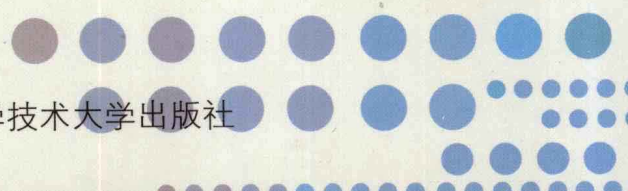




太阳能建筑的 热物理计算基础

TAIYANGNENG JIANZHU DE
REWULI JISUAN JICHU

何立群 丁力行 编著



中国科学技术大学出版社

太阳能建筑的热物理计算基础

何立群 丁力行 编著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书从气象参数、建筑传热传质过程以及建筑几何模型等方面,介绍了当前的建筑传热过程的差分方法、传递函数法和反应系数法等主流计算方法的基本原理。为简化复杂建筑结构,本书介绍了一个专用于建筑节能分析的建筑几何模型解决方案。

本书可作为建筑和热能类相关专业的本科教材,并可供暖通空调、建筑技术科学、制冷与低温工程等专业研究生选用,特别可作为太阳能建筑热利用、建筑环境与节能领域的研究开发参考书籍和继续教育读本。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能建筑的热物理计算基础/何立群,丁力行编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2011. 7

ISBN 978-7-312-02617-1

I. 太… II. ①何… ②丁… III. 太阳能住宅—建筑热工—数值计算
IV. ①TU241.91 ②TU111.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 020997 号

中国科学技术大学出版社出版发行

地址:安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

网址:<http://press.ustc.edu.cn>

合肥华星印务有限责任公司印刷

全国新华书店经销

开本:710×960 1/16 印张:9 插页:1 字数:170 千

2011 年 7 月第 1 版 2011 年 7 月第 1 次印刷

印数:1—3000 册

定价:18.00 元

前 言

随着我国经济的迅速发展,全国各地有大量建筑拔地而起。随之而来的建筑节能问题,总体上也变得越来越尖锐。国家陆续出台了一些新建筑的节能标准,作为验收新建筑的强制条件。但随着科学技术进步,新型建筑材料也不断用于建筑,新的结构形式也不断出现在新建筑上。这就要求设计人员能够及时准确预测建筑的热响应,估计出新材料、新措施、新系统在新建筑中应用后的节能效果。其中,准确掌握建筑传热机理是关键。

作为建筑设计与性能评价的基础,建筑传热机理及其在建筑节能上的应用方法一直是研究对象。随着计算机的发展,应用方法不断推陈出新,国际上已涌现150多种建筑动态热过程分析工具及软件。由于建筑结构和形式的日新月异,计算机技术的突破,同时其他领域的知识不断融入,建筑传热理论本身也朝着更快、更完善方向不断地发展。所有这些都迫使科技人员必须要不断地学习,紧跟时代的脚步。

当前,建筑如何充分利用太阳能再次成为最引人注目的课题。人们从建筑材料、建筑构件、建筑结构形式、太阳主动收集以及利用系统与建筑一体化等方面着手,已经陆续展示出建筑太阳能热电光的利用潜力。随着这些技术的发展,从建筑整体上如何及时评价这些措施的节能效果,成为了新的课题。本书从气象参数、建筑传热传质过程以及建筑几何模型等方面,介绍了当前的建筑传热过程的差分方法、传递函数法和反应系数法等主流计算方法的基本原理;为简化复杂建筑结构,本书也介绍了一个专用于建筑节能分析的建筑几何模型解决方案。

除以上传统方法外,我国学者也研究出了一种基于状态空间法求解建筑传热偏微分方程组的新方法。作者对此方法的特点了解和体会不深,这里就没有介绍。感兴趣的读者,可以查阅清华大学江亿院士主持撰写的《建筑环境系统模拟分析方法——DeST》。

本书可作为建筑和热能类相关专业的本科教材,并可供暖通空调、建筑技术科

学、制冷与低温工程等专业研究生选用,特别可作为太阳能建筑热利用、建筑环境与节能领域的研究开发参考书籍和继续教育读本。

本书第1,3,4,5,7章由何立群执笔,第2,6章由丁力行执笔。刘仙萍为本书的完成提供了大力支持。由于编者水平所限,本书在内容选择和安排上可能有不妥之处,文字叙述上和公式编写中也可能存在笔误。读者如发现,请不吝指正。

