1884 年经国际会议商定,以英国伦敦的格林尼治天文台所在的子午线为全世界通用的本初子午线,如图 1-2 所示。

一切垂直于地轴的平面同地球表面相割而成的圆都是纬线,它们彼此平行。其中通过地心的纬线叫赤道。赤道所在的赤道面将地球分成南半球和北半球,如图 1-3 所示。

不同的经线和纬线分别以不同的经度和纬度来区分。所谓经度,就是本初子午线所在的平面与某地子午线所在的平面的夹角。因此,经度以本初子午线为零度线,自零度线向东分为 180° ,叫东经,向西分 180° ,称为西经。纬度(φ)是地球表面某地的本地法线(地平面的



图 1-2 地球经度圈

垂线)与赤道平面的夹角,是在本地子午线上度量的。赤道面是纬度的度量起点,赤道面上的纬度为 0° ,自赤道面向北极方向分为 90° ,称为北纬,向南极方向分为 90° ,称为南纬,如图 1-4 所示。



图 1-3 地球纬度圈

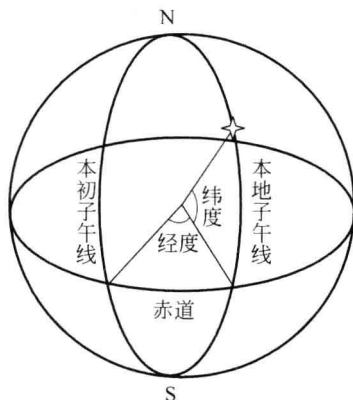


图 1-4 本初子午线与本地子午线

2. 四季

四季是因地球公转而形成的。地球绕太阳逆时针旋转称为公转,其运行轨道的平面称为黄道平面。地球绕太阳的运行轨道接近椭圆形,而太阳所处位置稍有偏心。因此太阳与地球之间的距离逐日变化。地球除公转外,还绕其轴(地轴)自转,地球的倾斜角即地轴与黄道平面的法线的交角始终保持 $23^\circ 27'$ 或 23.45° ,亦常被近似表述为 23.5° ,见图 1-5。

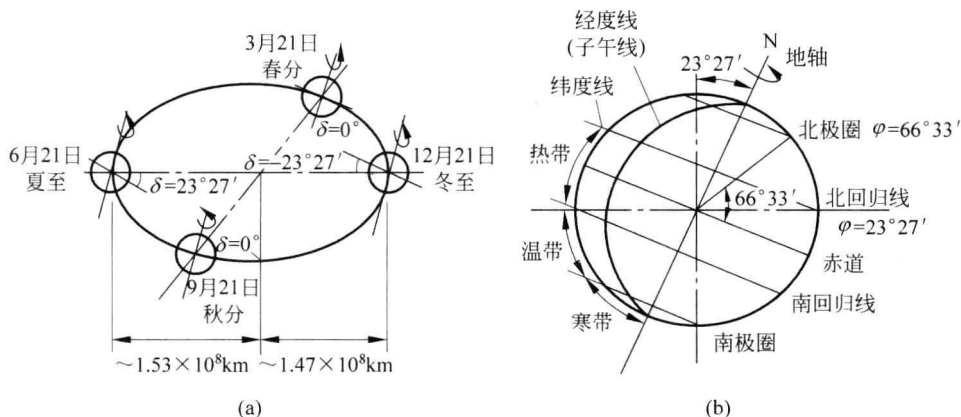


图 1-5 地球公转与自转

(a) 公转; (b) 自转

地球中心和太阳中心的连线与赤道平面的夹角称为赤纬 δ (或赤纬角), 由于地轴的倾斜角永远保持不变, 致使赤纬随地球在公转轨道上的位置随日期的不同而变化, 全年赤纬在 $-23.45^\circ \sim 23.45^\circ$ 之间变化, 从而形成了一年四季的更替。赤纬在一年中随时都在变化, 可用下列简化公式计算:

