# 太阳能热利用

岑幻霞　编著

清华大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

(京)新登字 158 号

## 内 容 提 要

本书介绍了太阳能热利用基础理论和各种装置的结构、原理与应用技术,内容包括有太阳辐射计算、集热器以及太阳能热水、干燥、供暖和制冷等。尤其在太阳能干燥及供暖方面,作者总结了自己的研究工作及国内外主要成果,给出理论分析、实例、图表和数据,本书可作为大学生和研究生选修或参考教材,也可供从事能源利用研究的科技人员和有关工农业生产、建筑设计与施工等单位的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能热利用/岑幻霞编著. —北京:清华大学出版社,1996
ISBN 7-302-02357-3

Ⅰ.太… Ⅱ.岑… Ⅲ.太阳能-应用 Ⅳ.TK519

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 22955 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)
印刷者:北京环球印刷厂
发行者:新华书店总店北京科技发行所
开 本:787×1092 1/16 印张:11.75 字数:293 千字
版 次:1997 年 1 月 第 1 版 1997 年 1 月 第 1 次印刷
书 号:ISBN 7-302-02357-3/TK·23
印 数:0001—3000
定 价:20.00 元

# 前　　言

随着人类生产及生活水平的提高，世界能源消费量大幅度增长。研究表明，1965 年比 1900 年几乎增长了 6 倍，预计 2000 年将比 1965 年增长 4.5 倍。过去的 40—50 年，能源消耗很大部分来自矿物燃料。多次的能源危机使人们认识到，矿物燃料资源是有限的，世界石油资源只能维持几十年，人们不得不逐渐把关注的重点转移到新能源的开发和利用上去。预计下个世纪内，新能源将在世界能源消费构成中占据越来越重要的地位。有人把原子能和太阳能称为 21 世纪的能源。

每年到达地球表面的太阳辐射能约为目前世界能耗总和的 $2\times10^4$ 倍，太阳能是数量巨大的能源；根据目前太阳辐射总功率及太阳上氢总含量的估算，太阳能尚可继续维持 1000 亿年，它是取之不尽，用之不竭的能源；太阳能不需要开采及运输，不受任何国家垄断，是随处可得的廉价能源；它还是清洁且安全的能源。太阳能资源的缺点是到达地球表面的能流密度低；受昼夜、季节以及晴阴云雨等因素的影响，是间断且不稳定的。如上所述，如何发扬太阳能资源的优点以及克服其应用之不便，是世界各国能源研究开发的焦点之一。

太阳辐射能可通过光—电转换为电能，主要用于发电；可通过光—化学转换为化学能，例如制氢等；可通过光—热转换为热能，这是目前技术较为成熟，成本低廉，因而应用最为广泛的形式。太阳能热利用是一门新兴的综合性学科，70 年代以来在理论和技术上均得到迅速发展，多方面的实际应用显示出可观的社会和经济效益，并且还蕴藏着巨大的发展潜力。

我国太阳能热利用事业起步不算晚，在“六五”、“七五”及“八五”计划期间发展很快，已经取得了一批很有成效的研究成果，其中有的项目已达到国际先进水平；建立了不少具有相当规模的专业研究机构；几乎每年均要举行有关太阳能研究的学术活动；出版了一些有关太阳能的专著、教科书和供工程技术人员使用的设计手册；并且许多省市都有了生产太阳能设备的工厂，太阳能工业方兴未艾。

本书系统地讲述了太阳能热利用的基础理论及实际应用。内容包括有太阳辐射能计算，集热器以及太阳能热水、干燥、供暖和制冷方面的知识。在书中作者总结了自己多年来在太阳能热利用方面的教学、科研及设计工作和国内外研究成果，既反映了国内外先进技术，也结合了我国的国情，以期适应四个现代化建设对开发新能源的探索与实际应用的需要。

本书可作为大学本科生教材，研究生选修或参考教材，也可供从事能源利用研究的科技人员以及有关工农业生产、建筑设计与施工等单位的工程技术人员参考。

限于编著者的学术水平，书中有错误和不妥之处，诚盼广大读者批评指正。

作者　1996 年 2 月

# 目　　录


第 1 章　太阳辐射 …… 1
1-1　地球的自转与公转 …… 1
1-2　太阳角 …… 2
1-3　太阳辐射强度计算 …… 5
1-4　月平均太阳辐射日总量的计算 …… 8
1-5　太阳能集热器倾角 θ的确定 …… 14

第 2 章　太阳辐射的透过、吸收和反射以及光谱选择性材料 …… 16
2-1　太阳辐射的透过、吸收和反射 …… 16
2-2　半透明物体对太阳辐射的吸收、反射和透过 …… 16
2-3　半透明板的有效透过率、有效吸收率和有效反射率 …… 18
2-4　双层半透明体的有效透过率、吸收率及反射率 …… 18
2-5　光谱选择性材料 …… 19

第 3 章　平板型集热器 …… 21
3-1　平板型集热器的构造 …… 21
3-2　平板型集热器能量平衡方程 …… 22
3-3　平板型集热器的总热损失系数 …… 23
3-4　平板型集热器的效率因子及热转移因子 …… 26
3-5　集热器瞬时效率及热效率曲线 …… 31
3-6　平板型集热器的热容量对性能的影响 …… 34
3-7　平板型集热器热性能试验 …… 36
3-8　空气集热器 …… 38
3-9　真空管集热器 …… 39
3-10　热管式平板型集热器 …… 50

