

“十三五”新能源科学与工程专业系列教材

XINNENGYUAN ZHUANHUAN YUANLI YU JISHU TAIYANGNENG

新能源转换原理与技术

太阳能

主 编 邵理堂
李银轮



“十三五”新能源科学与工程类专业系列教材

XINNENGYUAN ZHUANHUAN YUANLI YU JISHU TAIYANGNENG

新能源转换原理与技术

—— 太阳能 ——

主 编

邵理堂 李银轮

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

图书在版编目(CIP)数据

新能源转换原理与技术:太阳能 / 邵理堂, 李银轮
主编. —镇江: 江苏大学出版社, 2016.8
ISBN 978-7-5684-0203-3

I. ①新… II. ①邵… ②李… III. ①太阳能利用—
高等学校—教材 IV. ①TK519

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 201207 号

新能源转换原理与技术:太阳能

主 编/邵理堂 李银轮

责任编辑/徐 婷

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press.ujs.edu.cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/虎彩印艺股份有限公司

经 销/江苏省新华书店

开 本/787 mm×1 092 mm 1/16

印 张/15.75

字 数/377 千字

版 次/2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0203-3

定 价/36.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前言

Preface

随着全球化石能源资源日益枯竭,能源供需矛盾突现。同时,能源特别是化石能源开发利用过程中造成的环境污染和生态破坏等问题日趋突出,能源排放引起的全球气候变化对人类的生存和全球经济发展提出了严峻挑战。发展清洁能源供应系统走低碳经济之路,是全球经济发展的一个必然方向。

太阳能是一种清洁、无污染和可再生的自然资源,是人类可以长期依赖的重要能源之一。狭义上的太阳能利用,是指太阳能的直接转化和利用。太阳能的直接转化利用是全球可再生能源发展战略的重要组成部分,在可再生能源利用中,是总量仅次于传统生物质和水力发电的第三大利用方式。按照太阳能利用途径的不同,太阳能利用技术可分为太阳能热利用、太阳能光伏发电、太阳能光化学利用等几种形式,而太阳能热利用和太阳能光伏发电相对发展最为成熟。

中国太阳能资源十分丰富,年日照时数在 2 200 小时以上地区占国土面积的 2/3 以上。中国是世界上太阳能热利用产业生产和应用的第一大国,全球太阳能热水器约 70% 都在中国,中国的太阳电池产能和产量都已占全球的半壁江山。随着新能源特别是太阳能产业的高速发展,2010 年,国务院通过了《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》,提出要培育和发展包括新能源产业在内的七大战略性新兴产业。同年 7 月,教育部公布《同意设置的高等学校战略性新兴产业相关本科新专业名单》,新能源科学与工程专业便是其中之一。截至目前,全国开设新能源科学与工程专业的高校已达 70 余所。作为一个新专业,教材建设是专业建设的主要内容之一,因此,编写一本适合理工科大学新能源专业的太阳能转换原理与技术教材,系统地介绍太阳能的转换原理与技术,对于培养能够从事与新能源特别是太阳能相关的理论研究、技术开发和管理工作的高级工程技术人员具有重要意义。

全书共分 7 章。第 1 章为太阳辐射的基本知识,主要介绍太阳辐射的特点、计算方法;第 2 章为太阳能转换基础,主要介绍光伏转换与光热转换的基础知识,为后续太阳能利用技术的学习提供准备知识;第 3 章为太阳能储存,主要介绍太阳能热储存和太阳能电储存的方法和技术;第 4 章为太阳能集热器,主要介绍平板集热器、真空管集热器、聚光太阳能集热器的原理及性能;第 5 章为太阳能热利用系统,主要介绍太阳能热水系统、太阳能制冷与空调及太阳能热动力发电系统;第 6 章为太阳电池,主要介绍晶硅电池、薄膜电池的结构、原理与性能表征;第 7 章为太阳能光伏发电系统,主要介绍太阳能光伏发电系统的组成及设计方法。

本书的内容包含原理与技术两个方面。在转换原理上,着重基本理论和基本知识的介绍,也适当给予该领域正在发展的前沿理论介绍;在利用技术上,除常规的利用技术外,也适当地介绍一些最新的工程技术;在叙述上,尽可能避免繁杂的公式推导,力求简单易懂。由于太阳能转换与利用技术涉及工程热物理、半导体物理、材料、化学等多个学科,具有多学科交叉与耦合的特点,因此本书适合具备一定相关专业基础的理工科学生使用,也可供从事太阳能利用技术的工程技术人员参考。

