

〔美〕 J.理查德·威廉斯

太阳能采暖 和 热水系统 的 设计与安装

赵玉文 郑敏樟 霍志臣 译 龚堡 校

5

太阳能采暖和热水系统的 设计与安装

〔美〕 J.理查德·威廉斯 著

赵玉文 郑敏樟 霍志臣 译

龚 堡 校

3/K524/11

新 时 代 出 版 社

内 容 简 介

本书详细介绍了太阳能采暖和热水系统的概念、计算、设计、安装及其应用。该书总结了十年来研制、安装和评价太阳能热水系统、供暖系统和降温即空调系统的经验。全书分八章：第一章讨论了太阳辐射及计算方法；第二章介绍了太阳能采暖负荷的计算和实例；第三、四、五章讨论了各种类型的太阳集热器，包括平板液体集热器、空气集热器、真空管集热器、热管集热器等，第三章还较详细地介绍了集热器的有关材料，如选择性吸收表面、减反射涂层、蜂窝结构、盖板材料等；第六章讨论了太阳能热水系统；第七章介绍了太阳池；第八章讨论了主动式太阳能采暖及降温即空调系统。

太阳能供暖、降温和生产热水系统不仅被城市工业、住户所广泛采用，而且适于在我国北方广大农村推广应用。书中所介绍的知识足以供厂家设计、研制和开发太阳能供暖、降温和热水系统之用。这些系统乡镇企业即可制造。太阳能系统的推广应用将节约大量的能源。

本书供从事太阳能热利用技术的工程技术人员、制造厂家、高等院校有关专业师生参考。

Design and Installation of Solar Heating and
Hot Water Systems
J. Richard Williams
Ann Arbor Science Publishers

*

太阳能采暖和热水系统的设计与安装

〔美〕 J. 理查德·威廉斯 著
赵玉文 郑敏樟 霍志臣 译
费 堡 校

新时代出版社出版、发行

（北京市海淀区紫竹院南路23号）

（邮政编码100044）

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168毫米 32开本 12印张 316千字

1990年9月第1版 1990年9月北京第1次印刷

印数：0001—3565册

ISBN 7-5042-0094-8/TK2 定价：7.35元

226

前 言

如果你想全面讨论一下能源危机，论证开发可再生能源的必要性，了解现有的和预计的太阳能系统的成本，或者你想对各种形式太阳能系统及其应用进行评价，对几种十分简单的太阳能工程加以说明，对太阳能供暖作非技术性解释，那么本书对你是无要紧要的。另一方面，无论从个人或专业上讲，你想对太阳能供暖、降温和生产热水进行实质性解释，那么你手边就该持有随时可查到的资料。本书兼顾了学术和实践两个方面，即设计经济耐久的太阳能系统所必须掌握的技术资料和常被太阳能教科书所忽略的实际安装的技术细节。本书总结了十年来研制、安装和评价太阳能热水系统、供暖系统和降温系统的经验。这些包括从一个家庭的热水系统到商业性供暖空调装置，其中有世界上最大的系统。

本书包括了为计算太阳辐射强度、确定集热器特性和评价整个系统运行性能所必须的代数方程。希望有高等代数的知识，但不要求更高的数学。虽然一台可编程序的计算器或微机会使你作出更好的选择，但一个简单的30美元计算器就可完成书中的例题。

头两章是关于太阳辐射和系统设计中热负荷的确定。一经确定需要多少能量和有多少能量可用之后，就可选择与地区和应用相匹配的太阳集热器类型。太阳集热器是系统的能源部分，其重要性是不能被忽视的。因此，本书的第三部分（3～5章）全面阐述了现有的非聚焦型集热器以及给出用以确定其寿命和特性所用方法。非专业读者一般不需要了解第三章里那些较复杂的方程，可直接应用市场上现成的集热器，它们的特性参数都已给出。然而，当计算集热器特性成为必要时，可以解这些方程，它们是十分精确的。任何一个太阳能系统设计者都必须了解选择性涂层的