本书受中国科学院太阳能行动计划之光热电应用示范基地的基金(2009~2011)资助,特表感谢。

编 者

2010年10月

目 次

前言	(i)
第 1 章 太阳辐射计算	(1)
1.1 基本知识	(2)
1.1.1 太阳辐射特征和结构	(2)
1.1.2 太阳常数	(4)
1.1.3 太阳时	(5)
1.1.4 太阳位置	(6)
1.1.5 太阳的方向矢量	(8)
1.1.6 太阳位置与太阳高度角及方位角的关系	(10)
1.2 根据全辐射实测值分解直射和散射	(10)
1.2.1 地面上太阳总辐射	(11)
1.2.2 基于测量值的直射和散射分量计算	(11)
1.2.3 基于直射强度的测量值计算散射强度	(13)
1.3 直射和散射的计算模型	(13)
1.3.1 Hottel 模型	(14)
1.3.2 ASHRAE 模型	(17)
1.3.3 非晴天计算模型	(17)
1.3.4 气象数据分析法	(18)
第 2 章 室外空气温湿度	(20)
2.1 设计气象参数的构成	(20)
2.1.1 室外气象变化规律	(20)
2.1.2 ASHRAE 设计气象参数的构成	(21)
2.1.3 我国设计气象参数的构成	(22)
2.2 全年气象参数的统计构成	(24)

2.2.1	参考年法	(24)
2.2.2	典型年法	(25)
2.2.3	能量年	(26)
2.2.4	日本标准年	(27)
2.2.5	中国标准年	(27)
2.3	极端气候模型	(28)
2.3.1	频率分析法的引入	(28)
2.3.2	极端气温的皮尔逊-III型分布	(31)
2.3.3	极端气温的耿贝尔分布	(34)
2.3.4	极值分布模型拟合优度的 χ^2 检验法	(36)
第3章	建筑传热计算的差分方法	(38)
3.1	墙表面温度计算	(39)
3.2	墙体内部温度	(42)
3.3	房间空气温度	(44)
3.4	建筑物温度场	(48)
3.4.1	单房间模型	(49)
3.4.2	多房间模型	(51)
3.5	矩阵方程的迭代计算	(54)
第4章	建筑传热计算的传递函数法	(60)
4.1	拉氏变换方法	(60)
4.2	围护结构传热的 s 传递函数法	(62)
4.2.1	第一层平板	(63)
4.2.2	围护结构的传热矩阵(n 层)	(65)
4.2.3	平板的四个简单传递函数	(67)
4.3	围护结构传热的反应系数法	(68)
4.3.1	斜坡函数	(68)
4.3.2	三角脉冲函数	(69)
4.3.3	连续化	(70)
4.3.4	反应系数法	(71)
4.4	反应系数计算中两个 ∞ 的问题	(73)
4.4.1	$B(s)$ 根的数目	(73)
4.4.2	反应系数的截断	(74)
4.5	围护结构传热的 z 传递函数法	(76)

4.5.1	Z 变换	(76)
4.5.2	Z 变换的定义	(77)
4.5.3	系统	(77)
4.5.4	平板的其他热流	(79)
4.5.5	系数 d_i 的确定	(80)
4.5.6	墙体内表面传热计算	(81)
4.6	房间的冷热需求	(82)
4.6.1	单一房间的计算模型	(82)
4.6.2	多房间的计算模型	(86)
第 5 章	建筑表面辐射换热的计算	(88)
5.1	建筑室内表面之间的热辐射换热	(89)
5.2	表面热辐射换热的光照系数法	(92)
5.3	墙体外表面与天空的热辐射换热	(95)
5.3.1	天空和地面的热辐射强度	(95)
5.3.2	外墙外表面接受到的热辐射热	(95)
5.3.3	外墙外表面的热辐射得热	(96)
5.4	墙体表面接受的太阳辐射	(96)
5.4.1	表面接受的太阳直射辐射	(96)
5.4.2	表面的太阳散射辐射	(96)
5.4.3	表面接受的总太阳辐射	(97)
第 6 章	空气流通与渗透	(98)
6.1	风压作用下的渗风	(98)
6.1.1	风压及其分布	(98)
6.1.2	气流模型	(99)
6.2	热压作用下的渗风	(102)
6.2.1	热压作用	(102)
6.2.2	内部隔断系数	(103)
6.3	建筑构件的空气渗透计算	(103)
6.3.1	渗风量公式	(103)
6.3.2	实际渗风温度	(105)
6.4	渗风量计算的缝隙法	(107)
6.4.1	理论渗透冷空气量 L_0 的确定	(107)
6.4.2	综合修正系数 m 的确定	(108)