本书由淮海工学院邵理堂教授、青海师范大学李银轮教授主编。第1章由孟春站(淮海工学院)编写,第2章2.1节、2.2节由刘卫卫、胡小燕(盐城师范学院)编写,第2章2.3节由刘学东(淮海工学院)编写,第3章由付鹏(山东理工大学)编写,第4章由李银轮(青海师范大学)编写,第5章由邵理堂(淮海工学院)编写,第6章6.1~6.4节、6.6节由黄增光(淮海工学院)编写,第6章6.5节由汪恒(盐城师范学院)编写,第7章由李天福(常熟理工学院)编写,全书由邵理堂、李银轮统稿。

江苏大学出版社对本书的出版做了大量有益的工作,编者表示衷心感谢!在本书的编写过程中,还参阅了大量的文献资料,引用了许多图表,在此对这些文献资料的作者一并表示衷心的感谢!

限于编者水平,疏漏谬误之处在所难免,恳请同行和读者不吝指正。

编 者

2016年5月



目 录

第 1 章 太阳辐射

- 1.1 太阳 太阳能 / 1
- 1.2 与太阳辐射有关的角度的计算 / 6
- 1.3 太阳辐射的计算 / 12
- 习 题 / 22

第 2 章 太阳能转换原理

- 2.1 概述 / 24
- 2.2 半导体物理基础 / 24
- 2.3 太阳光谱选择性吸收涂层 / 49
- 习 题 / 66

第 3 章 太阳能储存

- 3.1 概述 / 68
- 3.2 太阳能热储存 / 68
- 3.3 太阳能电储存 / 81
- 习 题 / 88

第 4 章 太阳能集热器

- 4.1 概述 / 89
- 4.2 平板型太阳能集热器 / 90
- 4.3 真空管太阳能集热器 / 101
- 4.4 聚光太阳能集热器 / 111
- 习 题 / 123



第5章 太阳能热利用系统

- 5.1 概述 / 125
- 5.2 太阳能热水系统 / 125
- 5.3 太阳能制冷 / 141
- 5.4 太阳能热动力发电 / 147
- 习 题 / 161

第6章 太阳电池

- 6.1 概述 / 162
- 6.2 太阳电池基本结构及工作原理 / 162
- 6.3 性能测试 / 167
- 6.4 晶体硅太阳电池 / 173
- 6.5 薄膜太阳电池 / 184
- 6.6 其他类型太阳电池 / 195
- 习 题 / 202

第7章 太阳能光伏发电系统

- 7.1 概述 / 203
- 7.2 太阳能光伏系统类型 / 204
- 7.3 光伏发电系统组成 / 212
- 7.4 光伏发电系统的性能检测 / 235
- 习 题 / 240

参考文献 / 241



第1章

太阳辐射

在研究太阳能利用时,首先必须掌握太阳辐射能的计算方法,而到达地球表面的太阳辐射能要受天文、地理、几何、物理等诸多因素的影响。

本章首先介绍关于太阳辐射学的一些基础知识,然后给出与太阳辐射有关的角度的定义及计算方法,最后介绍地球表面太阳辐射的计算。

1.1 太阳 太阳能

1.1.1 太阳

太阳是位于太阳系中心距地球最近的恒星,离地球的平均距离为 1.5×10^8 km,是太阳系唯一会发光的天体,其直径大约是 1.39×10^6 km,是地球直径的 109 倍,体积大约是地球的 130 万倍,质量为 1.989×10^{30} kg,是地球质量的 332 000 倍,等于太阳系所有行星质量总和的 745 倍,平均密度为 1.4×10^3 kg/m³,约为地球的 1/4,太阳内部各处密度相差悬殊,外层密度很小,内部在巨大压力的作用下密度极大。从化学组成来看,太阳质量的大约 3/4 是氢,剩下的几乎都是氦,包括氧、碳、氮、铁和其他的重元素质量少于 2%,是一个主要由氢和氦组成的炽热气体火球。

太阳一刻不停地向四周空间辐射巨大的能量,其内部通过核聚变把氢转变为氦,在反应过程中,太阳每秒钟要亏损 4.0×10^9 kg 质量(每 1 g 氢变成氦时质量亏损为 0.072 g),根据质能方程($E = mc^2$),可产生 360×10^{21} kW 的能量。这股能量以电磁波形式向空间四面八方传播,到达地球大气层上界的只占上述总功率的 1/(20 亿),即 180×10^{12} kW。考虑穿越大气层时的衰减,最后到达地球表面的功率为 85×10^{12} kW,相当于全世界发电量的几十万倍,且按照目前的太阳辐射水平,太阳上氢的含量足够维持太阳至少 50 亿年的正常寿命,从这个意义上讲太阳提供的能量是无穷尽的。