各种类型及它们的限制，了解各种盖板及如何使用它们，了解致冷剂、连接件、传导和对流热损失以及如何抑制它们。这些问题及其他一些重要问题都包括在平板集热器和真空管集热器的章节里。

最后几章论述了用于加热水、供暖及降温的部件及系统。重点放在各种通用型系统的安装和运行上。由于地理位置十分强烈地影响着这些系统的成本效率，所以不讨论系统的经济性，就难于得出一个普遍而有效的一般结论，除非是在那些阳光充足而常规能源价格高，一年大部分时间能量需求很大和在经济上显得十分引人的地方。

J. 理查德·威廉斯

▼

J. 理查德·威廉斯 (J. Richard Williams)在国际上被公认为太阳能供暖和降温的世界权威。他的主要成就包括：研制世界上最大的太阳能供暖和空调建筑；几个商业性的太阳能供暖和降温工程；许多主动的和被动的太阳能供暖房和许多国际性的太阳能采暖和降温工程。威廉斯博士现在是爱达荷大学工程系系主任。他是一位注册的职业工程师，获得佐治亚技术学院工程物理学博士学位，是国家职业工程师学会、美国机械工程学会 (ASME)、国际太阳能学会 (ISES) 和美国工程教育学会的主要成员。他是国际太阳能学会美国分会的理事和副理事长，是佐治亚区的理事长，是美国机械工程学会太阳能标准委员会委员。

目 录

第一章 太阳辐射	1
§ 1.1 太阳角	3
§ 1.2 地面上的太阳辐射	8
§ 1.3 太阳辐射计算方法	16
§ 1.4 用于系统分析的太阳辐射模型	30
1.4.1 一项聚光集热器工程用的模型	31
1.4.2 美国能源部模型	32
1.4.3 霍伊特模型	32
§ 1.5 斜面上的太阳辐射	37
1.5.1 三种模型比较	50
第二章 采暖负荷	54
§ 2.1 热损失	54
§ 2.2 R 值	72
§ 2.3 隔热材料	77
第三章 平板液体集热器的设计和分析	79
§ 3.1 平板集热器效率	80
3.1.1 移热因子	82
3.1.2 热损失系数	87
3.1.3 轴向导热	89
3.1.4 改进效率	90
§ 3.2 选择性表面	92
3.2.1 黑铬	94
3.2.2 金属氧化物	100
3.2.3 黑镍	102
3.2.4 金属枝晶	103
3.2.5 喷涂涂层	104
§ 3.3 减反射涂层	105
§ 3.4 用蜂窝结构抑制对流	107
3.4.1 蜂窝中的对流	108

§ 3.4.2	通过蜂窝的辐射传热	109
§ 3.4.3	导热传热	110
§ 3.4.4	有蜂窝和无蜂窝的传热比较	110
§ 3.4.5	不同蜂窝的比较	113
§ 3.5	平板集热器的材料	122
§ 3.5.1	吸热板	122
§ 3.5.2	盖板	123
§ 3.6	滴流式集热器	125
§ 3.7	黑液体集热器	125
§ 3.8	转动式集热器	126
§ 3.9	热管集热器	126
§ 3.10	可利用率	127
第四章	平板空气集热器	141
§ 4.1	空气在吸热板上流过	144
§ 4.2	空气在吸热板下流过	147
§ 4.3	双流程空气集热器	151
§ 4.4	叠层玻璃板集热器	154
§ 4.5	蜂窝多孔床空气集热器	157
§ 4.6	带肋片或凹槽吸热器的空气集热器	158
§ 4.7	射流冲击型空气集热器	161
第五章	真空管太阳集热器	170
§ 5.1	真空管集热器	170
§ 5.1.1	康宁公司 (Corning) 集热器	171
§ 5.1.2	通用电气 (General Electric) 公司集热器	172
§ 5.1.3	欧文斯-艾利诺义斯公司 (Owens-Illinois) 集热器	174
§ 5.1.4	三洋公司 (Sanyo) 集热器	176
§ 5.1.5	其它集热器	177
§ 5.2	真空管集热器分析	183
§ 5.2.1	效率	184
§ 5.2.2	反射损失	185
§ 5.2.3	康宁公司集热器	185
§ 5.2.4	欧文斯-艾利诺义斯公司集热器	186
第六章	太阳热水系统	207
§ 6.1	普通太阳热水系统	212
§ 6.1.1	直接系统	212