第 7 章 建筑热分析用的几何模型	(112)
7.1 建筑的简化	(113)
7.2 表面多边形的顶点坐标	(115)
7.3 墙体的面积和房间的体积	(117)
7.3.1 多边形表面面积	(117)
7.3.2 多边形的中心点	(118)
7.3.3 空间体积	(118)
7.3.4 空间中心点	(118)
7.4 角系数的确定	(119)
7.4.1 角系数计算的方案	(119)
7.4.2 具体的计算方法	(120)
7.4.3 任意两墙表面之间的角系数	(121)
7.4.4 表面离散	(124)
7.5 太阳在建筑表面的投影及其面积变化	(125)
7.5.1 在建筑坐标系内的太阳方向	(125)
7.5.2 墙表面的逐时太阳投影面积	(126)
7.6 墙体表面之间的关系	(128)
7.7 多边形顶点坐标的确定	(129)
附录 平板的反应系数推导过程	(133)
参考文献	(137)

第 1 章 太阳辐射计算

建筑传热的驱动力既来自于室内外空气温度差(传热)和压力差(传质),也来自于太阳辐射。对于建筑热环境而言,太阳辐射得热是不能忽视的热源。

太阳辐射经过大气层的反射、散射和吸收,其辐射强度不断衰减,辐射光谱也不断变化^[1]。在到达地球表面时,太阳辐射分成两部分,一部分沿着入射方向照射到地面,称为直射辐射(beam radiation),简称直射;另一部分被大气散射后从各个方向到达地面,称为散射辐射(diffuse radiation),简称散射。直射辐射与散射辐射之和就是到达地面的总太阳辐射能,称为全辐射或总辐射(global radiation)。被地面反射的太阳辐射被大气层吸收,然后又以热辐射的形式来到地面,但这部分能量相对于太阳总辐射来说要小很多。

实测的太阳辐射通常为在水平面上的直射量和散射量之和,即水平面全辐射值。在建筑传热计算中,直射和散射的处理方法不同,必须把水平面上的总辐射分解成直射辐射和散射辐射。直射分量体现了阳光的方向性,不同方向的墙体表面在同一时间内太阳辐射的单位投影面积有所不同。一年内,太阳辐射的强度与方向均是变化的。因此在不同季节,同一墙表面所接受的太阳全辐射也不同。

直射强度一般指太阳光单位横断面的直射能量流率;散射强度则为单位水平面的散射能量流率。实际测量中,获得直射强度和散射强度数据的方法有所不同。气象站的实测数据一般为水平面上的全辐射,然后分解成相应的直射辐射和散射辐射。

本章主要介绍如何使用经验公式估算太阳辐射的直射强度和散射强度,然后再将它们合成到不同的表面上。

到达地面的太阳辐射强度与太阳的辐射性质和大气气候条件紧密相关。太阳的辐射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^[1~7,13~15]。

1.1 基本知识

1.1.1 太阳辐射特征和结构

一般把太阳看成温度为 5777 K , 直径为 $1.39 \times 10^9\text{ m}$, 波长为 $0.3 \sim 3\ \mu\text{m}$ 的黑体^[1,2], 辐射特性见图 1.1。图中实线为温度为 $5250\text{ }^\circ\text{C}$ 的黑体辐射曲线。