太阳结构如图 1-1 所示。按照由内向外的顺序,太阳是由核心、辐射层、对流层、光球层、色球层、日冕层构成。光球层之内称为太阳内部,光球层之外称为太阳大气。

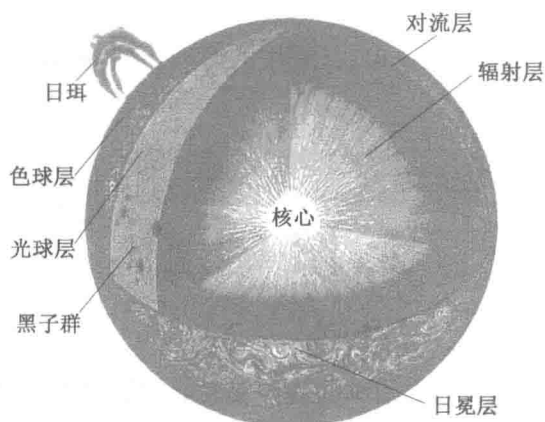


图 1-1 太阳结构

(1) 核反应区

假设太阳的半径为 R , 在 $0 \sim 0.25R$ 范围内为太阳核心, 是太阳发射巨大能量的真正源头, 也称为核反应区。这里温度高达 1 500 万度, 压力相当于 3 000 亿个大气压, 随时都在进行着 4 个氢核聚变成一个氦核的热核反应。根据原子核物理学和质能方程, 每秒有质量为 6 亿吨的氢经过热核聚变反应为 5.96 亿吨的氦, 并释放出相当于 400 万吨氢的能量, 正是这巨大的能源带给了我们光和热。

(2) 辐射层

$0.25R \sim 0.86R$ 范围内是太阳辐射层, 这里包含了各种电磁辐射和粒子流。辐射从内部向外部的传递过程是多次被物质吸收而又再次发射的过程。

(3) 对流层

对流层是辐射层的外侧区域, 其厚度约有十几万千米, 由于这里的温度、压力和密度梯度都很大, 太阳气体呈对流的不稳定状态。太阳内部能量就是靠物质的这种对流, 由内部向外部传输。

(4) 光球层

对流区的外层也就是肉眼可见的太阳表面, 称为光球。光球是一层不透明的气体薄层, 它确定了太阳非常清晰的边界, 其温度约为 6 000 K, 密度为 10^{-3} kg/m^3 , 厚约 500 km。光球内的气体电离程度很高, 因而能吸收和发射连续的辐射光谱。光球是太阳的最大辐射源, 几乎所有的可见光都是从这一层发射出来的。光球表面常有黑子及光斑活动, 这对太阳辐射量及电磁场有强烈的影响, 其活动周期约为 11 年。

(5) 色球层

色球层位于光球层之外, 厚度约 2 000 km。太阳的温度分布从核心向外直到光球层, 都是逐渐下降的, 但到了色球层, 却又反常上升, 到色球层顶部时已达几万度。由于色球层发出的可见光总量不及光球的 1%, 因此人们平常看不到它。只有在发生日全食时, 即食既之前几秒钟或者生光以后几秒钟, 当光球所发射的明亮光线被月影完全遮掩的短暂时间内, 肉眼才能在日面边缘看到太阳呈现出狭窄的玫瑰红色的发光圈层, 这就是色球层。平时, 科学家们要通过单色光(波长为 656.3 nm)色球望远镜才能观测到太阳色球层。

(6) 日冕

日冕是太阳大气的最外层,由高温、低密度的等离子体组成,亮度微弱,在白光中的总亮度比太阳圆面亮度的1%还低,约相当于满月的亮度,因此只有在日全食时才能展现其光彩,平时观测则要使用专门的日冕仪。日冕的温度高达百万度,其大小和形状与太阳活动有关,在太阳活动极大年时,日冕接近圆形;在太阳宁静年则呈椭圆形。自古以来,观测日冕的传统方法都是等待一次罕见的日全食,此时在黑暗的天空背景上,月面把明亮的太阳光球面遮掩住,而在日面周围呈现出青白色的光区,这就是人们期待观测的太阳最外层大气——日冕,如图1-2所示。

