

太阳位置及运动

第一节 太阳与太阳能

太阳是离地球最近的一颗恒星，直径约为 $1.39 \times 10^6 \text{ km}$ ，是地球直径的 109 倍；太阳的表面温度约为 6000K，一刻不停地向四周发射出巨大能量，其总量每秒钟达到 $3.87 \times 10^{26} \text{ J}$ （焦耳），地球大气表层接受的能源是其中的 22 亿分之一，约为 $1.76 \times 10^{17} \text{ J}$ ，折合标煤约 $6 \times 10^6 \text{ t}$ ，大约 40min 照射在地球上的太阳能，便足以供全球人类一年。

太阳能是可再生能源的一种。开发利用太阳能，对于节约常规能源、保护自然环境、减缓气候变化等，都具有极其重大的意义。

1. 替代化石能源

在当今世界的能源结构中，人类利用的能源主要是石油、天然气和煤炭等化石能源。据有关资料统计，2014 年世界一次能源消费量为 12928.4 百万吨油当量（million tons of oil equivalent, Mtoe），其中中国占总量的 23%。随着全球经济的发展，人口的增加，社会生活的提高，未来世界能源消费量还将继续增长，至 2035 年，全球能源需求增长将超过 1/3，而中国贡献了增幅的 32%。

我国一次能源消费总量一直呈上升态势，2014 年，我国一次能源消费总量已达到 42.6 亿 t 标煤。据 IEA 预测，未来的十年，中国将变成全球最大的能源消费国，到 2035 年，中国的能源消费将超过美国 80%。而我国的能源资源储量体现石油、天然气资源匮乏特点，中国人均能源资源占有量远比世界平均值要低，人均煤炭占有量仅约为世界人均水平的 1/2，石油约 1/10，天然气约 1/20。

由此可见，在人类开发利用能源的历史长河中，以石油、天然气和煤炭等化石能源为主的时期，仅是一个不太长的阶段，它们终将走向枯竭而被新的能源所取代。太阳能是可利用量最大可再生能源，达到 $6 \times 10^{14} \text{ kW}$ ，也是可利用量唯一可满足人类社会未来能源需求的可再生能源，必将成为化石能源的替代能源。

2. 保护自然环境

化石能源的大量开采和使用，是造成全球环境污染与生态破坏，进而危害人类健康和生命的主要原因之一。如何在开发和利用能源的同时，保护好人类赖以生存的地球的环境与生态，已经成为一个全球性的重大问题。

我国的能源开发利用对于环境造成的污染也相当严重。我国是世界上少数几个能源结构以煤炭为主的国家，也是世界上最大的煤炭消费国。煤炭燃烧所产生的 CO_2 排放量比燃烧同热值的天然气要高 61%，相比燃油要高 36%。不仅如此，煤炭燃烧还产生 SO_2 、 NO 、粉

尘等有害物质，严重污染周围的自然环境和生态环境。

与此相反，包括太阳能在内的可再生能源，没有或只有很少的污染物排放，清洁干净，因而是与自然环境和生态环境相协调的清洁能源。

太阳能作为一种能源，与煤炭、石油、天然气等化石能源相比较，有其独占鳌头的特点。太阳能的优点可概括为以下几点：

(1) 普遍——阳光普照大地，没有地域限制。无论陆地或海洋，无论高山或岛屿，处处皆有，可直接开发利用，且无需开采和运输。

(2) 清洁——开发利用太阳能不会污染环境，它是最清洁的能源之一，不像化石能源利用会产生温室气体和污染物。

(3) 量大：每年到达地球表面的太阳辐射能约相当于 1.3×10^{15} t 煤，大约 40min 照射在地球上的太阳能，便足以供全球人类一年。

(4) 长久：根据目前太阳产生的核能速率估算，氢的储量足够维持上百亿年，而地球的寿命也约为几十亿年，从这个意义上讲，可以说太阳的能量是用之不竭的。

当然，太阳能还有如下几个不可忽视的特点：

(1) 分散性——即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， 1m^2 面积所能接受的太阳能，平均只有 1kW 左右。这样的能量密度在实际利用时，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) 不稳定性——由于受到昼夜、季节、地理环境和海拔高度等自然条件的限制以及天气变化等随机因素的影响，到达地面的太阳能随昼夜的交替而变化，随天气变化波动的和不稳定的，这给太阳能的大规模应有增加了难度。为了满足全年供能需求，太阳能系统必须解决蓄能问题，即把晴朗天气下白天的太阳能尽量储存起来，以供夜间或者阴雨天使用，但是目前蓄能也是太阳能利用技术之中的薄弱环节。

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，分别称为“太阳能热利用”、“太阳能光电利用”和“太阳能光化学利用”等。本书介绍的内容集中在太阳能热利用基础知识。

第二节 太阳位置表示方法

一、地球的自转与公转

地球上，一天中有昼夜之分，一年中又有春夏秋冬四季之分。这些自然现象，都是地球自转以及地球绕太阳公转而引起的。

地球每天由西向东绕着通过它自身的南极和北极的“地轴”自转，地球自转一周 360° ，形成一个昼夜，每昼夜分为 24h，所以地球每小时自转 15° 。

地球除了自转以外，还绕太阳公转，公转周期为一年。地球绕太阳公转是循着偏心率很小的椭圆形轨道上运行，地球的自转轴与公转运行的轨道面有 $23^\circ 27'$ 夹角。在地球公转时，自转轴的方向始终不变，这就使得阳光有时直射赤道的位置，有时偏北，有时偏南，从而形成地球上春夏秋冬季节的变化。



图 1-1 是以春分、夏至、秋分、冬至四个季节典型日代表地球公转的行程图。春分日，阳光垂直照射在地球的赤道位置上，地面上昼夜相等；夏至日，阳光垂直照射在北纬 $23^{\circ}27'$ 的地表上，在南极圈（南纬 $66^{\circ}33'$ ）内整天见不到太阳，北极圈内则整天太阳不落；秋分日，阳光垂直照射在地球的赤道位置上，地面上昼夜相等；冬至日，阳光垂直照射在南纬 $23^{\circ}27'$ 的地表上，北极圈（北纬 $66^{\circ}33'$ ）内整天不见阳光，南极圈内整天太阳不落，见图 1-2。

地球绕太阳运行一周，历时一年，计 365 天 5h48min46s，这一周期在天文学上称为一个“回归年”。在实际日历中，规定一年 365 天，称为“平年”；每四年增加一天至 366 天，称为“闰年”。