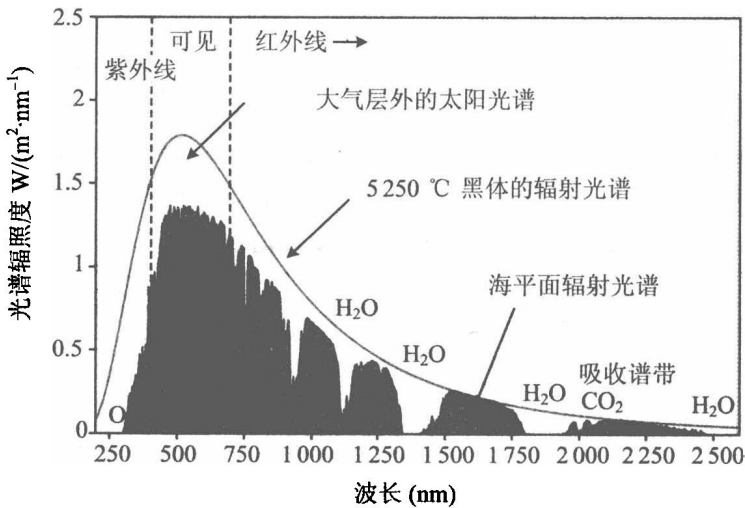


图 1.1 大气层外部与地面的太阳辐射光谱①

太阳的结构如图 1.2 所示, 是一个主要由氢和氦组成的炽热气体火球, 质量比地球大 332 000 倍, 体积比地球大 130 万倍, 离地球的平均距离为 $1.5 \times 10^{11}\text{ m}$ 。

太阳内部通过核聚变把氢转变为氦, 在反应过程中, 太阳以 $3.8 \times 10^{23}\text{ kW}$ 的功率释放能量。这股能量以电磁波的形式向四面八方传播, 到达地球大气层上界面时只剩下上述总功率的 $1/(20\text{ 亿})$, 即 $1.8 \times 10^{16}\text{ kW}$ 。经过大气层时其 30% 被反射, 23% 被吸收, 最后 47% 到达地球表面, 功率约为 $8.1 \times 10^{13}\text{ kW}$ 。这些辐射能

① 引自 http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum.png。

是地球上所有生命活动的直接能源,也是决定气候的主要因素,其从太阳到地球约需 8 分钟。

太阳能量集中在太阳最里面的核心部分,太阳内部温度从中心点向外急剧下降;在 $0\sim 0.23R$ (R 为太阳半径) 范围内,太阳的温度约为 $(8\sim 40)\times 10^6$ K,该部分的质量占太阳质量的 40%,能量占太阳辐射的 90%。距离中心 $0.7R$ 处,温度下降到 13 000 K 左右;在 $1.0R$ 处约 6 000 K。

太阳内部传热方式变化规律为: $0\sim 0.7R$ 以辐射为主, $0.7R\sim 1.0R$ 以对流为主,即为对流层(convective zone)。在对流层的外面裹着一薄层气体,这层气体是不透明的,并被高度离子化,能吸收和发射全频谱的辐射,称为光球(photosphere)。其外部还包有一层透明的气体,人类所见的太阳的轮廓是光球的外缘。大部分的太阳辐射就是从光球表面发射出的。

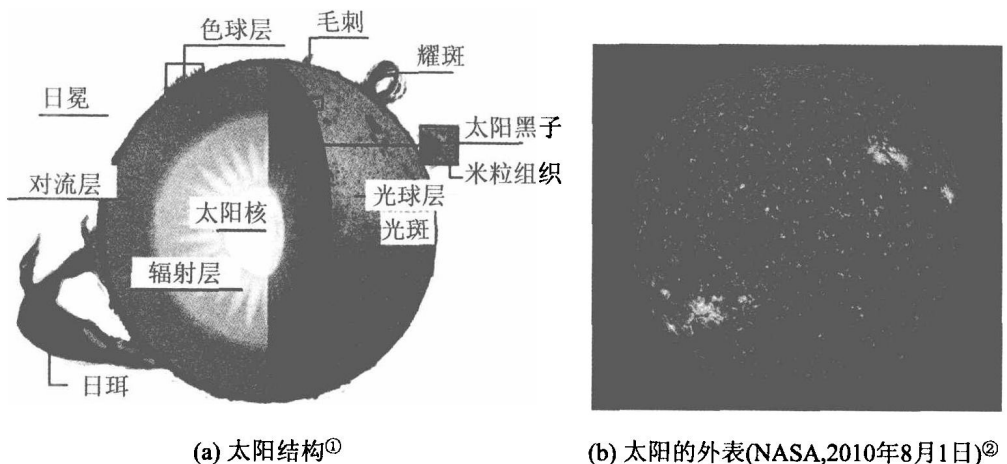


图 1.2 太阳结构

从太阳的结构及其温度和质量的梯度分布上看,太阳并不是一个具有固定温度的黑体。太阳内部各层气体的辐射又被各层气体不同程度地吸收,余下的部分辐射出光球表面,就是从地球上所看到的阳光,见图 1.3。

太阳本身的辐射实际上也是略有变化的($< \pm 1.5\%$)。卫星测量表明,大气层

^① 引自 <http://visual.merriam-webster.com/astromy/celestial-bodies/sun/structure-sun-2.php>。