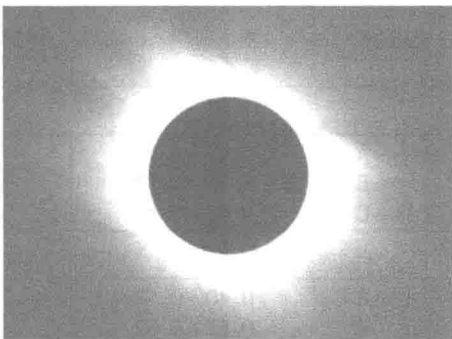


图 1-2 日冕

1.1.2 太阳光谱

如前所述,太阳并不是某一固定温度的黑体辐射体,而是各层发射和吸收各种波长的综合辐射体。太阳辐射中辐射能按波长的分布称为太阳辐射光谱,大气上界太阳光谱能量分布曲线,与用普朗克黑体辐射公式计算出的6 000 K的黑体光谱能量分布曲线非常相似。因此可以把太阳辐射看作黑体辐射。根据维恩位移定律可以计算出太阳辐射峰值的波长 $\lambda_{\max}$ 为 $0.475\ \mu\text{m}$ 。在全部太阳辐射能中,波长为 $0.15\sim 4\ \mu\text{m}$ 的占99%以上,且主要分布在可见光区和红外区,前者占太阳辐射总能量的约50%,后者占约43%;紫外区的太阳辐射能很少,只占总量的约7%。在太阳能利用中,可将太阳看成温度为6 000 K,波长为 $0.3\sim 3\ \mu\text{m}$ 的黑体辐射。

图1-3给出日地平均距离的标准太阳辐射光谱。为使用方便,相应的数据列在表1-1中。

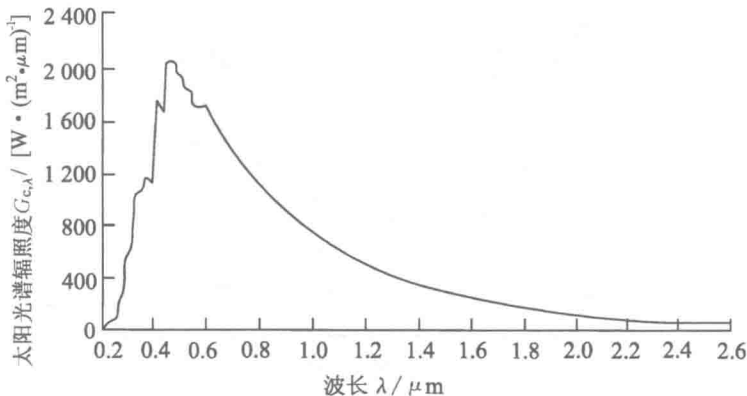


图 1-3 太阳辐射光谱 (NASA,1971 年)

表 1-1 太阳辐射能量按波长分布

光谱段	波长范围/ μm	辐射强度/ (W/m^2)	占总辐射能的百分比/%	
			分区	总计
紫外线				
紫外-A	0.20~0.28	7.864×10^0	0.57	8.02
紫外-B	0.28~0.32	2.122×10^1	1.55	
紫外-C	0.32~0.40	8.073×10^1	5.90	
可见光				
可见-A	0.40~0.52	2.240×10^2	16.39	46.43
可见-B	0.52~0.62	1.827×10^2	13.36	
可见-C	0.62~0.78	2.280×10^2	16.68	
红外线				
红外-A	0.78~1.40	4.125×10^2	30.18	44.91
红外-B	1.40~3.00	1.836×10^2	13.43	
红外-C	3.00~100.00	2.637×10^1	0.93	

1.1.3 太阳常数

太阳和地球的几何关系如图 1-4 所示。由于地球在椭圆轨道上绕太阳运行,引起太阳和地球间的距离在 1.7% 范围内变化。众所周知,某一点的辐射强度与其距离辐射源的距离的平方成反比,所以地球大气层上方的太阳辐射强度会随日地距离的变化而变化。若把地球到太阳的平均距离($1.495 \times 10^{11} \text{ m}$)定义为天文单位(AU),当距离为 1 AU 时,太阳所对的张角为 $32'$ 。由于日地距离变化不大以及太阳发射辐射能的特点,使得地球大气层外的太阳辐照度基本保持不变。当日地距离为平均值,在被照亮半个地球的大气上界,垂直于太阳光线的每平方米的面积上,每秒获得的太阳辐射能量称为太阳常数(solar constant),用 G_{sc} 表示,单位为 (W/m^2) 。太阳常数是一个非常重要的常数,一切有关研究太阳辐射的问题,都要以它为参数。

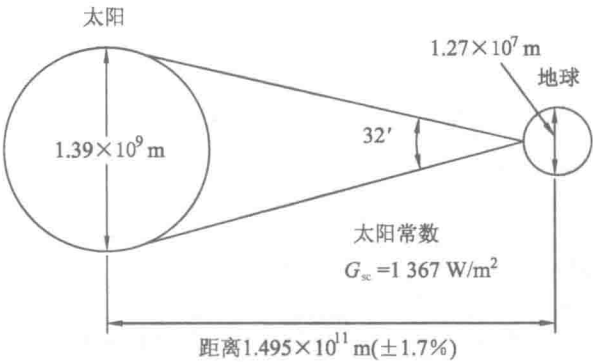


图 1-4 太阳—地球几何关系

早在 20 世纪初,人们就已经通过各种观测手段估计太阳常数的大小,认为太阳常数应为 $1350 \sim 1400 \text{ W}/\text{m}^2$ 。太阳常数虽然经多年观测,但由于观测设备、技术及理论校正方法的不同,其数值常不一致。据研究,太阳常数的变化具有周期性,这可能与太阳黑子