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right) \quad (1-1)$$

式中, n ——计算日在一年中的日期序号。

3. 关于昼夜

昼夜是因地球自转而形成的。一天时间的测定是以地球自转为依据的, 昼夜循环的现象给了我们测量时间的一种尺度。钟表指示的时间是均匀的, 均以地方太阳时为准。

所谓地方平均太阳时, 是以太阳通过当地的子午线时为正午 12 点来计算一天的时间。这样经度不同的地方, 正午时间均不同, 使用起来不方便。因此, 规定在一定经度范围内统一使用一种标准时间, 在该范围内同一时刻的钟点均相同。经国际协议, 以本初子午线处的平均太阳时为世界时间的标准时。把全球按地理经度划为 24 个时区, 每个时区包含地理经度 15° 。以本初子午线东西各 7.5° 为零时区, 向东分为 12 个时区, 向西分为 12 个时区。每个时区都按它的中央子午线的平均太阳时为计时标准, 作为该时区的标准时。相邻两个时区的时间差为 1h。

真太阳时是以当地太阳位于正南向的瞬间为正午 12 时, 地球自转 15° 为 1h。但是由于太阳与地球之间的距离和相对位置随时间在变化, 以及地球赤道与黄道平面的不一致, 致使当地子午线与正南方向有一定差异, 所以真太阳时与当地平均太阳时之间的差值称为时差。某地的真太阳时 T 可按下式计算:

$$T = T_m \pm \frac{L - L_m}{15} + \frac{e}{60} \quad (1-2)$$

式中, T ——当地的真太阳时, h;

T_m ——该时区的平均太阳时(该时区的标准时), h;

L ——当地子午线的经度, $(^\circ)$;

L_m ——该时区中央子午线的经度, $(^\circ)$;

e ——时差, h;

$\pm$ ——对于东半球取正值, 对于西半球取负值。

如果式(1-2)不考虑时差 e , 则求得的就是当地的地方平均太阳时, 即钟表时间 T_0 :

$$T_0 = T_m \pm \frac{L - L_m}{15} \quad (1-3)$$

我国地域广阔, 从东 5 时区到东 9 时区, 横跨 5 个时区。为计算方便, 我国统一采用东 8 时区的时间, 即以东经 120° 的平均太阳时为中国的标准时间, 称为“北京时间”。

间”。北京时间与世界时间相差 8 小时,即北京时间等于世界时加上 8 小时。

由于我国 5 个时区统一采用东 8 时区的时间作为标准时间,因此在用式(1-2)求取某地的真太阳时, T_m 和 L_m 均采用东 8 时区的标准时和中央子午线的经度。

若将真太阳时用角度表示时,则称太阳时角,简称时角 h ,是指当时太阳入射的日地中心连线在地球赤道平面上的投影与当地真太阳时 12 点时日地中心连线在赤道平面上的投影之间的夹角,其计算公式为

$$h = \left(T_m \pm \frac{L - L_m}{15} + \frac{e}{60} - 12 \right) \times 15^\circ \quad (1-4)$$

真太阳时为 12 点时的时角为零,前后每隔一小时,增加 $360^\circ / 24 = 15^\circ$,如 10 点和 14 点均为 30° 。

4. 太阳在空间的位置

地球上某一点所看到的太阳方向称为太阳位置。太阳位置常用两个角度来表示,即太阳高度角 β 和太阳方位角 A 。太阳高度角 β 是指太阳光线与水平面之间的夹角。太阳方位角 A 为太阳至地面上某给定点连线在地面上的投影与当地子午线(南向)的夹角,太阳偏东时为负,太阳偏西时为正,如图 1-6 所示。图 1-7 为夏至到冬至这一段时间太阳在中午照射时的太阳高度角 β 与纬度 φ 之间的关系。 O 点表示地心, QQ' 表示赤道, NS 表示地球轴线。