^② 引自 <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>。

外太阳辐射强度每年平均以 0.02% 的速度减小;大气中也有很多不确定性因素影响到达地面的太阳辐射强度。但就一般的应用而言,太阳辐射强度被视为定值是合理的。

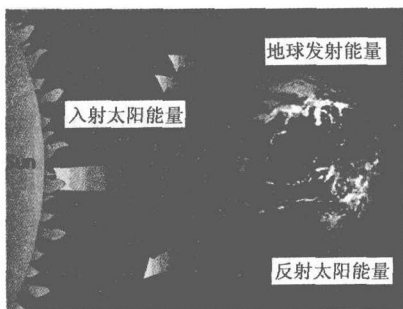


图 1.3 地球接受的太阳辐射①

1.1.2 太阳常数

在地球大气层外缘的太阳辐射强度是我们最为关心的数据,该数据是指垂直于辐射传播方向上单位面积、1 个小时内测得的太阳辐射量。

确切地讲,该太阳辐射强度是变化的。地球绕太阳运动的轨迹为一椭圆(图 1.4),实际到达地球大气层外缘处的辐射强度略呈周期变化。一年内,偏心的轨道使地球和太阳之间的距离在 1.7% 范围内变化,使太阳辐射强度值从冬至的 $1\ 398\ \text{W}/\text{m}^2$ 到夏至的 $1\ 308\ \text{W}/\text{m}^2$,在平均值 $1\ 353\ \text{W}/\text{m}^2$ 附近作 $\pm 3\%$ 的变动^[1,2]。

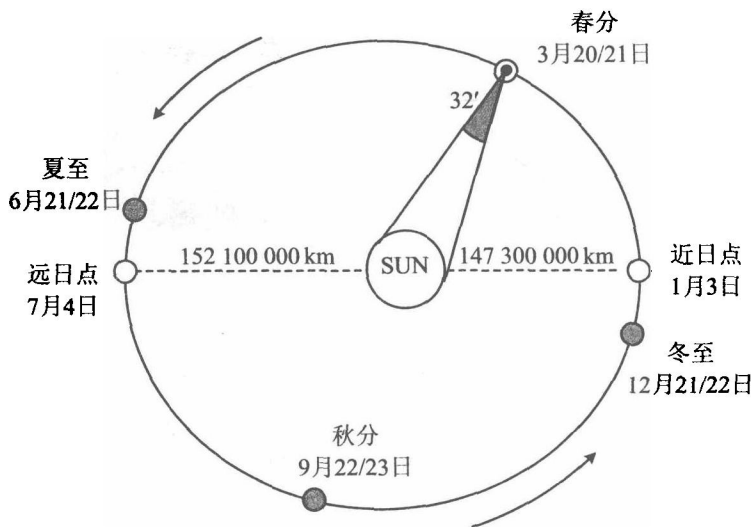


图 1.4 太阳与地球的几何关系②

① 引自 http://www.esrl.noaa.gov/gmd/education/faq_cat-1.html。

② 引自 <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/6h.html>。

当太阳和地球圆心平均距离为 1.495×10^{11} m 时,太阳对地球的张角为 $32'$ 。可以近似认为日地距离变化不大。在日地处于平均距离时,大气层外太阳辐射能基本上是恒定的,一般为 1353 W/m^2 。该平均值数据是 1971 年在太空辐射测量的基础上,由美国国家航空航天局提出的;1980 年代根据新的测量数据又更新为 1367 W/m^2 。以上两个值都得到公认,并沿用至今^[1]。

该常数称为太阳常数(the solar constant)。

每天大气层外太阳射线横断面上的太阳辐射强度值 G_{on} (W/m^2) 可以如下估算,

$$G_{\text{on}} = G_{\text{sc}} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right) \quad (1.1)$$

其中, n : 计算日在一年中的序号, $1 \leq n \leq 365$ 。

1.1.3 太阳时

太阳辐射计算模型都是基于当地太阳时的。

所谓太阳时,是指太阳位于当地经度线上方时定义为中午 12 点的计时方法。由于太阳和地球之间的距离随时间在变化,太阳“绕”地球一圈的时间并不一样长。太阳连续两次经过当地经度线的实际时间称为实际太阳时或者真太阳时。因此,每天的真太阳时应该是不均匀的。