的活动周期有关。在太阳黑子最多的年份,紫外线部分某些波长的辐射强度可为太阳黑子最少年份的 20 倍。近年来,气候学家指出,只要地球的长期气候发生 1% 的变化,就会引起太阳常数的变化。目前已有许多无人或有人操作的空间实验站对太阳辐射进行直接观测,并在宇宙空间实验站设计了名为“地球辐射平衡”的课题,其中一个重要的项目就是对太阳辐射进行长期监视。这些观测数据将对进一步了解大气物理过程及全球气候变迁的原因有很大帮助。1981 年世界气象组织推荐的太阳常数值 $G_{sc} = (1\,367 \pm 7) \text{ W/m}^2$,通常采用 $1\,367 \text{ W/m}^2$ 。

实际上,大气层外的太阳辐照度随着日地距离的改变在 $\pm 3\%$ 范围内变化。它可由公式(1-1)和图 1-5 确定。

$$G_{o,n} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right) \quad (1-1)$$

式中, $G_{o,n}$ 为一年中第 n 天在法向平面上测得的大气层外的辐照度。

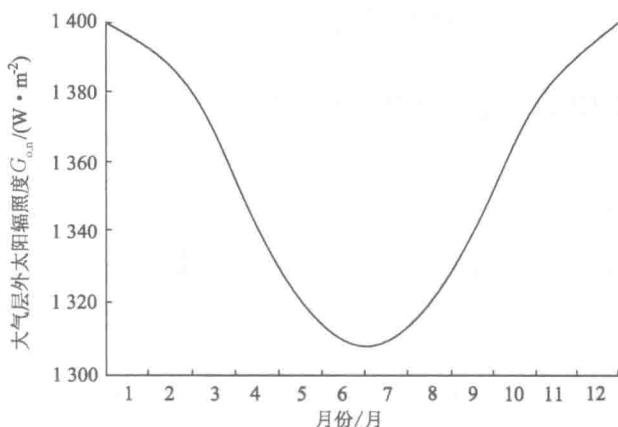


图 1-5 大气层外太阳辐照度与月份的关系

1.1.4 太阳能利用的特点

太阳能利用是开发利用可再生能源的重要领域。依据能量转换的形式,太阳能可以分别转换为热能、电能和化学能等,即太阳能的转换方式有光热转换、光电转换和光化学转换等几种。依据太阳能这些转换原理而加以利用的,分别称之为太阳能热利用、太阳能光电利用和太阳能光化学利用等。

太阳能作为一种可再生能源,与煤炭、石油、天然气等化石能源相比较,其独特的特点可概括为以下几个方面:

① 普遍——阳光普照大地,处处都有太阳能,可以就地利用,不需要到处寻找,更不需要火车、轮船、汽车等日夜不停地运输。这对于解决边远偏僻地区以及交通不便的乡村、山区、海岛等地的能源供应尤为重要。

② 巨大——太阳能储量无比巨大。一年内到达地面的太阳能的总量,要比地球上现在每年消耗的各种能源的总量多几万倍。

③ 长久——只要有太阳,就有太阳能。因此,利用太阳能作为能源,可以说是取之不尽、用之不竭的。

④ 无害——利用太阳能作为能源,没有废渣、废料、废水、废气排出,不产生对人体有害的物质,因而不会污染环境,没有公害。

当然,太阳能还有如下几个不可忽视的缺点:

① 分散性——太阳能的能量密度低。晴朗白天的正午,在垂直于太阳光方向的地面上, 1 m^2 面积所能接受的太阳能,平均只有 1 kW 左右。作为一种能源,这样的能量密度是比较低的。因此在实际利用时,往往需要一套相当大的装置来收集太阳能,这就使得太阳能利用装置占地面积大、用料多,成本较高。

② 间歇性——到达地面的太阳能,随昼夜的交替而变化,这就使大多数太阳能利用装置在夜间无法工作。为克服夜间没有太阳能所造成的困难,就需要配备必要的储能设备,以便在白天把太阳能收集并储存起来,供夜晚使用。

③ 随机性——到达地面的太阳能,由于受气候、季节等因素的影响,是极不稳定的,这也给太阳能利用增加了不少难度。为克服阴雨天没有太阳能所造成的困难,也需要配备必要的储能设备,以便在晴朗天时把太阳能收集并储存起来,供阴雨天使用。