第 4 章　太阳能热水装置 …… 51
4-1　太阳热水系统的类型 …… 51
4-2　自然循环式太阳热水系统 …… 53
4-3　强制循环式太阳热水系统 …… 54
4-4　直流式太阳热水系统 …… 57
4-5　太阳热水系统设计中应考虑的问题 …… 58
4-6　家用太阳热水器热性能试验 …… 60




需要全本请访问 www.ertongbook.com

第 5 章　太阳能干燥装置 …… 62
5-1　概述 …… 62
5-2　太阳能干燥器的物料衡算 …… 63
5-3　太阳能干燥器分类 …… 66
5-4　干燥动力学 …… 68
5-5　物料干燥特性研究 …… 75
5-6　太阳能干燥过程的动态分析 …… 83
5-7　提高太阳能干燥器热效率的措施 …… 98
5-8　温室型太阳能干燥装置 …… 105
5-9　集热器型太阳能干燥系统类型及设计举例 …… 116
5-10　集热器-温室型太阳能干燥系统 …… 121

第 6 章　太阳能采暖 …… 126
6-1　我国太阳能资源情况及利用太阳能采暖的可能性 …… 126
6-2　太阳能采暖系统 …… 126
6-3　被动式太阳能供暖系统的分类 …… 130
6-4　被动式太阳房性能的评价指标 …… 134
6-5　被动式太阳房的最佳朝向 …… 136
6-6　屋顶太阳能集热方式分析及评价 …… 142
6-7　主动式太阳能暖房 …… 147
6-8　太阳能暖房设计程序 …… 151
6-9　太阳能地下建筑降湿动态模拟研究 …… 165

第 7 章　太阳能制冷 …… 172
7-1　太阳能制冷系统的类型 …… 172
7-2　太阳能制冷系统效率的分析 …… 174
7-3　太阳能吸收式制冷系统 …… 176

参考文献 …… 180

# 第 1 章　太 阳 辐 射

## 1-1　地球的自转与公转

太阳与地球之间的平均距离约为 $1.5\times 10^{8}$km，在太阳与地球的中心连线上，地球表面某点至太阳的张角仅为 32′，因此，可近似地将太阳投射到地球上的光线视为一组平行光束。

地球是个不透明的球体，太阳光照射过来只能照亮地球的一半，因此向阳的半球是白天，背阳的半球是黑夜。如果地球没有自转，则向阳的半球始终是白天，背阳的半球始终是黑夜。由于地球绕着自己的地轴不断地自西向东旋转，使得地球表面上的一个地方，有时是白天，有时是黑夜，因而产生了昼夜交替的现象。地球自转一次的时间即一昼夜，为 24h(小时)。

地球是一个球体，太阳虽然在同一时间照亮了半个地球，却只直射了地球表面上的一个点。如果地球绕太阳运行的轨道平面(黄道平面)与地球的赤道面的交角为零，则太阳将永远直射在赤道上，虽有公转也不能有季节的变化。

如图 1-1 所示，地轴与地球绕太阳运行的轨道平面的法线呈固定倾角，其值为 23°27′。地球绕太阳公转，太阳直射点在地球表面上的位置在北纬 23°27′和南纬 23°27′之间来回移动，而产生了四季交替的现象。

图 1-1　地轴与轨道面相对位置图

图 1-2　地球受日射情况

如图 1-2 所示，我们看一下春、夏、秋、冬季中几个特征日期——春分、夏至、秋分及冬至时，地球与太阳相对位置的变化。

春分和秋分日，太阳直射赤道，中午 12 时太阳位于赤道线的正上空，赤道地区出现相对比较热的天气，地球两极距太阳的距离正好相等，两分点意思即昼夜平分。除两极外，地球上所有各地正好昼夜各 12h。

夏至日，阳光垂直照射在北纬 23°27′地面上，在南极圈中整天不见太阳，在北极圈内则整天太阳不落。北半球出现相对比较热的天气，而在南半球出现相对比较冷的天气。

冬至日，阳光直射在南纬 23°27′的地面上，北极圈内整天不见阳光，南极圈内则整天太阳不落。

地球绕太阳逆时针旋转,其运行轨道接近椭圆形,由于太阳所居位置有所偏心,因此,太阳与地球之间的距离逐日在变化。1 月 1 日两者距离最近,约为 $1.47\times 10^{8}$km,7 月 1 日两者距离最远,约为 $1.53\times 10^{8}$km。为什么当地球是近日点时,我国正是冬季,气温较低;而当地球是远日点时,我国正是夏季,气温较高?原因是:当我国是冬季时,地球是近日点,可是我国位于北半球,此时,阳光垂直照射在南半球上,阳光和北半球地平面的夹角较小,阳光在一天中照射在北半球上的时间也较短,所以,太阳总辐射量较少,气温也较低;夏季情况则相反。

## 1-2 太 阳 角

地面上某处所接受到的太阳辐射能量的大小与太阳相对于地球的位置有关,为此,采用一系列的太阳角,对上述位置进行描述。

### 1-2-1 赤纬角 δ

地球中心与太阳中心的连线与地球赤道平面的夹角称为赤纬角。由于地轴的倾斜角永远保持不变,致使赤纬角随时都在变化。它与所在地区无关,世界上不同地区,只要日期相同,就具有相同的赤纬角。