一般地,以太阳在春分时位于当地经线上方为一年的初始点和终止点,再将这一年的时间均分到每一天。这样所获得的日平均太阳时称为平均太阳时或平太阳时。此时,假定太阳以每 4 分钟跨 1° 经线的匀速运动绕地球做圆周运动。而所谓的标准时间,就是指特定经度的平太阳时。比如北京时间,就是东经 120° 的平太阳时。

真太阳时和平太阳时的差值,称为时差,计算式为^[1,2]

$$\begin{aligned} E = & 229.2(0.000\ 075 + 0.001\ 868\cos B \\ & - 0.032\ 077\ 5\sin B - 0.014\ 615\cos 2B \\ & - 0.040\ 89\sin 2B) \end{aligned} \quad (1.2)$$

其中, E : 时差(min);

B : 角度系数。

$$B = (n - 1) \frac{360^\circ}{365} \quad (1 \leq n \leq 365)$$

同一个国家会跨越几条经线但会采用同一个的标准时间;对于标准经线之外的其他地区,当地平太阳时与标准时间的对应关系为:

$$T = T_{is} \pm 4(L_{st} - L) \quad (1.3)$$

其中, T, T_{is} : 太阳时与标准时间, 分钟(min);

L_{st}, L : 标准时间子午线、计算地点经度线, 度; “+”适用于西半球; “-”适用于东半球;

当地真太阳时为

$$T_s = T + E \quad (1.4)$$

注意:

1) 计算机高级语言中三角函数参数的单位为弧度而不是角度。如果计算对象的单位为角度时, 须将“角度”转化为“弧度”, 然后代入函数中计算, 即

$$B = (n - 1) \times \frac{2\pi}{365}$$

2) 小时和分钟两个时间单位之间的转换。

例 1.1 7月6日北京时间12点。计算北京(经度 = $116^{\circ}19'$), 哈尔滨(经度 = $126^{\circ}40'$), 新疆喀什(经度 = $76^{\circ}5'$)的太阳时^[1,9]。

我国采用的标准时间为北京时间, 但不是北京当地的时间, 而是北京所在东八时区的区时, 基准经度线为东经 120° 。7月5日的时差 $E = -4.4195$ 分钟, 所以各地区的太阳时为:

哈尔滨: $12 \text{ 时} - 4(120^{\circ} - 126^{\circ}19') \text{ 分} - 4.4195 \text{ 分} = 12 \text{ 时} 22 \text{ 分}$

北京: $12 \text{ 时} - 4(120^{\circ} - 116^{\circ}19') \text{ 分} - 4.4195 \text{ 分} = 11 \text{ 时} 41 \text{ 分}$

喀什: $12 \text{ 时} - 4(120^{\circ} - 76^{\circ}5') \text{ 分} - 4.4195 \text{ 分} = 8 \text{ 时} 59 \text{ 分}$

例 1.2 7月6日美国东部时区12点。计算纽约(经度 = 74°), 华盛顿(经度 = 77°)的太阳时。

美国东部时区的基准经度为西经 75° , 同样7月5日的时差 $E = -4.4195$ 分钟, 所以各地区的太阳时为:

纽约: $12 \text{ 时} + 4(75^{\circ} - 74^{\circ}) \text{ 分} - 4.4195 \text{ 分} = 11 \text{ 时} 59 \text{ 分}$

华盛顿: $12 \text{ 时} + 4(75^{\circ} - 77^{\circ}) \text{ 分} - 4.4195 \text{ 分} = 11 \text{ 时} 47 \text{ 分}$

1.1.4 太阳位置

为描述地球上所看到的太阳轨迹, 需要计算不同时刻太阳在天空中的位置, 也就是太阳的方向。其中, 两个角度是必不可少的: ① 太阳-地球连线与观测点水平面法线的夹角, 即天顶角 θ_z (zenith angle); ② 该连线在水平面投影与地球自转轴的夹角, 即方位角 γ_s (azimuthal angle), 见图 1.5。