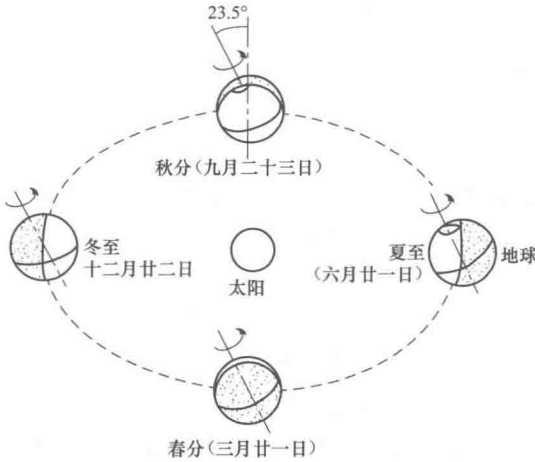


图 1-1 地球绕太阳运行示意图

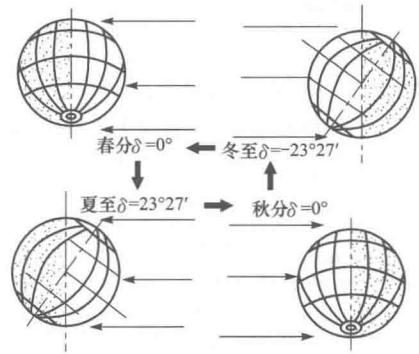


图 1-2 地球受太阳照射情况

由于地球绕太阳运行轨道是一个椭圆，所以地球和太阳之间的距离在一年之内是变化的。如表 1-1 所示，1 月初地球过近日点，那时它离开太阳比日地平均距离小 1.7%；7 月初地球过远日点，那时它离开太阳比日地平均距离大 1.7%；4 月初和 10 月初，地球和太阳的距离等于日地平均距离。

所谓“日地平均距离”是指地球公转的长半径，它等于 $1.496 \times 10^8 \text{ km}$ ，天文学常用它作为计量天体距离的单位，称为一个“天文单位”。由表 1-1 可以看出，一年中的日地距离变动大约 $5 \times 10^6 \text{ km}$ 。

表 1-1

日地距离的变化

日期	距离 (km)	日期	距离 (km)
1 月初	147096000 (最小)	7 月初	152105000 (最大)
4 月初	149601000	10 月初	149601000

由于到达地球表面的太阳辐照度与距离的平方成反比，它所引起太阳辐照能量的变化为年平均值的 $\pm 3.5\%$ 之内。正因为如此，不同日期测到的日射数值是不能相互比较的，尤其是对于太阳辐照能量的精确测定。为了克服这一点，日射测定学中规定，以日地平均距离所对应的日射数值为标准值，其他任何时间测定的日射数值，都统一修正到日地平均距离的情况下去进行比较。根据平方反比定律，得到

$$S_{R_0} = \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 S_R = \frac{S_R}{r} \quad (1-1)$$

式中 S_{R_0} ——日地平均距离所对应的日射数值；

S_R ——任何时间测定的日射数值；

R_0 ——日地平均距离；

R ——任何时间的日地距离；

r ——表征日地距离变化的修正系数， $r = \left(\frac{R_0}{R}\right)^2$ 。

修正系数 r 近似满足以下关系式（参见 GB/T 31155—2014《太阳能资源等级总辐射》）

$$r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \quad (1-2)$$

式中 n ——距离 1 月 1 日的天数。

相关文献和 QX/T 89—2008《太阳能资源评估方法》给出了其他拟合关系式。

二、天球坐标系

1. 天球

所谓“天球”，就是人们站在地球表面上，仰望天空，平视四周时看到的这个假想球面。为了符合人的直观感觉，根据相对运动的原理，可以把地球看成不动，太阳就好像在这个球面上周而复始地运动一样。

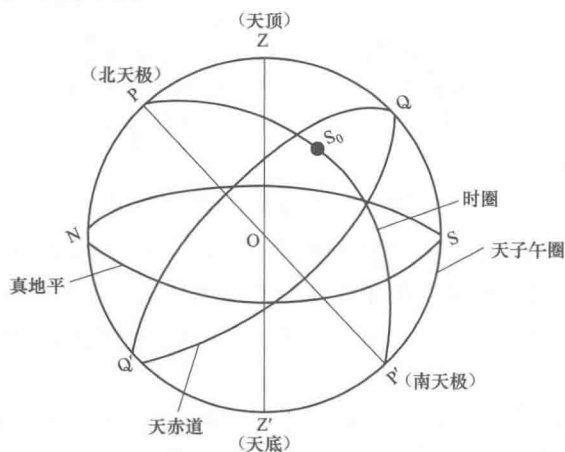


图 1-3 天球的基本点和圈

(1) 天轴与天极。

首先让我们以地平面观测点 O 为球心，任意长度为半径作一个天球。通过天球中心 O 作一根直线 POP' 与地轴平行，这条直线称为天轴。天轴和天球交于 P 和 P' ，其中与地球北极相对应的 P 点，称为北天极；与地球南极相对应的 P' 点，称为南天极，如图 1-3 所示。

天轴是一条假想的直线。由于地球绕地轴旋转是等速运动的，因此天球绕天轴旋转也是等速的均匀运动，即每小时转动 15° 角。天球在旋转过程中，只有南、北两个天极点是固定不动的。北极星大致位于天球旋转轴的北天极附近。因此，人们也往往利用北极星来判别北极方向。

因此，人们也往往利用北极星来判别北极方向。

(2) 天赤道。

通过天球球心 O 作一个平面与天轴相垂直，显然它和地理赤道面是平行的。这个平面和天球相交所截出的大圆 QQ' ，称为天赤道。

(3) 时圈。

通过北天极 P 和太阳 S_0 的大圆 PS_0P' ，称为时圈。它与天赤道是相互垂直的。由于天赤道到太阳的角距离是用相应于这个圆的赤纬来量度的，因而又称为赤纬圈。

(4) 天顶和天底。

通过天球球心 O 作一根直线和观测点铅垂线平行，它和天球的交点为 Z 和 Z' 。其中 Z 恰好位于观测者的头顶上，称为天顶，和 Z 相对应的另一点 Z' ，则位于观测者的脚底下，



称为天底。

(5) 真地平。

通过天球球心 O 与 ZZ' 相垂直的平面在天球上所截出的大圆 SN ，称为真地平，有时又称为数学水平面。

(6) 经圈与天子午圈。

通过观察者天顶 Z 的大圆，称为地平经圈，简称经圈。它与真地平是相垂直的，因此也称为垂圈。

通过天顶 Z 和北天极 P 的特殊的经圈 $PZSN$ ，通常称为天子午圈。它和真地平交于点 N 和 S 。靠近北极的点 N 称为北点，而与北极正相对的点 S 称为南点；若观测者面向北，其右方距南北点各为 90° 的点， E 称为东点，而与东点正相对的点 W 称为西点，且东、西两点正好是天赤道和真地平的交点。

在了解了天球上的基本点和基本圈之后，球面上点的位置就可以用这些基本点和基本圈所组成的“天球坐标系”来确定。在确定太阳在天球上的位置时，常用的天球坐标系有两种：赤道坐标系和地平坐标系。下面分别阐述赤道坐标系和地平坐标系。

2. 赤道坐标系

赤道坐标系如图 1-4 所示。

在赤道坐标系中，太阳 S_0 的位置是由下列两个坐标决定：

第一个坐标是圆弧 QB ，称为时角，以 ω 表示。时角是从天子午圈上的 Q 点起算的，即从太阳时的正午起算，按顺时针方向计量为正，反时针方向计量为负，也就是上午为负，下午为正。它的数值等于离正午的时间 (h) 乘以 15° 。

第二个坐标是圆弧 BS_0 ，称为赤纬，以 δ 表示。赤纬 δ 自天赤道起算。对于太阳来说，向北天极由两分日的 0° 变化到夏至日的 $+23^\circ 27'$ ，向南天极则由两分日的 0° 变化到冬至日的 $-23^\circ 27'$ 。