用下列公式可计算出逐日的赤纬角 δ

$$\delta = 23.45\sin\frac{2\pi d}{365} \tag{1-1}$$

或

$$\delta = 23.45\sin 360\times\frac{284+n}{365} \tag{1-2}$$

式中, δ——一年中第 n 天或离春分第 d 天的赤纬;

d——由春分日起算的日期序号;

n——一年中日期序号。

春分和秋分日, δ= 0,冬至日, δ= - 23.5°,夏至日, δ= 23.5°。

表 1-1 给出了太阳赤纬角 δ与日期的对照。

表 1-1 太阳赤纬角 δ与日期对照表

| δ(°) 月 \ 日 | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 | 25 | 29 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | - 23.1 | - 22.7 | - 22.2 | - 21.6 | - 20.9 | - 20.1 | - 19.2 | - 18.2 |
| 2 | - 17.3 | - 16.2 | - 14.9 | - 13.7 | - 12.3 | - 10.9 | - 9.4 | |
| 3 | - 7.9 | - 6.4 | - 4.8 | - 3.3 | - 1.7 | - 0.1 | + 1.5 | + 3.0 |
| 4 | + 4.2 | + 5.8 | + 7.3 | + 8.7 | + 10.2 | + 11.6 | + 12.9 | + 14.2 |
| 5 | + 14.8 | + 16.0 | + 17.1 | + 18.2 | + 19.1 | + 20.0 | + 20.8 | + 21.5 |
| 6 | + 21.9 | + 22.5 | + 22.9 | + 23.2 | + 23.4 | + 23.4 | + 23.4 | + 23.3 |
| 7 | + 23.2 | + 22.9 | + 22.5 | + 21.9 | + 21.3 | + 20.6 | + 19.8 | + 19.0 |

续表

| δ(°) 日 / 月 | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 | 25 | 29 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | + 18.2 | + 17.2 | + 16.1 | + 14.9 | + 13.7 | + 12.4 | + 11.1 | + 9.7 |
| 9 | + 8.6 | + 7.1 | + 5.6 | + 4.1 | + 2.6 | + 1.0 | - 0.5 | - 2.1 |
| 10 | - 2.9 | - 4.4 | - 5.9 | - 7.5 | - 8.9 | - 10.4 | - 11.8 | - 13.2 |
| 11 | - 14.2 | - 15.4 | - 16.6 | - 17.7 | - 18.8 | - 19.7 | - 20.6 | - 21.3 |
| 12 | - 21.7 | - 22.3 | - 22.7 | - 23.1 | - 23.3 | - 23.4 | - 23.4 | - 23.3 |

### 1-2-2 时角 ω

地球自转一周为 360°,相应的时间为 24h,每 1h 地球自转的角度定义为时角 ω,则 ω=360/24= 15°。正午时角为零,其他时辰时角的数值等于离正午的时间(h)乘以 15。上午时角为负值,下午时角为正值。例如,上午 10 时和下午 2 时的时角分别为- 30°及+ 30°。

真太阳时是以当地太阳位于正南向的瞬时为正午。由于太阳与地球之间的距离和相对位置随时间在变化,以及地球赤道与其绕太阳运行的轨道所处平面的不一致,因而真太阳时与钟表指示的时间(平均太阳时)之间就会有所差异。将它们的差值称为时差。真太阳时 H 可按下式计算:

$$H = H_s \pm \frac{L - L_s}{15} + \frac{e}{60} \tag{1-3}$$

式中, $H_s$—— 该地区标准时间,单位为(h)时;

L, $L_s$—— 分别为当地的经度和地区标准时间位置的经度;对于东半球,式中"±"号取正号,对于西半球则取负号;

e—— 时差,单位为 min(分钟);其值可参见表 1-2,全年各日的时差可用下式近似计算:

$$e = 9.87\sin 2B - 7.53\cos B - 1.5\sin B \tag{1-4}$$

$$B = \frac{360(n - 81)}{364} \qquad 1 < n < 365$$

表 1-2 各月 21 日的时差

| 月 份 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 时差(min) | - 11.2 | - 13.9 | - 7.5 | + 1.1 | + 3.3 | - 1.4 | - 6.4 | - 2.4 | + 7.5 | + 15.4 | + 13.8 | + 1.6 |

若将真太阳时用角度表示,则称为当地太阳时角,计算公式为:

$$\omega = H_s \pm \frac{L - L_s}{15} + \frac{e}{60} - 12 \times 15 \tag{1-5}$$

### 1-2-3 太阳高度角

对于地球表面上某点来说,太阳的空间位置可用太阳高度角和太阳方位角来确定。

太阳高度角 h 是地球表面上某点和太阳的连线与地平面之间的交角，可用下式计算：

$$\sin h = \sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos\omega \qquad (1\text{-}6)$$