6.1.2	间接系统	228
6.1.3	优点和缺点	235
§ 6.2	水加热系统的部件	236
§ 6.3	太阳热水系统的安装	252
§ 6.4	热虹吸式热水器模型	256
§ 6.5	主动热水系统的模型	260
第七章	太阳池	277
§ 7.1	对流式太阳池	277
§ 7.2	非对流式太阳池	284
7.2.1	盐梯度池	284
第八章	主动式太阳能采暖与致冷系统	289
§ 8.1	热泵系统	293
§ 8.2	采暖和空调系统	299
§ 8.3	空气集热器系统	306
§ 8.4	蓄热分系统	311
8.4.1	蓄热水箱	311
8.4.2	卵石床蓄热器	318
8.4.3	相变材料	322
§ 8.5	风机、泵、换热器	324
8.5.1	风机和泵	324
8.5.2	换热器	330
§ 8.6	控制系统	333
§ 8.7	致冷器	339
8.7.1	吸收式致冷器	339
8.7.2	兰金循环致冷	343
8.7.3	卵石床与干燥式降温	346
§ 8.8	简化分析	348
附录		358
温度换算		376

第一章 太阳辐射

地球在围绕太阳的椭圆轨道上运行,在1月3日到达近日点,与太阳的距离为 1.47×10^{11} 米;在7月5日到达远日点,与太阳的距离为 1.52×10^{11} 米。地球与太阳的平均距离为 1.495×10^{11} 米,该距离称为1个天文单位。在这一距离上,地球接收到 1.7×10^{17} 瓦来自太阳的能量;到达地球大气层外的平均太阳辐射强度称为太阳常数。虽然在太阳活动周期内,太阳的能量输出有一些变化,太阳常数仍然稳定在 1353瓦/米^2 ($429.2 \text{英热单位/小时} \cdot \text{英尺}^2$, $4871 \text{千焦/米}^2 \cdot \text{小时}$) 的1%以内。通常对太阳常数所要进行的唯一修正这是由于在一年中地球距离太阳的变化(见图1.1)。修正系数可用下式计算:

$$f = 1 + 0.034 \cos[0.9863(n - 5)] \quad (1.1)$$

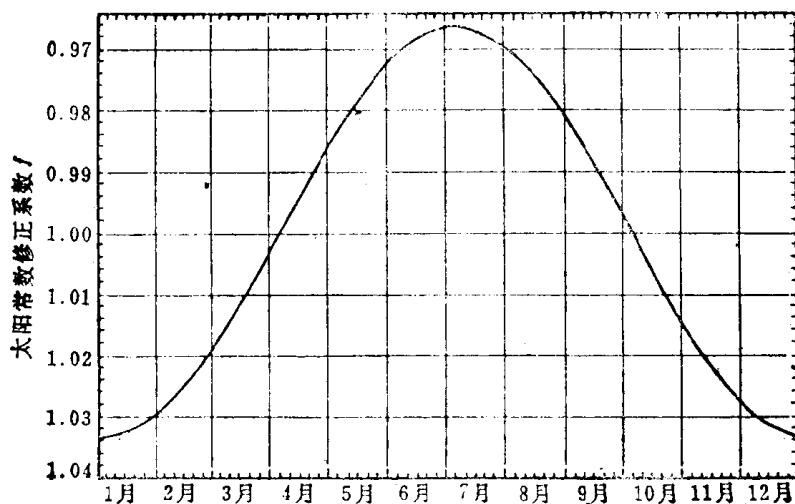


图1.1 太阳常数修正系数曲线图

表1.1 月天数与年天数换算表

月 份	年天数 n	月 份	年天数 n
一月	x ①	七月	$x + 181$
二月	$x + 31$	八月	$x + 212$
三月	$x + 59$	九月	$x + 243$
四月	$x + 90$	十月	$x + 273$
五月	$x + 120$	十一月	$x + 304$
六月	$x + 151$	十二月	$x + 334$