太阳赤纬 δ 值无时无刻不在变化着。但在一天之内， δ 的最大变化不超过 0.5° 。因此，在假设每一天的太阳赤纬 δ 为一个恒定不变的数值时，所引入的误差小于 0.5° 。太阳赤纬 δ 值满足的关系式为

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \times \frac{284+n}{365}\right) \quad (1-3)$$

式中 n ——一年的天数 (如春分 $n=81$ ，则 $\delta=0$)。

相关文献和 GB/T 31155—2014《太阳能资源等级总辐射》给出了太阳赤纬 δ 值其他拟合关系式。

太阳赤纬 δ 值随季节的变化如图 1-5 所示。

“时角”体现“时间”的含义，“赤纬”体现与“日期”关联性。即赤道坐标系是通过确定“日期”和“时间”来表征太阳相对于地球的位置 (方向)。

3. 地平坐标系

地平坐标系如图 1-6 所示。

在地平坐标系中，太阳 S_0 的位置是由下面两个坐标确定：

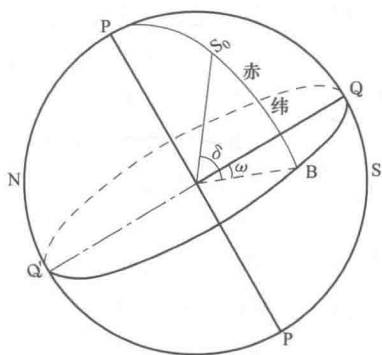


图 1-4 赤道坐标系

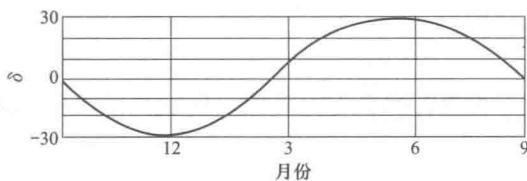


图 1-5 太阳赤纬的年变化

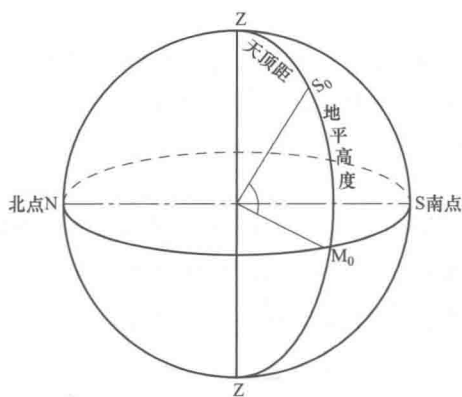


图 1-6 地平坐标系

第一个坐标是圆弧 ZS_0 ，称为天顶角，以 θ_z 表示；也可用圆弧 S_0M ，称为太阳高度角，以 α_s 表示。天顶角 θ_z 和太阳高度角 α_s 有下列关系

$$\theta_z + \alpha_s = 90^\circ \quad (1-4)$$

第二个坐标是圆弧 SM ，称为方位角，以 γ_s 表示，并取南点 S 为起点，向西（顺时针方向）计算为正，向东（逆时针方向）计算为负。

地平坐标系是先在地球上确定一个位置后，以该点建立一个三维坐标系，再确定某时刻太阳在该坐标系中的方向坐标，即天顶角和方位角。

4. 太阳角的计算

太阳能系统的设计必然要涉及太阳高度角、方位角、日照时间等计算问题。根据球面三角形的有关定理，可以推导出太阳高度角和方位角的计算式，如图 1-7 所示。

(1) 太阳高度角。计算太阳高度角的表达式为

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

式中 α_s ——太阳高度角；

φ ——地理纬度；

δ ——太阳赤纬；

ω ——时角。

当太阳正午时， $\omega=0$ ，式 (1-5) 可简化为

$$\begin{aligned} \sin \alpha_s &= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \\ &= \cos(\varphi - \delta) = \sin[90^\circ \pm (\varphi - \delta)] \end{aligned} \quad (1-6)$$

当正午太阳在天顶以南，即 $\varphi > \delta$ 时，取

$$\begin{aligned} \sin \alpha_s &= \sin[90^\circ - (\varphi - \delta)] \\ \alpha_s &= 90^\circ - \varphi + \delta \end{aligned} \quad (1-7)$$

或

$$\theta_z = \varphi - \delta$$

正午时纬度、赤纬角和太阳天顶角的关系示意图如图 1-8 所示。

当正午太阳在天顶以北，即 $\varphi < \delta$ 时，取 $\sin \alpha_s = \sin[90^\circ + (\varphi - \delta)]$

$$\alpha_s = 90^\circ + \varphi - \delta \quad (1-8)$$

当正午太阳正对天顶，即 $\varphi = \delta$ 时，则 $\alpha_s = 90^\circ$ 。

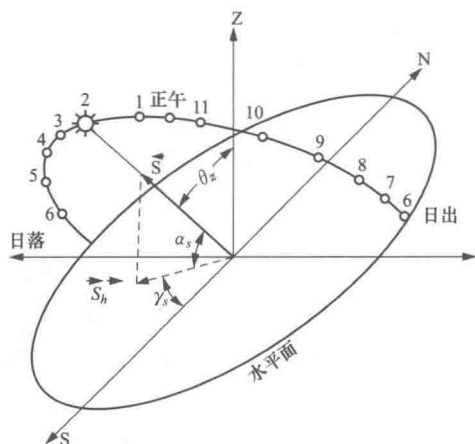


图 1-7 太阳高度角及方位角示意图



(2) 太阳方位角。计算太阳方位角的表达式为

$$\sin\gamma_s = \frac{\cos\delta\sin\omega}{\cos\alpha_s} \quad (1-9)$$

式(1-9)值大于1时,方位角按式(1-10)计算

$$\cos\gamma_s = \frac{\sin\alpha_s\sin\varphi - \sin\delta}{\cos\alpha_s\cos\varphi} \quad (1-10)$$

式中 γ_s ——太阳方位角,北半球的正南向为 0° ,正东向为 -90° ,正西向为 90° 。

利用式(1-9)或式(1-10),再根据地理纬度、太阳赤纬及观测时间,即可算出任何地区、任何季节、任何时刻的太阳方位角。

例 1-1: 试求北京 5 月 16 日 14 时的太阳高度角、太阳方位角。

【解】 北京地区纬度 $\varphi=40^\circ$, 由式(1-3)计算 5 月 16 日太阳赤纬 $\delta=18.9^\circ$

下午 14 时的时角 $\omega = 2 \times 15^\circ = 30^\circ$

(1) 求该时太阳高度角。将已知代入 φ 、 δ 和 ω 值,代入式(1-5),得

$$\sin\alpha_s = \sin 40^\circ \sin 18.9^\circ + \cos 40^\circ \cos 18.9^\circ \cos 30^\circ = 0.8359$$

$$\alpha_s = 56.7^\circ$$

(2) 求该时太阳方位角。将已知代入 δ 、 ω 值,代入式(1-9),得

$$\sin\gamma_s = \frac{\cos 18.9^\circ \sin 30^\circ}{\cos 56.7^\circ} = 0.8616$$