式中，$\phi$——当地纬度；

$\delta$——赤纬角；

$\omega$——太阳时角。

从公式可以看出，太阳高度角随地区、季节和每日时刻的不同而改变。

### 1-2-4 太阳天顶角 z

地球表面上某点水平面的法线与太阳射线之间的夹角称为天顶角 z。显然，

$$z = 90° - h \qquad (1\text{-}7)$$

### 1-2-5 太阳方位角

太阳方位角 $\alpha$ 是太阳至地面上某给定点连线在地面上的投影与南向(当地子午线)的夹角。太阳偏东时为负，偏西时为正。太阳方位角的计算公式为：

$$\sin\alpha = \frac{\cos\delta\sin\omega}{\cos h} \qquad (1\text{-}8)$$

图 1-3 太阳高度角、方位角及天顶角

当采用上式计算出的 $\sin\alpha$ 大于 1 时，应改用下式计算：

$$\cos\alpha = \frac{\sin h\sin\phi - \sin\delta}{\cos h\cos\phi} \qquad (1\text{-}9)$$

表 1-3 给出了北纬 40 的太阳高度角及方位角。

表 1-3 北纬 40 的太阳高度角及方位角

| 时间 | | 5:00<br>19:00 | 6:00<br>18:00 | 7:00<br>17:00 | 8:00<br>16:00 | 9:00<br>15:00 | 10:00<br>14:00 | 11:00<br>13:00 | 12:00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 太阳高度角 | 春、秋分 | | | 13° | 23° | 33° | 42° | 48° | 50° |
| | 夏至 | 4° | 14° | 26° | 37° | 48° | 59° | 69° | 73.5° |
| | 冬至 | | | | 5° | 14° | 21° | 25° | 26.5° |
| 方位角 | 春、秋分 | | | 82° | 72° | 57° | 42° | 23° | 0° |
| | 夏至 | 118° | 109° | 100° | 91° | 80° | 65° | 37° | 0° |
| | 冬至 | | | | 53° | 42° | 29° | 15° | 0° |

### 1-2-6 任意平面上的太阳光入射角 i

1. 任意平面的倾斜角 $\theta$

任意倾斜平面与水平面之间的夹角称为该平面的倾斜角 $\theta$。对于垂直面，$\theta = 90°$；对于水平面，$\theta = 0°$。

2. 任意平面的方位角 γ

任意倾斜平面的法线在水平面的投影与正南方向线之间的夹角称为任意平面的方位角 γ。倾斜平面面向正南时，γ= 0°；面向东时，γ为负；面向西时，γ为正。

图 1-4　阳光入射角示意图

3. 阳光入射角 i

太阳入射线与平面法线之间的夹角称为阳光入射角 i。平面倾斜角 θ、平面方位角 γ与阳光入射角 i之间的几何关系见图 1-4。

对于倾斜角为 θ、平面方位角为 γ的平面，阳光入射角 i可用下式计算：

$$\cos i = \cos\theta\sin h + \sin\theta\cos h\cos(\alpha - \gamma) \tag{1-10}$$

对于水平面，θ= 0，所以

$$\cos i = \sin h \tag{1-11}$$

对于垂直面，θ= 90°，所以

$$\cos i = \cos h\cos(\alpha - \gamma) \tag{1-12}$$

对于面向正南的任意倾斜角为 θ的斜面：

$$\cos i = \cos(\varphi - \theta)\cos\delta\cos\omega + \sin(\varphi - \theta)\sin\delta \tag{1-13}$$

### 1-2-7　日出、日没时角

太阳视圆面中心出没地平线瞬间的时角，叫做日出、日没时角，亦即太阳高度角取零时的时角。由式(1-6)确定的日出、日没时角为：

$$\omega = \pm\cos^{-1}(-\operatorname{tg}\varphi\operatorname{tg}\delta) \tag{1-14}$$

式中正值表示日没时角，负值表示日出时角。

## 1-3　太阳辐射强度计算

### 1-3-1　直射辐射、散射辐射和总辐射

太阳辐射穿过大气层时，将受到大气中各类气体，如臭氧、二氧化碳、水汽和灰尘等物的吸收；还会被云层中的尘埃、冰晶、微小水珠及各种气体分子反射或折射而形成漫向辐射，这辐射能的一部分返回宇宙空间中去，一部分到达地面。我们把改变了原来方向到达地球表面



需要全本请访问 www.ertongbook.com

并无特定方向的这部分太阳辐射称为散射辐射,其余未被吸收、反射及折射的太阳辐射仍按原来的方向透过大气层直达地面,此部分称为直射辐射。直射辐射与散射辐射之和称为总辐射。

### 1-3-2 太阳常数

太阳是一个巨大的炽热气体球,中心区域温度达几千万度,表面平均温度约 6000K,它以电磁波的形式向宇宙空间辐射能量,总称为太阳辐射。由于太阳本身的特征以及它与地球之间的空间关系,使得地球大气层外与太阳光线垂直面上的辐射强度几乎是一个定值,“太阳常数”就是由此而来。

太阳常数是指太阳与地球之间为年平均距离时,地球大气层上边界处,垂直于太阳光线的表面上,单位面积、单位时间内所接收到的太阳辐射能量。以 $I_0$ 表示。以前多用 $I_0=1353W/m^2$,最新观测结果表明 $I_0=1367W/m^2$。

由于太阳与地球之间的距离逐日在变化,地球大气层上边界处垂直于阳光射线表面上的太阳辐射强度也会随之变化,1 月 1 日最大,7 月 1 日最小,相差约 7%。其各月数值见表 1-4。计算太阳辐射量时,按月份采取不同数值,其精度完全可以满足工程要求。