① x = 月天数, 在闰年的二月份以后 x 应加 1。

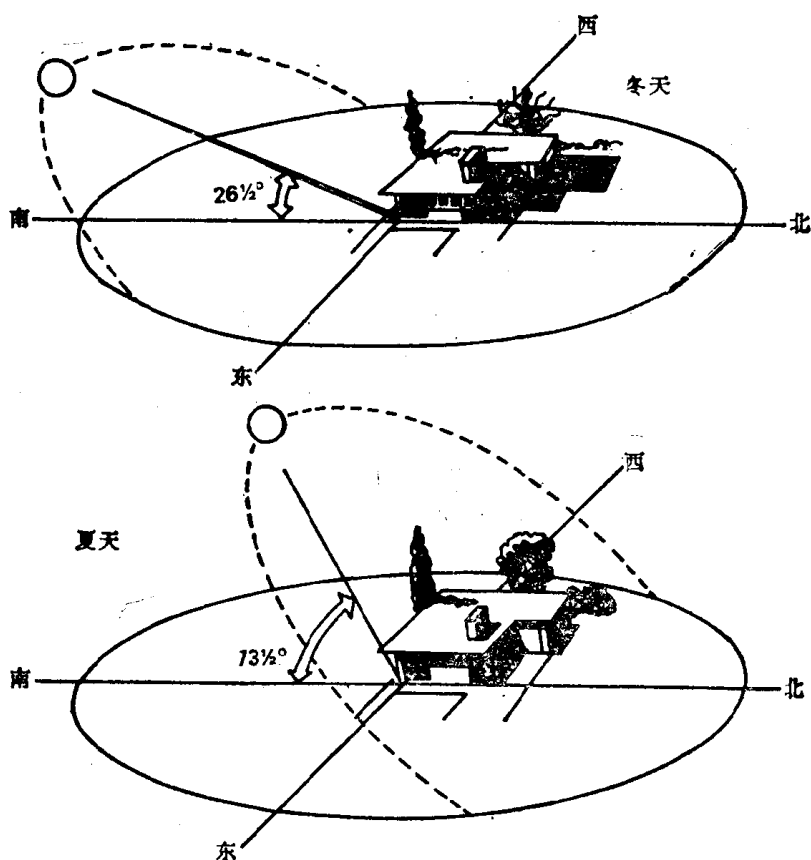


图1.2 在夏天和在冬天的太阳高度示意图

式中 n = 一年中的天数 (1月1日, $n = 1$; 1月2日, $n = 2$; 以此类推), 可从表1.1查得。

太阳辐射对太阳能系统的影响与其所接收的太阳辐射强度和方向有关。在北半球, 在夏天, 太阳的高度比在冬天大得多, 而且白天长。图1.2表示了北纬40度地区太阳高度角变化情况。

§ 1.1 太 阳 角

在计算进入太阳能集热器的太阳辐射量时, 必须知道纬度、太阳时角和太阳赤纬角。这些角在图1.3中作了详细说明。假设站在水平面上的一个观察者, 知道东西南北方向, 还知道天顶轴, 该轴是通过东西和南北轴交点的水平面上的垂线。现在考虑一条通过这一坐标原点的太阳光线, 这条太阳光线与天顶轴的夹角叫做天顶角 θ , 那么太阳高度角, 即太阳光线与水平面的夹角就是 $90^\circ - \theta$ 。含有天顶轴和太阳光线 (通过原点) 的平面与水平面垂直。该平面与水平面的交线与朝南坐标轴的夹角为 γ , 这就是太阳的方位角。在以地心为原点的天球坐标中, 与地轴垂直的平面是纬度平面, 通过地轴的平面是经度平面。含有天顶轴的经度平面和含有太阳光线的经度平面与纬度平面交线之间的夹角称为太阳时角, 每小时变化15度。