$$\gamma_s = 59.5^\circ$$

(3) 日出日落的时间和方位角。

当太阳出没地平线的瞬间,其高度角 $\alpha_s=0^\circ$,由式(1-5)即可得到日出日落的时角表达式

$$\omega_{\text{起}} = \arccos(-\tan\varphi\tan\delta) \quad (1-11)$$

求出日出日落的时角后,根据地球自转的角速度 $15^\circ/\text{h}$,即可计算出一天的可能的日照时间,表达式为

$$N = \frac{2}{15} \arccos(-\tan\varphi\tan\delta) \quad (1-12)$$

根据其高度角 $\alpha_s=0^\circ$,由式(1-10)即可得到日出日落的方位角的表达式

$$\cos\gamma_{s,0} = \frac{-\sin\delta}{\cos\varphi} \quad (1-13)$$

式(1-13)对日出日落都有两个解,因此,要选定一个正确的解。就我国地区而论,当太阳赤纬 $\delta>0^\circ$ 时,太阳升起和降落均落在北面的象限(方位角绝对值大于 90°);当太阳赤纬 $\delta=0^\circ$ 时,太阳由正东升起,从正西降落;当太阳赤纬 $\delta<0^\circ$ 时,太阳升起和降落均落在南面的象限(方位角绝对值小于 90°)。

例 1-2: 试求北京 5 月 16 日的太阳日出日落的时间和方位角。

【解】 北京地区纬度 $\varphi=40^\circ$; 5 月 16 日太阳赤纬 $\delta=18.9^\circ$

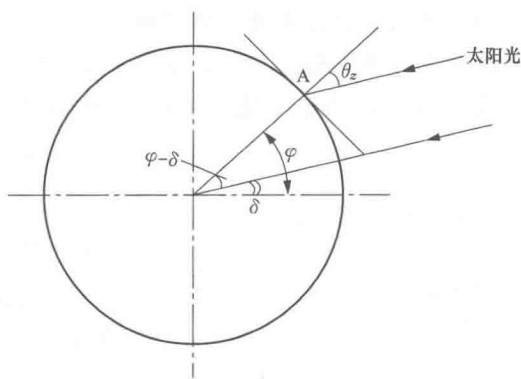


图 1-8 正午时纬度、赤纬角和太阳天顶角的关系示意图

(1) 求该日的日出日落的时间。

将已知 φ 和 δ 值, 代入式 (1-11), 日出日落的时角为:

由于赤纬 $\delta > 0^\circ$ 时, 太阳升起和降落均落在北面的象限 (方位角绝对值大于 90°)

$$\omega_{\rho} = \arccos(-\tan 40^\circ \tan 18.9^\circ) = 106.7^\circ$$

日出时间

$$12 - 106.7/15 = 4.89, \text{即 } 4:53$$

日落时间

$$12 + 106.7/15 = 19.11, \text{即 } 19:07$$

全天日照时间, 由式 (1-12) 得

$$N = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) = 14.23(\text{h})$$

(2) 求该日的日出日落的太阳方位角。将已知 φ 和 δ 值, 代入式 (1-13), 得

$$\cos \gamma_{s,0} = \frac{-\sin \delta}{\cos \varphi} = -0.4228$$

$$\gamma_{s,0} = \pm 115^\circ$$

日出时, 太阳方位角为 -115° (正南偏东 115°);

日落时, 太阳方位角为 $+115^\circ$ (正南偏西 115°)。

为了便于计算, 日出日落时角 (以时间表示) 与赤纬和纬度的关系, 可制成列线图, 如图 1-9 所示。利用它可以不经过计算而很快得出具有一定准确度的答案。

例如求北纬 39° , 赤纬 $\pm 20^\circ$ 时的日出日落时间。在图 1-9 中, 只要在 φ 和 δ 的两条线上找出给定的值, 连成一线, 对准日落小时的那条线, 就可读出夏天 $\delta = 20^\circ$ 的日落时间为下午 7 时 8 分, 冬天 $\delta = -20^\circ$ 日落时间为 4 时 52 分。

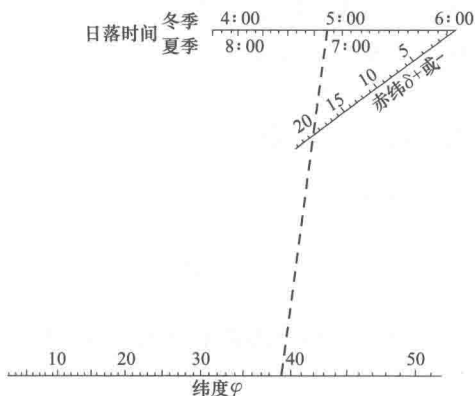


图 1-9 日出日落时间计算图

(4) 太阳的周日视运动。

在地球上, 我们每天都能够看到太阳东升西落的运动。如图 1-10 所示, 太阳从东方的地平线上冉冉升起, 一直到天空的最高位置, 然后转向西方逐渐降落到地平线下, 这种现象周而复始的出现, 称为太阳的周日视运动, 它是地球每天自转的反映。

1) 北回归线以北的地区。

太阳的周日视运动, 随观测地点和时令季节而异。太阳在天球上的行程, 称为太阳轨迹平面投影图。图 1-11 是北纬 40° (北京地区) 太阳轨迹平面投影图。该图采用地平坐标系标注太阳位置, 同心圆为等“高度角”线, 径向

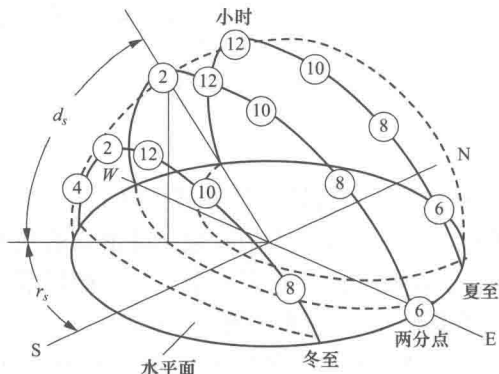


图 1-10 太阳的周日视运动



直线是等“方位角”线；从东方到西方向每条弧线表示一个赤纬角，即与日期对应；从南到北的每条弧线是等“时角”线，与时间对应。因此，根据日期和时间，可确定两条弧线相交的点，根据该点的同心圆和直径方向位置，可方便确定太阳所处位置的高度角和方位角。因此，太阳轨迹平面投影图体现某纬度的赤道坐标系和地平坐标系两者对应关系。