假定太阳光线是一组平行线, 则天顶角可以等效为太阳光线与水平面法线的

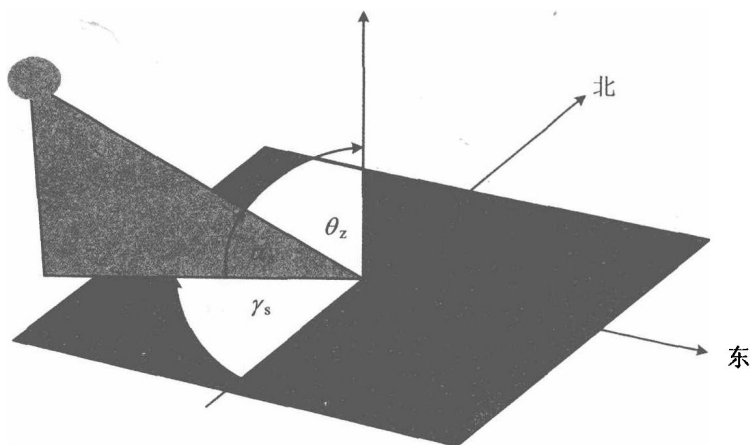


图 1.5 角度定义

夹角, 可以如下计算^[1]

$$\cos\theta_z = \cos h \cos\delta \cos\Phi + \sin\delta \sin\Phi \quad (1.5)$$

其中, Φ 纬度(latitude);

h 时角(hour angle), $h = 15^\circ(T_s - 12)\pi/180^\circ$, T_s 为太阳时;

δ 赤角(declination)。

地球绕太阳运行形成一个轨道平面, 其自转轴与此平面成一个投影角度, 称为赤角。在春分和秋分, 自转轴与太阳-地球连线垂直投影角度最大, 为 23.45° ; 从地球北半球表面望去, 太阳冬天位置很低, 夏天位置很高, 赤角就是太阳偏离春分和秋分位置的角度; 该角度可以采用 Cooper 公式(1969)计算,

$$\delta = 23.45^\circ \cos\left(2\pi \frac{n+10}{365}\right), \quad n \in [1, 365] \quad (1.6)$$

化简的另一种形式为

$$\delta = 23.5^\circ \frac{\pi}{180^\circ} \cos\left(2\pi \frac{192+n}{365}\right) = 23.5^\circ \frac{\pi}{180^\circ} \cos\left(2\pi \frac{n-173}{365}\right)$$

太阳光线与水平面的夹角称为太阳高度角, 即

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 90^\circ - \theta_z \\ \sin\alpha_s &= \cos h \cos\delta \cos\Phi + \sin\delta \sin\Phi \end{aligned} \quad (1.7)$$

在正午 $h=0$ 时, 有

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

此时

$$\begin{aligned} \text{如果 } \Phi > \delta, \alpha_s &= 90^\circ - (\Phi - \delta); \\ \text{如果 } \Phi < \delta, \alpha_s &= 90^\circ + (\Phi - \delta); \\ \text{如果 } \Phi = \delta, \alpha_s &= 90^\circ. \end{aligned}$$

太阳方位角(solar azimuth angle) γ_s , 计算地点和太阳的连线在计算地点水平面上的投影与计算点正南方向的夹角。

根据 Braun 和 Mitchell(1983)^[1], 方位角为

$$\gamma_s = \gamma_s' C_1 C_2 + 180 C_3 \left(\frac{1 - C_1 C_2}{2} \right) \quad (1.8)$$

其中

当太阳位于正南向时, $\gamma_s = 0$;
当太阳偏东时, $\gamma_s < 0$;
当太阳偏西时, $\gamma_s > 0$ 。

$$\sin \gamma_s' = \frac{\sin h \cos \delta}{\sin \theta_z} \quad (1.9)$$

γ_s' : 表面计算方位角

$$\begin{aligned} C_1 &= \begin{cases} 1, & |h| \leq h_{ew} \\ -1, & |h| > h_{ew} \end{cases} \\ C_2 &= \begin{cases} 1, & (\Phi - \delta) \geq 0 \\ -1, & (\Phi - \delta) < 0 \end{cases} \\ C_3 &= \begin{cases} 1, & h \geq 0 \\ -1, & h < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1.10)$$

$$\cosh_{ew} = \tan \delta / \tan \Phi \quad (1.11)$$

h_{ew} : 当太阳位于正东或正西时的时角
一般, 为计算简便, 取

$$\sin \gamma_s = \frac{\sin h \cos \delta}{\sin \theta_z} \quad (1.12)$$

此时

$$C_1 = C_2 = 1, \quad C_3 = 0 \quad (1.13)$$

1.1.5 太阳的方向矢量

如上所述, 计算太阳位置时, 假定如下^[4]:

(1) 地球以太阳为圆心做匀速圆周运动, 周期为一年;