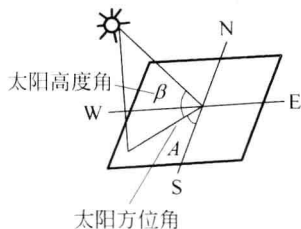


图 1-6 太阳高度角与方位角

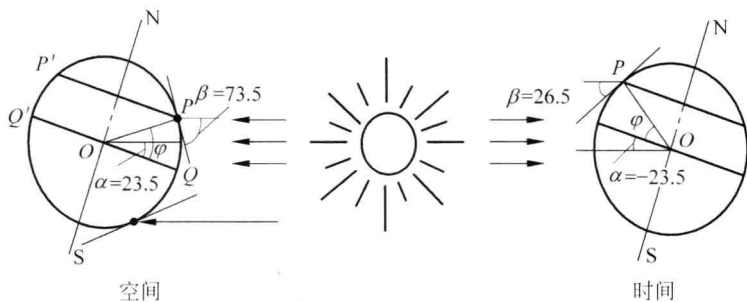


图 1-7 夏至和冬至时太阳高度角与纬度之间的关系

确定太阳高度角和方位角在建筑环境控制领域具有非常重要的作用。确定不同季节设计代表日或者代表时刻的太阳位置,可以进行建筑朝向确定、建筑间距以及周围阴影区范围计算等建筑的日照设计,可以进行建筑的日射的热量与空调负荷的计算、进行建筑自然采光设计。

影响太阳高度角和方位角的因素有三个:①赤纬 δ ,它表明季节的变化;②时角 h ,它表明时间的变化;③地理纬度 φ ,它表明观察点所在的位置。在一天之中,真太

阳时 12 点时太阳高度角达到最大值。太阳高度角 β 和方位角 A 可用下式来表示:

$$\sin\beta = \cos\varphi\cos\delta + \sin\varphi\sin\delta \quad (1-5)$$

$$\sin A = \frac{\cos\varphi\sin\delta}{\cos\beta} \quad (1-6)$$

1.1.3 太阳辐射

太阳辐射能是地球上热量的基本来源,是决定太阳能热利用的主要因素,也是建筑外部最主要的气候条件之一。

1. 太阳常数与太阳辐射

太阳辐射热量的大小用辐射照度来表示。它是指 1m^2 黑体表面在太阳辐射下所获得的辐射能通量,单位为 W/m^2 。地球大气层外与太阳光线垂直的表面上太阳辐射照度为 $1353\text{W}/\text{m}^2$,称为太阳常数。

由于太阳与地球之间的距离在逐日变化,地球大气层上边界处与太阳光线垂直的表面的太阳辐射照度也会随之变化,1月1日最大,为 $1405\text{W}/\text{m}^2$,7月1日最小,为 $1308\text{W}/\text{m}^2$,相差约 7%。计算太阳辐射时,如果按月份取不同的值,可达到比较高的精度。表 1-1 给出了各月大气层外边界太阳辐射照度。

表 1-1 各月大气层外边界各月太阳辐射照度

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
辐射照度/ (W/m^2)	1405	1394	1378	1353	1334	1316	1308	1315	1330	1350	1372	1392

太阳辐射的波谱见图 1-8,在各种波长的辐射中能转化为热能的主要是可见光和红外线。太阳的总辐射能中约有 7% 来自于波长为 $0.38\sim 0.76\mu\text{m}$ 的可见光,45.2% 来自于波长在 $0.76\sim 3.0\mu\text{m}$ 的近红外线,2.2% 来自于波长在 $3.0\mu\text{m}$ 以上的长波红外线。当太阳辐射透过大气层时,由于大气层对不同波长的射线具有选择性的反射和吸收作用,到达地球表面的光谱成分发生了一些变化,而且在不同的太阳高度角下,太阳光的路径长度不同,导致光谱的成分变化也不相同。例如当太阳高度角为 41.8° 的时候,在晴天条件下到达海平面的太阳辐射中紫外线占不到 3%,可见光约占 47%,红外线占 50%,太阳高度角越高,紫外线及可见光成分越多;红外线则相反,它的成分随太阳高度角的增加而减少。

2. 大气层对太阳辐射的吸收

太阳辐射量的大小与太阳能热利用有着密切的关系,而太阳辐射量又与太阳辐射的性质和大气气候条件紧密相关。太阳辐射的性质取决于太阳结构和特性,气候条件则由地球和太阳之间的时间、空间关系所决定。因此,我们要开发和利用太阳能,首先得了解太阳与地球之间的关系。