1.2 与太阳辐射有关的角度的计算

1.2.1 相关角度的定义

为了获得最大的太阳辐射能,无论哪一种太阳能利用装置,在设计安装时都要考虑相关角度的选取问题,采光面(集热器的集热面、太阳电池板等)所截取的太阳直接辐射能量,主要取决于太阳入射角 θ ,而 $\theta = f(\delta, \varphi, \beta, \gamma, \omega)$,它是太阳赤纬角 δ 、地理纬度 φ 、采光面的倾斜角 β 、方位角 γ 和太阳时角 ω 的函数。以下给出相关角度的定义。

1.2.1.1 太阳入射角

太阳光线与采光面表面法线之间的夹角,称为太阳光线的入射角,用 θ 表示。太阳光线可分为两个分量,一个垂直于采光面表面,一个平行于采光面表面,只有前者的辐射能被采光面所收集。由此可见,实际使用时应使太阳入射角 θ 越小越好。

1.2.1.2 赤纬角

地球在椭圆形轨道上围绕太阳公转,公转周期为一年,椭圆的偏心率不大,在1月1日近日点时,日地距离为 $1.47 \times 10^8\text{ km}$,在7月1日远日点时为 $1.52 \times 10^8\text{ km}$,相差约3%。地球公转轨道所在平面称为黄道平面。地球自转轴(地轴,即贯穿地球中心与南、北极相连的线)与黄道平面的夹角为 $66^\circ 33'$,地轴在空间的方向始终不变,因而赤道平面与黄道平面的夹角(赤黄角)为 $23^\circ 27'$ 。但是,地心与太阳中心的连线(即午时太阳光线)与地球赤道平面的夹角是一个以一年为周期变化的量,它的变化范围为 $\pm 23^\circ 27'$,这个角被定义为太阳赤纬角。

赤纬角是地球绕日运行规律造成的特殊现象,它使处于黄道平面不同位置上的地球接收到的太阳光线方向不同,从而形成地球四季的变化,如图1-6所示。北半球夏至(6月22日左右)即南半球冬至,太阳光线正射北回归线, $\delta = 23^\circ 27'$;北半球冬至(12月22日左右)即南半球夏至,太阳光线正射南回归线, $\delta = -23^\circ 27'$;春分及秋分,太阳正射赤道,赤纬角都为0,地球南、北半球日夜相等。每天的赤纬角可由下式近似计算:

$$\delta = 23.45^{\circ} \sin \left(360^{\circ} \times \frac{284 + n}{365} \right)$$

(1-2)

式中, n 为所求日期在一年中的日子数,也可借助表 1-2 查出。

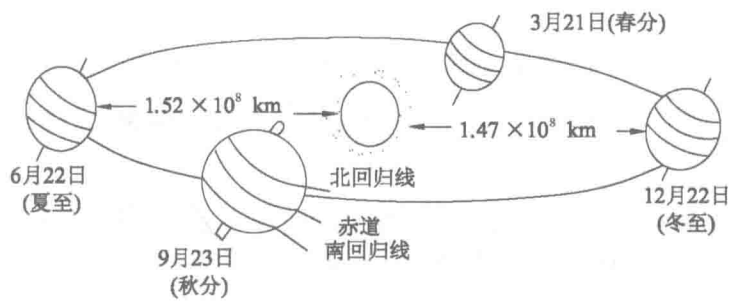


图 1-6 地球绕太阳运行图

表 1-2 推荐每月的平均日及相应的日子数

月份	各月第 <i>i</i> 天的日子数	各月平均日	该天的日子数 <i>n</i> /天	该天赤纬角/(°)
1 月	<i>i</i>	17 日	17	-20.9
2 月	31 + <i>i</i>	16 日	47	-13.0
3 月	59 + <i>i</i>	16 日	75	-2.4
4 月	90 + <i>i</i>	15 日	105	9.4
5 月	120 + <i>i</i>	15 日	135	18.8
6 月	151 + <i>i</i>	11 日	162	23.1
7 月	181 + <i>i</i>	17 日	198	21.2
8 月	212 + <i>i</i>	16 日	228	13.5
9 月	243 + <i>i</i>	15 日	258	2.2
10 月	273 + <i>i</i>	15 日	288	-9.6
11 月	304 + <i>i</i>	14 日	318	-18.9
12 月	334 + <i>i</i>	10 日	344	-23.0