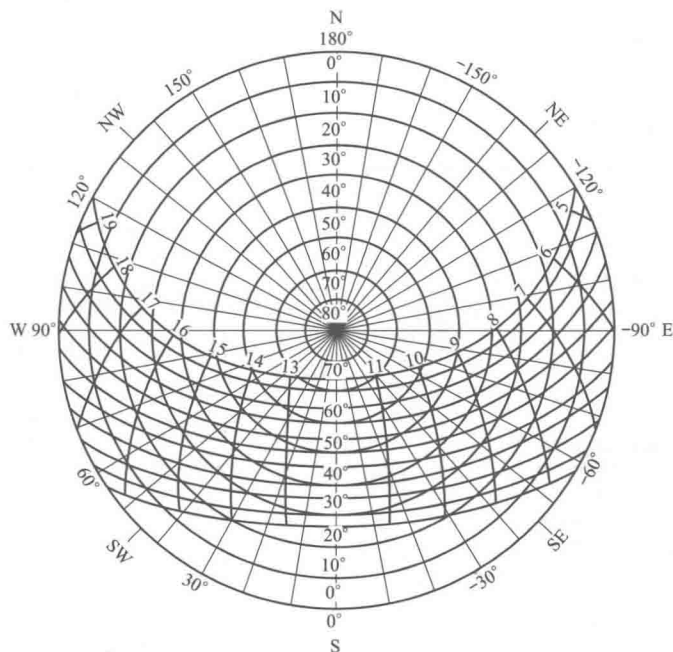


图 1-11 北纬 40° (北京地区) 太阳轨迹平面投影图

根据太阳轨迹平面投影图，只要确定日期，可以根据该日期的赤纬角，选用该赤纬角的的东西向的弧线，该弧线与最外圆的右侧交点为日出时刻坐标点，从图中可读出日出时间和方位角；该弧线与最外圆的左侧交点为日落时刻坐标点，同样可以确定日落的时间和方位角。

从图 1-11 可清楚地看到：正午时，太阳高度达到最高位置，但太阳高度以及日出日落的方位均随季节而变化。春分日（3 月 21 日）太阳出于正东，没于正西，昼夜等长。春分日过后，太阳升落点逐日向北偏移，白昼时间增长，黑夜缩短，正午太阳高度与日俱增。夏至日（6 月 22 日），正午太阳高度达到一年中的最大值，白昼最长。夏至日过后，太阳高度逐日降低，白昼缩短，太阳升落又趋向东、西点。到了秋分（9 月 23 日）太阳再次出于正东，落于正西。秋分后，太阳高度越来越低，黑夜比白昼越来越长，太阳升落点向南移动。到了冬至日（12 月 22 日），正午太阳高度为一年中的最小值，并且白昼最短。在这些地区，正午太阳永远不会过天顶，太阳高度角在任何时刻均小于 90°。

其他纬度地区太阳轨迹平面投影图参见文献 [3, 5]。

还必须指出，虽然太阳绕天轴旋转的角速度和地球自转的角速度是相同的，即等于 15°/h，但无论是太阳高度角，还是太阳方位角，它们随时间的变化率都不是常数，决不能与地球自转的角速度等同视之。太阳的周日视运动，随观测地点和时令季节变化。

北纬 40° (北京地区) 太阳高度角及方位角的日变化见表 1-2。

表 1-2 北纬 40° (北京地区) 太阳高度角及方位角的日变化

时间 (时)		5	6	7	8	9	10	11	12
		19	18	17	16	15	14	13	
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°

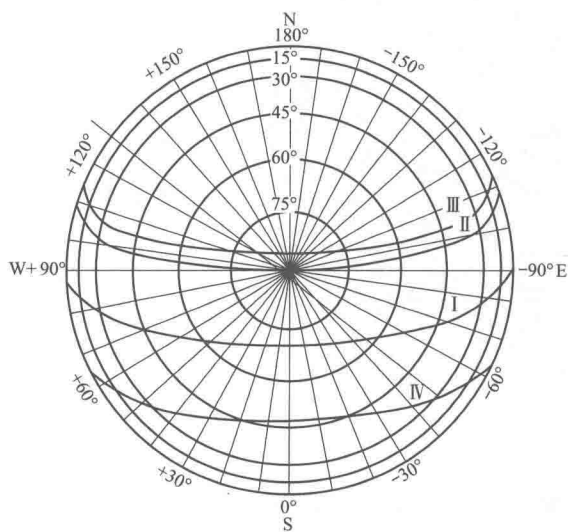


图 1-12 北纬 18.5° 太阳轨迹平面投影图

2) 北回归线以南的地区。

在北回归线以南的我国广东、广西、云南等低纬度地区，太阳的周日视运动的显著特点是，正午太阳可走到天顶的北面，如图 1-12 所示。

在北回归线一带地区，夏至日正午时，太阳正对天顶。在北回归线以南的地区，春分日过后，太阳逐渐北行，太阳高度逐渐增大；当太阳赤纬等于当地的纬度时，正午太阳高度达到一年中的最大值，太阳正对天顶；之后，太阳再向北行，太阳高度反而逐日下降，全天太阳均在北面的天球上运行，其运行日期的长短，完全取决于地理纬度，纬度越小，正午太阳过天顶的日子越长，如表 1-3 所示。到了夏

至日后，太阳向南行，太阳高度遂复回升，再次到达天顶。所以，一年中正午太阳高度的变化呈双峰形，如图 1-13 所示。

表 1-3 北回归线以南地区正午太阳过天顶的日期

地点	纬度	日期	天数
广州	23°08'	6月13日~7月01日	18
海口	20°00'	5月22日~7月23日	62
榆林	18°14'	5月14日~7月31日	78
西沙	16°47'	5月08日~8月06日	90
曾母暗沙	4°00'	4月01日~9月13日	166

(5) 太阳轨迹平面投影图的工程应用。

在安装太阳能集热器时，必须考虑周围建筑物的遮挡情况，或集热器之间的相互遮挡。以下以一个示例加以说明。

图 1-14 为建筑物与集热器相对位置，左图是水平面投影图，右图是纵向剖面图。从图



中可以看出，建筑物只有在方位角为 $(-45^\circ, 10^\circ)$ 范围内。且高度角低于 40° 时才可能遮挡集热器。根据方位角为 $(-45^\circ, 10^\circ)$ 和高度角低于 40° 条件，可以在太阳轨迹平面投影图划出范围，如图 1-15 阴影部分。当太阳位置坐标位于在阴影区时，建筑物遮挡集热器，由此可以确定建筑物在不同日期对集热器场遮挡时间。同样也可以用该方法分析集热器之间的相互遮挡问题。