表 1-4 各月大气层外边界处太阳辐射强度 $I_0$

| 月份 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_0/W/m^2$ | 1419 | 1407 | 1391 | 1367 | 1347 | 1329 | 1321 | 1328 | 1343 | 1363 | 1385 | 1406 |

### 1-3-3 大气质量 m

太阳辐射透过大气层时,通过的路程越长,则大气对太阳辐射的吸收、反射和散射量越多,即太阳辐射被衰减的程度也越历害,到达地面的辐射通量便越小。为了表示大气对太阳辐射衰减作用的大小,一般采用大气质量 m 这一概念。大气质量 m 被定义为:太阳光线穿过地球大气层的路程与太阳在天顶时太阳光线穿过地球大气层的路程之比。规定在海平面上,当太阳处于天顶位置时,太阳光垂直照射所通过的路程为 1,所以,当太阳高度角 $h\geq30°$,忽略地球曲率的影响(参见图(1-5)),大气质量可由下式计算:

图 1-5 大气质量示意图

图 1-6 法向太阳辐射强度

$$m = \frac{1}{\sin h} \tag{1-15}$$

### 1-3-4 晴天地球表面的太阳辐射强度计算

1. 法向太阳辐射强度 $I_{DN}$

法向太阳辐射强度 $I_{DN}$ 即与阳光射线相垂直的表面上(即太阳法线方向)的太阳直射辐射强度,见图 1-6。

$$I_{DN} = I_0 P^m \tag{1-16}$$

式中,$I_0$——垂直于大气层外边界处的太阳辐射强度;

$P$——大气透明系数;

$m$——光线通过的大气质量。

2. 水平面直射辐射强度 $I_{DH}$

$$I_{DH} = I_{DN} \sin h = I_0 P^m \sin h \tag{1-17}$$

3. 水平面散射辐射强度 $I_{dH}$

$$I_{dH} = \frac{1}{2} I_0 \sin h \frac{1 - P^m}{1 - 1.4 \ln P} \tag{1-18}$$

4. 水平面上的总辐射强度 $I_H$

$$I_H = I_{DH} + I_{dH} = I_0 \sin h \left( P^m + \frac{1 - P^m}{2(1 - 1.4 \ln P)} \right) \tag{1-19}$$

### 1-3-5 任意倾斜平面上的太阳辐射强度计算

1. 倾斜平面上太阳总辐射强度 $I_\theta$

$$I_\theta = I_{D\theta} + I_{d\theta} + I_{R\theta} \tag{1-20}$$

式中,$I_{D\theta}$——倾斜平面上太阳直射辐射强度;

$I_{d\theta}$——倾斜平面上太阳散射辐射强度;

$I_{R\theta}$——倾斜平面上所获得的地面反射辐射强度。

2. 倾斜平面上太阳直射辐射强度 $I_{D\theta}$

$$I_{D\theta} = I_{DN} \cos i \tag{1-21}$$

$$I_{D\theta} = I_{DH} \frac{\cos i}{\sin h} \tag{1-22}$$

3. 倾斜平面上太阳散射辐射强度 $I_{d\theta}$

$$I_{d\theta} = I_{dH} \cos^2 \frac{\theta}{2} \tag{1-23}$$

式中,$\theta$——倾斜平面相对于水平面的倾斜角。

4. 倾斜面上所获得的地面反射辐射强度 $I_{R\theta}$

太阳光线射到地面上以后,其中一部分又被地面反射至倾斜平面上,该部分即倾斜平面上所获得的地面反射辐射强度 $I_{R\theta}$

$$I_{R\theta} = \rho_d I_H \left(1 - \cos^2 \frac{\theta}{2}\right) \tag{1-24}$$

式中,$\rho_d$——地面的平均反射率,取用 0.2。

## 1-4　月平均太阳辐射日总量的计算

上面所讲的太阳辐射强度的计算,系指晴天情况。太阳能热利用系统中需考虑一个时期如一个月的平均能量的收集,为此,需得出太阳总辐射日总量的月平均值。该值最好是来自实测资料的统计和整理,通常整理成水平面上按月平均的日总辐射值。如 1976 年北京地区每月水平面上总辐射量的日平均值由表 1-5 给出。

表 1-5　北京地区 1976 年水平面上月平均日总辐射 $H_H$　　单位: J/ ($cm^2$ · d)

| 月　份 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 总辐射 $H_H$ | 1026 | 1004 | 1565 | 1729 | 2395 | 2228 | 1451 | 1582 | 1573 | 1171 | 847 | 738 |
| 直射辐射 $H_{DH}$ | 652 | 459 | 886 | 704 | 1303 | 1301 | 564 | 826 | 886 | 675 | 463 | 374 |
| 散射辐射 $H_{dH}$ | 375 | 545 | 679 | 1026 | 1092 | 927 | 887 | 756 | 688 | 497 | 384 | 365 |

当这种实测资料缺乏时,可采用间接的计算方法求得。这种方法主要是根据由观测资料统计整理成的经验公式推算而得。目前这些经验公式种类繁多,这里仅介绍由我国太阳能资料得到的经验公式。