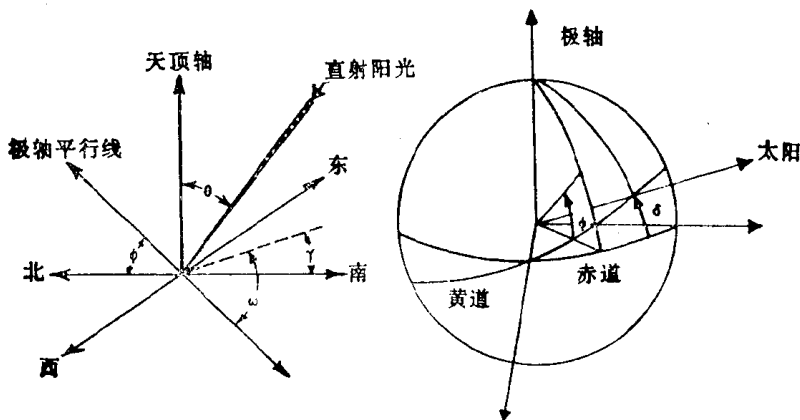


图1.3 太阳角

若已知纬度 ϕ ，太阳赤纬 δ 和时角 ω ，就可以用下式计算天顶角 θ ：

$$\cos \theta = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (1.2)$$

式中 θ = 太阳天顶角；

ϕ = 纬度；

δ = 太阳赤纬角；

ω = 时角（度）。

ω 在太阳正午之前是正数，在太阳正午之后是负数。赤纬角是投射的太阳光线与地球赤道平面的夹角。时角可由下式计算：

$$\omega = 15 \times (12 - T_s) \quad (1.3)$$

式中 T_s = 真太阳时（小时），用24小时的时钟。

太阳时往往与当地标准时间不同。在太阳正午，太阳升到天空的最高点。太阳时间与当地标准时间的关系式如下：

$$T_s = T_{ls} + E + 4(L_{sm} - L_l) \quad (1.4)$$

式中 T_{ls} = 当地标准时间（时和分）；

E = 时差（分）；

L_{sm} = 当地时区的标准子午线经度（度）；

L_l = 当地经度。

如果有夏令时间影响，必须转换成标准时间后再使用方程(1.4)。

图1.4可用来计算一年中任何一天的赤纬角 δ 和时差 E (Watt, 1980)。赤纬角逐年变化，因为地球运行一周实际需要365.25天。要得出精确的 δ 必需查阅星历表或天文年历。用下式计算 δ 和 E 对于非闰年可以精确到1分钟：

$$\begin{aligned} \delta = & 0.36 - 22.96 \cos(0.9856 n) - 0.37 \cos(2 \times 0.9856 n) \\ & - 0.15 \cos(3 \times 0.9856 n) + 4 \sin(0.9856 n) \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$E = -14.2 \sin[(n + 7)(180/111)] \quad n = 1 \sim 106$$