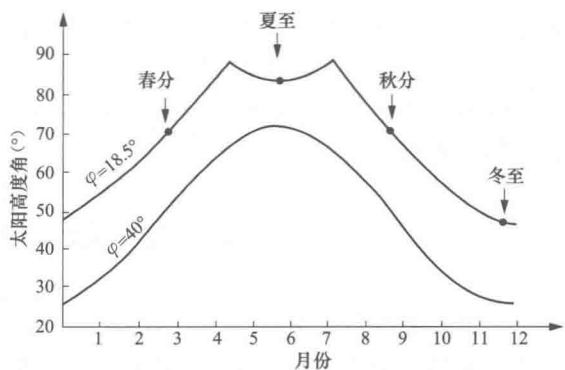


图 1-13 北回归线以南地区正午太阳高度角年变化

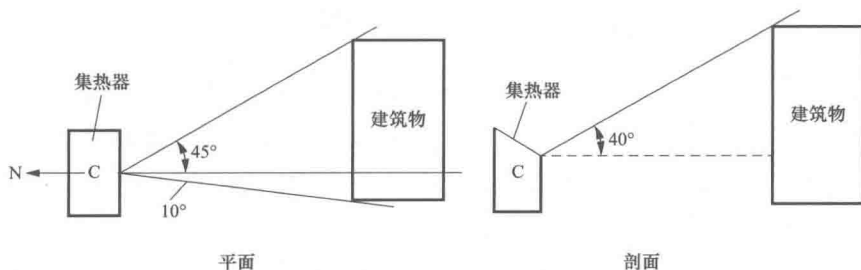


图 1-14 集热器与建筑相对位置

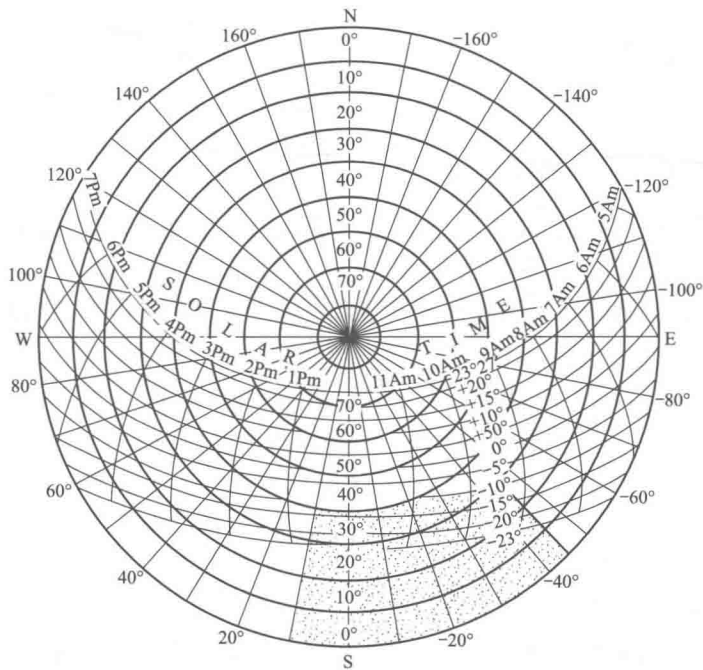


图 1-15 用太阳轨迹平面投影图分析集热器遮挡问题

(6) 地球的磁偏角。

太阳能集热器安装一般用指南针（磁罗盘）确定安装方位，但地球上任一处的磁北方向

和天球坐标系中正北方向并不一致，两者之间的夹角称为磁偏角。因此，利用罗盘确定集热器方向应根据当地磁偏角进行方位修正，如北京的磁偏角为 $6^{\circ}30'$ (W)，表示正北方向在指南针磁北方向往西偏 $6^{\circ}30'$ 角度。在 <http://magnetic-declination.com> 网站上可查找到任意地点磁偏角数值。

第三节 倾斜面上的太阳射线

一、太阳射线入射角

太阳能热利用装置中的太阳能集热器通常都是倾斜放置的。由于到达太阳能集热器吸热表面上的太阳辐照能量随着太阳射线入射角而变化，因而研究倾斜面上的太阳射线入射角是非常必要的。

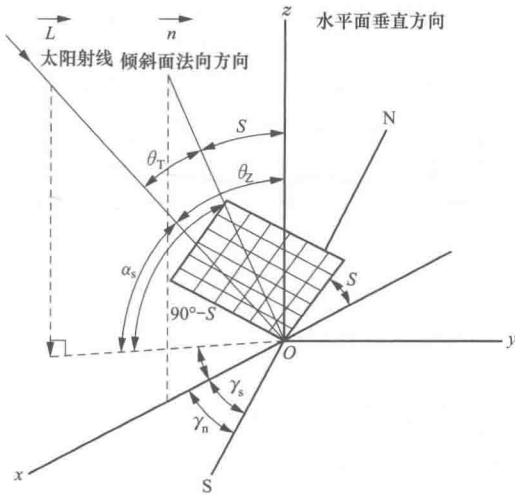


图 1-16 倾斜面上太阳射线的入射角

由图 1-16 可见，倾斜面上太阳射线的入射角是太阳射线 L 与斜面之法线 n 之间的夹角 θ_T 。这里，我们选取倾斜面的法线 n 在 XOY 水平面上的投影方向与空间直角坐标的 X 轴重合，这样 Z 的方向就是天顶的方向。令倾斜面之法线和太阳入射光线均通过坐标原点 O ， SN 是通过坐标原点 O 在 XOY 平面内表示地球南北极的方向线 (S 为南点， N 为北点)； S 代表倾斜面与水平面的夹角，即倾斜面之倾角 (面向南倾斜为正)； α_s 代表太阳射线及其在水平面上投影线之间的夹角，即太阳高度角； γ_s 代表太阳光线的投影线与南北方向线 SN 之间的夹角，即太阳方位角； γ_n 代表倾斜面之法线在水平面上投影线与南北方向线的夹角，即倾斜面之方位角。倾斜面之方位角与太阳方位角同样按顺时针方向计量。

利用一系列三角函数关系，通过推导、演算、整理，最后可得倾斜面上太阳射线入射角的表达式

$$\begin{aligned} \cos\theta_T = & (\sin\varphi\cos S - \cos\varphi\sin S\cos\gamma_n)\sin\delta \\ & + (\cos\varphi\cos S + \sin\varphi\sin S\cos\gamma_n)\cos\delta\cos\omega \\ & + \sin S\sin\gamma_n\cos\delta\sin\omega \end{aligned} \quad (1-14)$$

式中 θ_T ——倾斜面上太阳射线的入射角；
 S ——倾斜面的倾角；
 γ_n ——倾斜面的方位角。

对于给定地区和固定的倾斜面来说，表征地理位置的纬度 Φ 、倾斜面的倾角 S 和方位角 γ_n 都是已知的常数，于是式 (1-14) 中前两项括号内的数值和第三项中前两个三角函数也都是常数。因此，我们可将式 (1-14) 改写成如下实用形式

$$\cos\theta_T = A\sin\delta + B\cos\delta\cos\omega + C\cos\delta\sin\omega \quad (1-15)$$



其中

$$\begin{aligned} A &= \sin\varphi\cos S - \cos\varphi\sin S\cos\gamma_n \\ B &= \cos\varphi\cos S + \sin\varphi\sin S\cos\gamma_n \\ C &= \sin S\sin\gamma_n \end{aligned}$$

从式 (1-15) 可见, 某一地区固定的太阳能集热器的太阳射线入射角仅仅是太阳赤纬和时间的函数。利用这一公式, 可以计算出任何地区、任何季节、任意倾斜面上的太阳光线入射角, 从而对太阳能集热器的设计做出最佳的选择。

对于北半球, 太阳能集热器通常是朝南放置的, 对于这些面向赤道的集热器, 其方位角 $\gamma_n = 0^\circ$ 。这样, 式 (1-14) 可简化为

$$\begin{aligned} \cos\theta_T &= (\sin\varphi\cos S - \cos\varphi\sin S)\sin\delta \\ &\quad + (\cos\varphi\cos S + \sin\varphi\sin S)\cos\delta\cos\omega \end{aligned} \quad (1-16)$$

式中 θ_T ——朝向正南倾斜面上太阳射线的入射角。

二、倾斜面上太阳照射起止时间

倾斜面上太阳照射的起止时间, 与水平面上日出日落时间是不相同的。在太阳能热利用工程中, 倾斜面上的日照时间是个重要问题, 因为它是影响到达太阳能集热器表面上太阳辐照能量的一个主要因素。