注:① 按某日算出大气层外的太阳辐射量和该月的日平均值最为接近,则将该日定为该月的平均日。

② 表中的 n 数没有考虑闰年,对于闰年 3 月份之后的 n 要加 1,赤纬角也稍有改变。

1.2.1.3 太阳时与时角

(1) 太阳时

在太阳能工程计算中,涉及的时间都是当地太阳时,如无特别说明,以后本书中的时间均为太阳时。太阳时的特点是午时(中午 12 点)阳光正好通过当地子午线,即在空中最高点处,它与日常使用的标准时间并不一致。转换公式为

$$t_s = t + E \pm 4(L - L_s)$$

(1-3)

式中, t_s 为太阳时; t 为当地标准时间; E 为时差; L 为当地经度, (°); L_s 为制定标准时间采用的标准经度, (°)。所在地点在东半球取正号,西半球取负号。

我国以北京时间为标准时间,式(1-3)转变为

$$t_s = \text{北京时间} + E + 4(L - 120) \quad (1-4)$$

转换时考虑了两项修正:

第一项 E 为时差,是地球绕日公转时进动和转速变化而产生的修正, E 以分为单位,可按下式计算:

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (1-5)$$

式中, $B = \frac{360(n-81)}{364}$, n 为所求日期在一年中的日子数, $1 \leq n \leq 365$ 。时差 E 也可以从图 1-7 上查出。

第二项是考虑所在地区的经度与制定标准时间的经度(我国定为东经 120°)之差所产生的修正。由于经度每相差 1° ,在时间上就相差 4 min,所以公式中最后一项乘 4,单位也是 min。

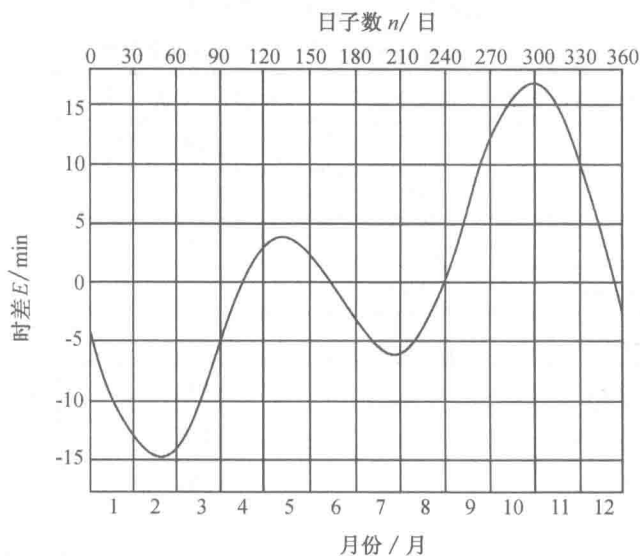


图 1-7 时差曲线

(2) 时角

地球始终绕着地轴由西向东在自转,每转一周(360°)为一昼夜(24 小时)。因此时间可以用角度来表示,每小时相当于地球自转 15° 。

用角度表示的太阳时叫太阳时角(简称时角),以 ω 表示。它是以一昼夜为变化周期的量,太阳午时 $\omega = 0^\circ$,上午取负值,下午取正值。每昼夜变化为 $\pm 180^\circ$,每小时相当于 15° ,例如上午 10 点相当于 $\omega = -30^\circ$;下午 3 点半, $\omega = 52.5^\circ$ 。

1.2.1.4 太阳高度角和太阳方位角

从地面某一观察点向太阳中心作一条射线,该射线在地面上有一投影线,射线与投影线的夹角叫太阳高度角,用 α 表示。该射线与地面法线的夹角叫太阳天顶角,用 θ_z 表示。这两个角度互为余角。假如采光面水平放置,则入射角 θ 与高度角 α 互为余角。

地面上投影线与正南方的夹角为太阳的方位角,用 γ_s 表示。并规定正南方为 0° ,向西为正、向东为负,它的变化范围是 $-180^\circ \sim +180^\circ$ 。