### 1-4-1　月平均太阳总辐射日总量的计算

Angstrom 提出的公式为:

$$H_H = H_C \left(a + b\frac{N}{N_0}\right) \tag{1-25}$$

式中, $H_H$ —— 水平面上总辐射日总量的月平均值。

$H_C$ —— 晴天水平面上总辐射日总量的月平均值。可根据不同纬度的日射观测资料来确定,其方法是把各种纬度的许多测站的太阳总辐射都绘制成图,图的横坐标为一年中的日期,纵坐标为多年观测的太阳总辐射日总量。图中点子分布在上限非常明显的一定范围内,因为这些顶部的点子,显然是属于晴天的,那么通过这些顶点划出平滑曲线以后,便能得出晴天太阳总辐射日总量的年变化曲线,从而求出各月太阳总辐射平均值。利用这一方法根据我国的日射观测资料,总结出我国北纬 20°～50° 范围内各月的太阳总辐射值,列于表 1-6 中。

a, b —— 经验系数。根据我国气象资料,总结出适用于我国地区的值为: a = 0.248, b = 0.752。

$N/N_0$ —— 日照百分率,其中 N 为实际每天日照时数的月平均值; $N_0$ 为同一时期内每天可能的日照持续小时数。例如北京地区历年各月平均实际日照时数统计在表 1-7 中。

表 1-6　我国北纬 20°～50°晴天太阳总辐射月总量　　单位: kW·h/($m^2$·月)

| 纬度＼月份 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 年总和 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (1) 平原区 | | | | | | | | | | | | | |
| 50.0 | 66.29 | 100.02 | 161.66 | 208.18 | 254.70 | 268.65 | 261.68 | 218.64 | 169.80 | 116.30 | 74.43 | 54.66 | 1955.01 |
| 47.5 | 77.92 | 111.65 | 169.80 | 213.99 | 257.02 | 270.98 | 264.00 | 224.46 | 176.78 | 127.93 | 87.23 | 66.29 | 2048.05 |
| 45.0 | 89.55 | 123.28 | 175.61 | 219.81 | 258.19 | 272.14 | 266.33 | 230.27 | 182.59 | 138.40 | 98.86 | 76.76 | 2131.79 |
| 42.5 | 101.18 | 131.42 | 182.59 | 224.46 | 260.51 | 273.31 | 267.49 | 236.09 | 189.57 | 148.86 | 110.49 | 86.06 | 2212.03 |
| 40.0 | 109.32 | 138.40 | 186.08 | 226.79 | 262.84 | 274.47 | 269.82 | 240.74 | 196.55 | 157.01 | 118.63 | 95.37 | 2276.02 |
| 37.5 | 115.14 | 139.56 | 186.08 | 224.46 | 259.35 | 267.49 | 264.00 | 238.42 | 196.55 | 160.49 | 122.12 | 101.18 | 2274.84 |
| 35.0 | 117.46 | 140.72 | 184.92 | 220.97 | 252.37 | 259.35 | 255.86 | 233.76 | 195.38 | 161.66 | 125.60 | 108.16 | 2256.21 |
| 32.5 | 120.95 | 1403.5 | 184.92 | 216.32 | 246.56 | 251.21 | 248.88 | 227.95 | 195.38 | 163.98 | 131.42 | 112.81 | 2243.43 |
| 30.0 | 127.93 | 147.70 | 186.08 | 213.99 | 243.07 | 250.05 | 246.56 | 225.62 | 196.55 | 168.64 | 139.56 | 118.63 | 2264.38 |
| 27.5 | 140.72 | 158.17 | 191.90 | 219.81 | 245.39 | 253.53 | 248.83 | 230.27 | 202.36 | 177.94 | 148.86 | 131.42 | 2349.25 |
| 25.0 | 153.52 | 168.64 | 195.38 | 226.79 | 253.53 | 260.51 | 258.19 | 237.25 | 208.18 | 187.24 | 160.49 | 144.21 | 2453.93 |
| 22.5 | 154.68 | 167.47 | 193.06 | 224.46 | 250.05 | 255.86 | 253.53 | 237.25 | 208.18 | 183.75 | 160.49 | 145.38 | 2434.16 |
| 20.0 | 154.68 | 163.98 | 188.41 | 217.48 | 244.23 | 250.05 | 247.72 | 232.60 | 202.36 | 179.10 | 159.33 | 145.38 | 2385.32 |
| (2) 青藏高原区 | | | | | | | | | | | | | |
| 37.5 | 117.46 | 146.54 | 189.57 | 238.42 | 280.28 | 289.59 | 282.61 | 254.70 | 211.67 | 167.47 | 124.44 | 104.67 | 2407.42 |
| 35.0 | 123.28 | 154.68 | 191.90 | 243.07 | 282.61 | 293.08 | 284.94 | 259.35 | 218.64 | 173.29 | 133.75 | 115.14 | 2473.73 |
| 32.5 | 140.72 | 170.96 | 211.67 | 253.53 | 286.10 | 296.57 | 288.42 | 262.84 | 225.62 | 187.24 | 150.03 | 125.60 | 2599.30 |
| 30.0 | 167.47 | 198.87 | 236.09 | 270.98 | 294.24 | 302.38 | 295.40 | 272.14 | 241.90 | 210.50 | 177.94 | 148.86 | 2816.77 |