当太阳射线与倾斜面平行时, 太阳射线的入射角 $\theta_T = 90^\circ$ 。在这一瞬间, 到达倾斜面上的太阳辐照能量为零, 并以此表示倾斜面上日照开始时间或日照结束时间。这时, 由于 $\cos\theta_T = \cos 90^\circ = 0$, 由式 (1-14) 可得

$$D\sin\omega_c + E\cos\omega_c + F = 0 \quad (1-17)$$

其中

$$\begin{aligned} D &= \sin S\sin\gamma_n\cos\delta \\ E &= (\cos\varphi\cos S + \sin\varphi\sin S\cos\gamma_n)\cos\delta \\ F &= (\sin\varphi\cos S - \cos\varphi\sin S\cos\gamma_n)\sin\delta \end{aligned}$$

式中 ω_c ——倾斜面上日照起止时刻的时角, 它是由倾斜面上零太阳辐射值转到正太阳辐射值, 或由正太阳辐射值转到零太阳辐射值的临界时角。

求解式 (1-17) 后, 可得

$$\omega_c = 2\arctan\left[\frac{-D \pm \sqrt{D^2 - (F^2 - E^2)}}{F - E}\right] \quad (1-18)$$

即 ω_c 有两个解, 它们分别为

$$\begin{aligned} \omega_{c,1} &= 2\arctan\left[\frac{-D + \sqrt{D^2 - (F^2 - E^2)}}{F - E}\right] \\ \omega_{c,2} &= 2\arctan\left[\frac{-D - \sqrt{D^2 - (F^2 - E^2)}}{F - E}\right] \end{aligned}$$

有了这两个临界时角 $\omega_{c,1}$ 和 $\omega_{c,2}$, 就可以用于确定倾斜面上的日出、日落时角。

第四节 太阳时与时差

一、真太阳时与平太阳时

时间的计量是以地球自转周期为依据的，昼夜循环现象给了我们测量时间的一种尺度。将太阳视圆面中心连续两次通过天顶的时间间隔定为一个真太阳日。真太阳日分为 24 个真太阳时。这一时间系统，称为真太阳时，或简称为太阳时。

地球每天自转一周，计为 24 太阳时。但由于地球公转，每天又向前运行了一段，大约需再向前自转 1° 左右，才能到达，因此使太阳第二次到达观测点的正南方时，地球已自转大于 360° 了，实际上地球自转一周不是 24h。此外，地球公转的轨道是椭圆形，地球在近日点（1 月），其运行速度快一些，为 $1^\circ 1' 10''$ ，地球在远日点（7 月），运行速度慢一些，为 $0^\circ 57' 11''$ 。因此，一年中的太阳日长短不一。同样叫一个太阳日，最长和最短相差 51s，可见太阳时不是一种均匀的时间标准，这对日常计量时间很不方便。

为了得到既均匀又适合于日常生活的时间，天文学计算理论上假设了一个假想点，它每年和“真太阳”同时从春分点出发，从西向东以均匀速度运行，运行一周后和真太阳同时回到春分点，两者在一年中的行程完全一样。这个假想点，称为平太阳。平太阳连续两次的时间间隔，称为平太阳日，1 平太阳日分为 24 个平太阳时。这个时间系统，称为平太阳时，这就是钟表所指示的时间。

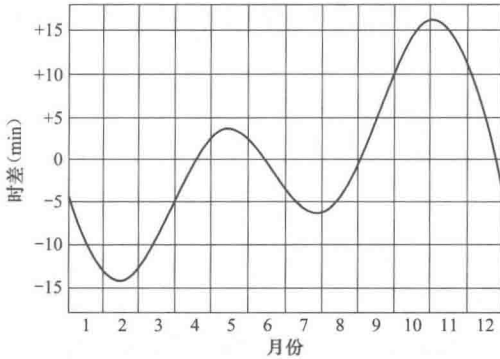


图 1-17 时差 E 在一年中的变化

二、时差

平太阳日的日长等于一回归年里真太阳日日长的平均值，这样便把日长固定下来。

真太阳时与平太阳时两者的时刻之差值，称为时差 E ，计算式为

$$E = \tau_e - \tau \quad (1-19)$$

式中 E ——时差；

τ_e ——真太阳时；

τ ——平太阳时。

图 1-17 给出了一年中每日的时差及其变化。

从图可见，平太阳时与真太阳时差别不大，一年有四次两者相一致，最大差值为 16min。

时差也可采用下式计算^[4]

$$E = 0.0028 - 1.9857 \sin \theta + 9.9059 \sin 2\theta - 7.0924 \cos \theta - 0.6882 \cos 2\theta \quad (1-20)$$

$$\theta = \frac{2\pi(N - N_0)}{365.2422} \quad (1-21)$$

式中 θ ——日角。

$$N_0 = 79.6764 + 0.2422 \times (\text{年份} - 1985) - INT\left(\frac{\text{年份} - 1985}{4}\right) \quad (1-22)$$

式中 N ——日序，即距离 1 月 1 日的天数。



表 1-4 根据式 (1-20) 计算出 2015 年的时差 E 值。因时差随年份变化较小, 其他年份可参照选用。

表 1-4 第 N 天的时差 E 值 (min)

N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
1	-1.4	75	-9.2	150	2.7	225	-5.2	300	16.2
5	-4.8	80	-7.8	155	2.0	230	-4.3	305	16.4
10	-6.8	85	-6.2	160	1.1	235	-3.0	310	16.2
15	-8.7	90	-4.6	165	0.1	240	-1.6	315	15.8
20	-10.3	95	-3.1	170	-1.0	245	0.0	320	14.9
25	-11.7	100	-1.6	175	-2.1	250	1.7	325	13.8
30	-12.8	105	-0.2	180	-3.2	255	3.6	330	12.4
35	-13.6	110	1.0	185	-4.2	260	5.4	335	10.7
40	-14.1	115	2.0	190	-5.0	265	7.3	340	8.8
45	-14.2	120	2.9	195	-5.8	270	9.1	345	6.7
50	-14.0	125	3.4	200	-6.3	275	10.8	350	4.5
55	-13.6	130	3.8	205	-6.6	280	12.4	355	2.2
60	-12.8	135	3.9	210	-6.6	285	13.7	360	-0.2
65	-11.8	140	3.7	215	-6.4	290	14.8	365	-2.5
70	-10.6	145	3.3	220	-6.0	295	15.7		

世界上每个地方都有当地的真太阳时和平太阳时。如果没有一个统一的标准, 在日常使用上就会带来很大的不便。为此, 经国际协议规定, 以英国的格林尼治天文台所在的子午线 (即本初子午线) 处的平太阳时, 为世界的标准时间, 称为世界时。

由于地球不停地自西向东自转, 因此同一瞬间, 各地的地方时刻就不一样。它们之间的差别, 与纬度无关, 只取决于两地的经度之差。我国东西延长 63° (东经 $72^\circ \sim 135^\circ$), 全国一律采用东经 120° 经圈上的平太阳时作为我国的标准时间, 称为北京时。北京时和世界时相差 8h, 即北京时等于世界时加上 8h。

用北京时表示的某一经度地区的平太阳时, 可用下式表示

$$\begin{aligned}\tau &= \text{标准时间} - (L_{\text{st}} - L_{\text{loc}})/15 \quad (\text{h}) \\ &= \text{北京时} - 4 \times (120 - L_{\text{loc}}) \quad (\text{min})\end{aligned}\quad (1-23)$$