1.2.1.5 采光面方位角

和太阳方位角 γ_s 相类似,采光面表面法线在地平面上也有一投影,此投影线与正南方的夹角称为采光面的方位角,用 γ 表示,度量方法与太阳方位角 γ_s 相同。

1.2.1.6 采光面倾斜角

采光面平面与水平面的夹角叫采光面倾斜角,用 β 表示。

以上各角度的定义如图 1-8 所示。

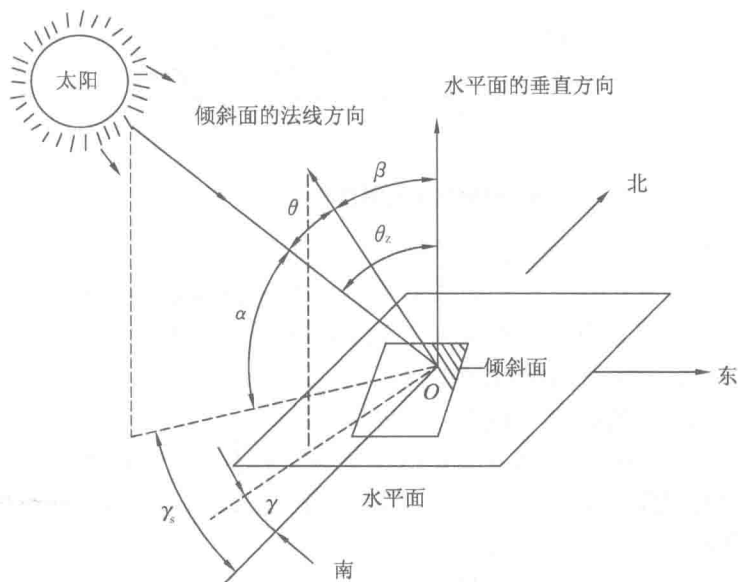


图 1-8 有关几何角度示意图

1.2.2 角度之间的关系和有关公式

计算采光面表面辐射量最重要的是确定太阳入射角 θ , 太阳入射角 θ 与其他角度之间的关系为

$$\cos \theta = \sin \delta (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) + \cos \delta \cos \omega (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (1-6)$$

这是一个非常重要的公式,用式(1-6)可以求出处于任何地理位置、任何季节、任何时候、太阳能集热器处于任何几何位置上的太阳入射角。

以下对不同条件下的简化形式加以讨论。

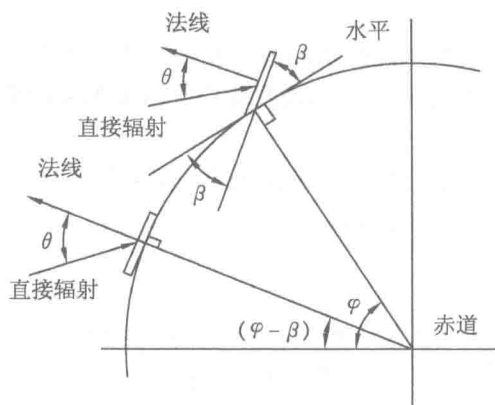
(1) 若采光面朝向正南放置,即采光面方位角 $\gamma = 0$, 式(1-6)变为

$$\cos \theta = \sin \delta \sin (\varphi - \beta) + \cos (\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega \quad (1-7)$$

式(1-7)说明,北半球纬度为 φ 处,朝南放置($\gamma = 0$)、倾角为 β 的采光面表面上的太阳入射角等于纬度为 $(\varphi - \beta)$ 处水平表面上的入射角。它们之间的关系如图 1-9 所示。

若把采光面倾斜角置于与当地纬度角相同,即 $\beta = \varphi$, 上式简化为

$$\cos \theta = \cos \delta \cos \omega \quad (1-8)$$

图 1-9 倾斜面上入射角与 φ, β 角的关系

(2) 若 $\beta = 0^\circ$, 式(1-6)和式(1-7)都变为

$$\cos \theta = \cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega = \sin \alpha \quad (1-9)$$

这是采光面在水平位置上入射角的计算公式,也是太阳高度角 α 的计算式。

对式(1-9)还可以讨论几种特殊情况:

① 在正午时刻,时角 $\omega = 0^\circ$,代入式(1-9)可得

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta = \cos (\varphi - \delta)$$

若 $\varphi = \delta$,则太阳高度角 $\alpha = 90^\circ$ 。这就是说,最大的太阳辐射发生在纬度刚好等于该日太阳赤纬角那些地区的正午时刻。

② 若在春、秋分日的正午时刻,即 $\delta = 0^\circ, \omega = 0^\circ$,则式(1-9)变成 $\sin \alpha = \cos \varphi$,这说明太阳高度角随纬度增大而减小。

③ 每天日出及日落时刻,太阳处于地平面上,此时太阳高度角 $\alpha = 0^\circ$,式(1-9)变为

$$\begin{aligned} \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega &= 0 \\ \cos \omega &= -\tan \delta \tan \varphi \end{aligned} \quad (1-10)$$

即 $\omega = \arccos(-\tan \delta \tan \varphi)$,根据此式可求出地面上任何地区、任何一天的日出和日落时的时角。

按纬度和赤纬角,也可在图 1-10 上求出夏天及冬天的日落时间。例如北纬 36° 、赤纬角 20° 时,夏天的日落时间为下午 7:08,冬天日落时间为下午 4:52。

再用

$$N = \frac{2}{15} \omega = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \delta \tan \varphi) \quad (1-11)$$

算出相应那天的白昼长。

上式中, N 为日照时间。乘以 2 表示日落、日出时间对午时来说是对称的,除以 15 是将时角转化为小时数。