表 1-7　北京地区历年各月平均实际日照时数

| | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 平均 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1961-1970 10年平均/h | 209.2 | 201.8 | 248.6 | 231.2 | 293.5 | 283.1 | 242.7 | 230.8 | 245.0 | 221.5 | 193.0 | 193.4 | |
| 1951-1970 20年平均/h | 207.0 | 201.9 | 236.0 | 249.2 | 284.0 | 275.0 | 237.6 | 229.4 | 244.4 | 227.8 | 192.0 | 194.2 | |
| 月平均每天日照数/h | 6.7 | 7.15 | 7.6 | 8.3 | 9.46 | 9.15 | 7.66 | 7.4 | 8.16 | 7.6 | 6.4 | 6.26 | 7.65 |

近年来,在计算我国太阳能资源时,采用理想大气中的总辐射代替晴天总辐射计算出各地的 a 和 b'。

表 1-8　各纬度各等压面高度上理想大气中的月总辐射量　　单位: 100 kW·h/(m²·月)

| 纬度 \ 月份 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 年 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1000hPa | | | | | | | | | | | | | |
| 16° | 2247 | 2264 | 2784 | 2871 | 3018 | 2916 | 3003 | 2967 | 2750 | 2601 | 2245 | 2162 | 31828 |
| 18 | 2164 | 2205 | 2747 | 2867 | 3042 | 2951 | 3034 | 2976 | 2729 | 2547 | 2171 | 2074 | 31505 |
| 20 | 2078 | 2143 | 2706 | 2859 | 3062 | 2983 | 3062 | 2981 | 2704 | 2490 | 2094 | 1986 | 31148 |
| 22 | 1991 | 2079 | 2662 | 2848 | 3078 | 2908 | 3086 | 2983 | 2675 | 2430 | 2015 | 1895 | 30755 |
| 24 | 1902 | 2012 | 2615 | 2834 | 3091 | 3039 | 3107 | 2981 | 2643 | 2367 | 1934 | 1802 | 30327 |
| 26 | 1812 | 1943 | 2564 | 2816 | 3101 | 3061 | 3125 | 2976 | 2608 | 2301 | 1851 | 1709 | 29866 |
| 28 | 1719 | 1871 | 2510 | 2794 | 3107 | 3081 | 3140 | 2966 | 2569 | 2233 | 1766 | 1614 | 29371 |
| 30 | 1626 | 1798 | 2452 | 2769 | 3110 | 3098 | 3151 | 2955 | 2527 | 2162 | 1680 | 1518 | 28845 |
| 32 | 1531 | 1723 | 2392 | 2741 | 3109 | 3111 | 3158 | 2938 | 2482 | 2088 | 1593 | 1422 | 28288 |
| 34 | 1436 | 1646 | 2329 | 2709 | 3105 | 3121 | 3163 | 2919 | 2434 | 2012 | 1503 | 1324 | 27701 |
| 36 | 1340 | 1567 | 2262 | 2674 | 3097 | 3129 | 3164 | 2896 | 2382 | 1936 | 1413 | 1227 | 27085 |
| 38 | 1243 | 1487 | 2193 | 2636 | 3086 | 3133 | 3162 | 2876 | 2328 | 1852 | 1323 | 1129 | 26449 |
| 40 | 1146 | 1403 | 2121 | 2594 | 3072 | 3135 | 3157 | 2841 | 2270 | 1769 | 1225 | 1032 | 25774 |
| 42 | 1049 | 1322 | 2047 | 2550 | 3055 | 3133 | 3150 | 2808 | 2210 | 1684 | 1139 | 935 | 25083 |
| 44 | 935 | 1238 | 1970 | 2502 | 3035 | 3129 | 3139 | 2772 | 2148 | 1597 | 1047 | 839 | 24370 |
| 46 | 857 | 1154 | 1891 | 2452 | 3012 | 3122 | 3125 | 2734 | 2093 | 1510 | 954 | 744 | 23636 |
| 48 | 762 | 1068 | 1809 | 2398 | 2986 | 3113 | 3109 | 2692 | 2014 | 1420 | 862 | 640 | 22885 |
| 50 | 668 | 982 | 1725 | 2342 | 2958 | 3103 | 3091 | 2647 | 1943 | 1329 | 771 | 559 | 22120 |
| 52 | 577 | 896 | 1640 | 2284 | 2927 | 3090 | 3071 | 2600 | 1870 | 1237 | 681 | 470 | 21343 |
| 54 | 488 | 810 | 1552 | 2222 | 2894 | 3076 | 3049 | 2551 | 1795 | 1145 | 592 | 385 | 20559 |
| 800hPa | | | | | | | | | | | | | |
| 16° | 2275 | 2292 | 2817 | 2903 | 3052 | 2949 | 3037 | 3001 | 2782 | 2632 | 2274 | 2190 | 32204 |
| 18 | 2192 | 2232 | 2779 | 2899 | 3076 | 2985 | 3068 | 3004 | 2760 | 2578 | 2198 | 2102 | 31881 |
| 20 | 2106 | 2170 | 2738 | 2892 | 3096 | 3018 | 3092 | 3015 | 2735 | 2520 | 2121 | 2013 | 31521 |
| 22 | 2018 | 2105 | 2694 | 2881 | 3113 | 3047 | 3121 | 3017 | 2706 | 2460 | 2042 | 1921 | 31125 |
| 24 | 1929 | 2038 | 2646 | 2867 | 3126 | 3073 | 3143 | 3015 | 2674 | 2397 | 1960 | 1828 | 30696 |
| 26 | 1837 | 1968 | 2595 | 2849 | 3136 | 3096 | 3161 | 3010 | 2639 | 2331 | 1877 | 1734 | 30232 |
| 28 | 1745 | 1897 | 2541 | 2827 | 3143 | 3117 | 3175 | 3014 | 2658 | 2223 | 1791 | 1638 | 29748 |