式中 L_{st} ——地方时的标准子午线经度 (东经);

L_{loc} ——某一地区的地方经度 (东经)。

若合并式 (1-19) 和式 (1-20), 则用北京时表示的某一经度地区的真太阳时, 可用下式表示

$$\tau_e = \text{北京时} - 4(120 - L_{\text{loc}}) + E \quad (\text{min}) \quad (1-24)$$

应当指出, 由于北京地区的经度为 $116^\circ 28'$, 因此北京时并不等于北京地区的平太阳时, 两者相差 15min, 即北京地区的平太阳时等于北京时减去 15min。

最后需要强调的是前面有关章节中相关公式中的时间均对应真太阳时, 不是平太阳时或北京时。因此, 在计算太阳位置、太阳升或落时间等相关量时, 先要将我国北京时转化成当地的真太阳时。

第二章

太阳辐射

第一节 太阳的能量

太阳是距离地球最近的一颗恒星，组成太阳的化学元素主要是氢和氦，以质量计算它们在太阳光球中分别占 73.5% 和 24.8%，其他元素含量低于 2%，其中最丰富的是氧（大约占太阳质量的 1%）、碳（0.3%）和铁（0.2%）。

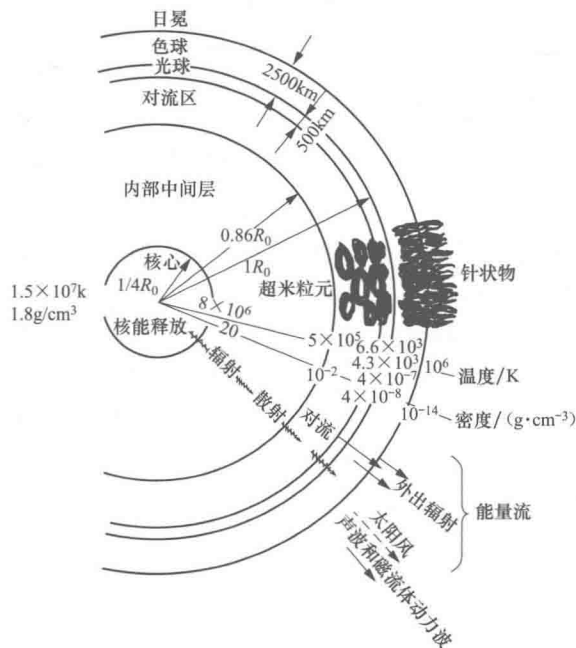


图 2-1 太阳结构示意图

太阳的核心区域半径是太阳半径的 1/4，约为整个太阳质量的一半以上。太阳核心的温度极高，达到 1500 万℃，压力也极大，使得由氢聚变为氦的热核反应得以发生。在热核反应过程中，四个氢核（质子）聚变成一个氦核，每克氢变成氦时，释放的能量为 $6.48 \times 10^{11} \text{ J}$ ，从而释放出极大的能量。太阳中心区之外就是辐射层，辐射层的范围是从热核中心区顶部的 0.25 个太阳半径向外到 0.71 个太阳半径，这里的温度、密度和压力都是从内向外递减。从体积来说，辐射层占整个太阳体积的绝大部分。太阳内部能量向外传播除辐射，还有对流过程。即从太阳 0.71 个太阳半径向外到达太阳大气层的底部，这一区间叫对流层。这一层气体性质变化很大，很不稳定，形成明显的上下对流运动。这是太阳内部结构的最外层。太阳热核反应产生能量再通过辐射层和对流层中物质的传递，才得以传送到太阳光球的底部，并通过光球向外辐射出去。

太阳光球就是我们平常所看到的太阳表面，通常所说的太阳半径也是指光球的半径。光球的表面是气态的，其平均密度只有水的几亿分之一，但由于它的厚度达 500km，它由强烈电离的气体组成，并能发射连续的辐射光谱，太阳能的绝大部分是由此发射出来的。光球层的大气中存在着激烈的活动，用望远镜可以看到光球表面有许多密密麻麻的斑点状结构，



很像一颗颗米粒，称为米粒组织。它们极不稳定，一般持续时间仅为 5~10min，其温度要比光球的平均温度高出 300~400℃。目前认为这种米粒组织是光球下面气体的剧烈对流造成的现象。

紧贴光球以上的一层大气称为色球层，平时不易被观测到，过去这一区域只是在日全食时才能被看到。当月亮遮掩了光球明亮光辉的一瞬间，人们能发现日轮边缘上有一层玫瑰红的绚丽光彩，那就是色球。色球层厚约 2000km，它的化学组成与光球基本上相同，但色球层内的物质密度和压力要比光球低得多。

日冕是太阳大气的最外层。日冕中的物质也是等离子体，它的密度比色球层更低，日冕的范围在色球之上，一直延伸到好几个太阳半径的地方。日冕还会有向外膨胀运动，并使得冷电离气体粒子连续地从太阳向外流出而形成太阳风。

太阳辐射是指太阳以电磁波或粒子形式向宇宙空间发出的能量，包括紫外线、可见光和红外线等，太阳辐射主要能量集中在 0.3~3.0μm 波长范围。

太阳辐射的总功率约为 3.86×10^{23} kW，达到地球的能源是其中的 22 亿分之一，约为 1.76×10^{14} kW。太阳向地球投射的辐射能，只有 0.02% 的能量通过植物的光合作用进入生物系统，其余的能量约有 30% 以短波方式返回宇宙空间，47% 的太阳辐射被地球表面所吸收，使温度升高，又以长波形式返回宇宙空间。约有 23% 的太阳能，成为风、气流、水波的原动力，形成气候变化并造成地球上水的循环过程。

第二节 地球大气层外的太阳辐射

一、太阳常数

太阳常数 S_0 是一个表征到达大气顶的太阳辐射总能量的数值。太阳常数的定义是：地球位于日地平均距离处，在大气上界垂直于太阳光线平面上的辐照度。

太阳辐射对于地球来说是至关重要的。地球上的天气、气候则完全受其入射量及其与地球大气、海洋和陆地相互作用的制约。地球接收到的太阳辐射能哪怕只有 1‰ 的变化，只要是持续不断的，就会对天气、气候产生重要的影响。另一方面，从太阳辐射的变化可了解太阳大气中发生的变化，而了解太阳常数的短期变化又有助于推知太阳内部的情况，所以太阳常数的测定也是太阳物理学界极为关注的课题。

由于地球绕太阳是沿着椭圆轨道运行，日地距离在一年中是不断变化的。因此，大气层外垂直于太阳辐射束平面上形成的辐照度随着日地距离变化而变化，与距离平方成反比。大气层外垂直于太阳光线平面上的辐照度 I_R 满足

$$I_R = \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 S_0 = r \cdot S_0 \quad (2-1)$$

式中 S_0 ——日地平均距离所对应的辐照度，即太阳常数， W/m^2 ；

I_R ——日地平均距离为 R 所对应的辐照度， W/m^2 ；

R_0 ——日地平均距离，m；

R ——某时间的日地距离，m；

r ——日地距离变化引起的地球大气层外太阳辐照度的修正系数， $r = \left(\frac{R_0}{R}\right)^2$ 。