续表

| 纬度＼月份 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 年 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 1650 | 1823 | 2483 | 2802 | 3145 | 3133 | 3187 | 2989 | 2558 | 2190 | 1704 | 1541 | 29206 |
| 32 | 1555 | 1747 | 2422 | 2773 | 3145 | 3147 | 3195 | 2973 | 2512 | 2115 | 1616 | 1444 | 28644 |
| 34 | 1459 | 1669 | 2358 | 2742 | 3141 | 3157 | 3200 | 2953 | 2464 | 2039 | 1526 | 1346 | 28054 |
| 36 | 1361 | 1590 | 2292 | 2707 | 3134 | 3165 | 3201 | 2931 | 2412 | 1560 | 1435 | 1247 | 27435 |
| 38 | 1264 | 1509 | 2222 | 2668 | 3123 | 3170 | 3199 | 2911 | 2358 | 1878 | 1343 | 1148 | 26794 |
| 40 | 1166 | 1427 | 2150 | 2627 | 3109 | 3171 | 3195 | 2876 | 2300 | 1795 | 1250 | 1050 | 26116 |
| 42 | 1068 | 1343 | 2075 | 2582 | 3092 | 3170 | 3187 | 2843 | 2240 | 1710 | 1158 | 952 | 25420 |
| 44 | 970 | 1259 | 1998 | 2534 | 3072 | 3166 | 3177 | 2807 | 2177 | 1622 | 1065 | 855 | 24701 |
| 46 | 873 | 1173 | 1918 | 2484 | 3049 | 3160 | 3163 | 2768 | 2111 | 1533 | 971 | 758 | 23963 |
| 48 | 777 | 1086 | 1836 | 2430 | 3023 | 3151 | 3148 | 2727 | 2042 | 1443 | 878 | 664 | 23206 |
| 50 | 582 | 997 | 1751 | 2374 | 2995 | 3141 | 3130 | 2682 | 1971 | 1351 | 786 | 571 | 22436 |
| 52 | 589 | 913 | 1665 | 2315 | 2965 | 3129 | 3109 | 2635 | 1898 | 1258 | 695 | 481 | 21651 |
| 54 | 499 | 826 | 1577 | 2253 | 2932 | 3115 | 3088 | 2586 | 1822 | 1165 | 605 | 394 | 20861 |
| 600hPa | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 1866 | 1997 | 2630 | 2885 | 3175 | 3135 | 3200 | 3048 | 2673 | 2363 | 1905 | 1762 | 30638 |
| 28 | 1773 | 1925 | 2575 | 2863 | 3182 | 3155 | 3215 | 3051 | 2634 | 2294 | 1819 | 1665 | 30151 |
| 30 | 1677 | 1850 | 2517 | 2838 | 3185 | 3172 | 3226 | 3027 | 2592 | 2222 | 1732 | 1568 | 29606 |
| 32 | 1576 | 1774 | 2456 | 2810 | 3185 | 3186 | 3235 | 3011 | 2546 | 2147 | 1642 | 1469 | 29042 |
| 34 | 1484 | 1696 | 2392 | 2778 | 3181 | 3197 | 3240 | 2991 | 2498 | 2070 | 1552 | 1370 | 2849 |
| 36 | 1386 | 1616 | 2325 | 2743 | 3174 | 3205 | 3242 | 2969 | 2446 | 1990 | 1460 | 1270 | 27825 |
| 38 | 1287 | 1534 | 2255 | 2704 | 3163 | 3210 | 3240 | 2949 | 2391 | 1908 | 1368 | 1171 | 27180 |
| 40 | 1188 | 1451 | 2182 | 2663 | 3150 | 3212 | 3236 | 2913 | 2333 | 1824 | 1274 | 1071 | 26497 |

所谓理想大气又称干洁大气,指没有水汽和各种悬浮微粒的大气。理想大气中使日射削弱的因子是臭氧、氧和二氧化碳的选择性吸收以及空气分子的散射。

$$H_H = H_g(a' + b'N/N_0) \tag{1-26}$$

式中，$H_g$——理想大气中水平面上总辐射日总量的月平均值。表 1-8 中给出北纬 16°～54°地区 1000 和 800hPa 等压面高度(代表海拔高度)上的以及北纬 16°～40°地区 600hPa 等压面高度上的理想大气中的月总辐射量。

$a'$,$b'$——经验系数。

通过对观测资料的回归分析,得出适用于我国一些地区的 $a'$,$b'$ 系数,如表 1-9 所示。

由表中可以看出,$b'$ 值变化较大,并发现它与当地的年平均绝对湿度 $E_n$ 有关,经回归分析得到:



需要全本请访问 www.ertongbook.com