$$E = 4 \sin[(n - 106)(180/59)] \quad n = 107 \sim 166$$

$$(1.6)$$

$$E = -6.5 \sin[(n - 166)(180/80)] \quad n = 167 \sim 246$$

$$E = 16.4 \sin[(n - 247)(180/113)] \quad n = 247 \sim 365$$

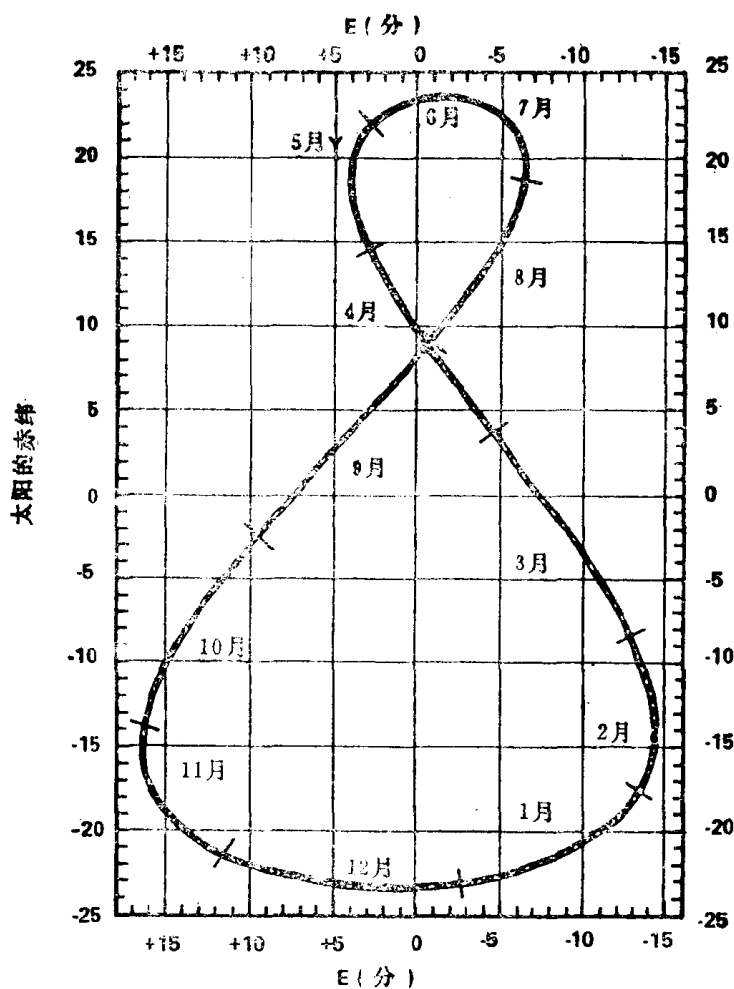


图1.4 用于计算 δ 和 E 的诺谟图

表 1.2 列出了太阳常数修正系数 f 和太阳赤纬角 δ 的每星期值。

例1.1

求华盛顿特区 (经度 $=77^\circ$) 7月4日东部标准时间 (EST) 下午4:30时的太阳时间 T_s 和时角 ω 。

解:

根据表1.1, 在7月4日, $n=185$ 。使用方程 (1.6), $E=$

表1.2 太阳赤纬 δ 和太阳常数修正系数 f

月份	月 中 的 天 数							
	1		8		15		22	
	δ	f	δ	f	δ	f	δ	f
1月	-23°04'	1.0335	-22°21'	1.0325	-21°16'	1.0315	-19°51'	1.0300
2月	-17°19'	1.0288	-15°14'	1.0263	-12°56'	1.0235	-10°28'	1.0207
3月	-7°53'	1.0173	-5°11'	1.0140	-2°26'	1.0103	0°20'	1.0057
4月	4°15'	1.0009	6°55'	0.9963	9°30'	0.9913	11°56'	0.9875
5月	14°51'	0.9841	16°53'	0.9792	18°41'	0.9757	20°14'	0.9727
6月	21°57'	0.9714	22°47'	0.9692	23°17'	0.9680	23°27'	0.9670
7月	23°10'	0.9666	22°34'	0.9670	21°36'	0.9680	20°26'	0.9692
8月	18°13'	0.9709	16°22'	0.9727	14°18'	0.9757	12°03'	0.9785
9月	8°34'	0.9828	5°59'	0.9862	3°20'	0.9898	0°37'	0.9945
10月	-2°54'	0.9995	-5°36'	1.0042	-8°14'	1.0087	-10°47'	1.0133
11月	-14°11'	1.0164	-16°21'	1.0207	-18°18'	1.0238	-19°58'	1.0267
12月	-21°41'	1.0288	-22°39'	1.0305	-23°14'	1.0318	-23°27'	1.0327

-4.4分。再由方程 (1.4) 求得当地太阳时间

$$T_s = T_{st} + E + 4(L_{sm} - L_t)$$

$$= 4:30 - 4 + 4(75 - 77) = 4:14(\text{下午})$$

在计算太阳时角之前, 先将太阳时变换成24小时的表示法

$$T_s = 4:14(\text{下午}) = 16:14 = 16 + \frac{14}{60} = 16.23\text{时}$$

然后将 T_s 代入式 (1.3) 求得时角

$$\omega = 15(12 - T_s) = 15(12 - 16.23) = -63.5^\circ$$

太阳方位角 γ 可由下式计算

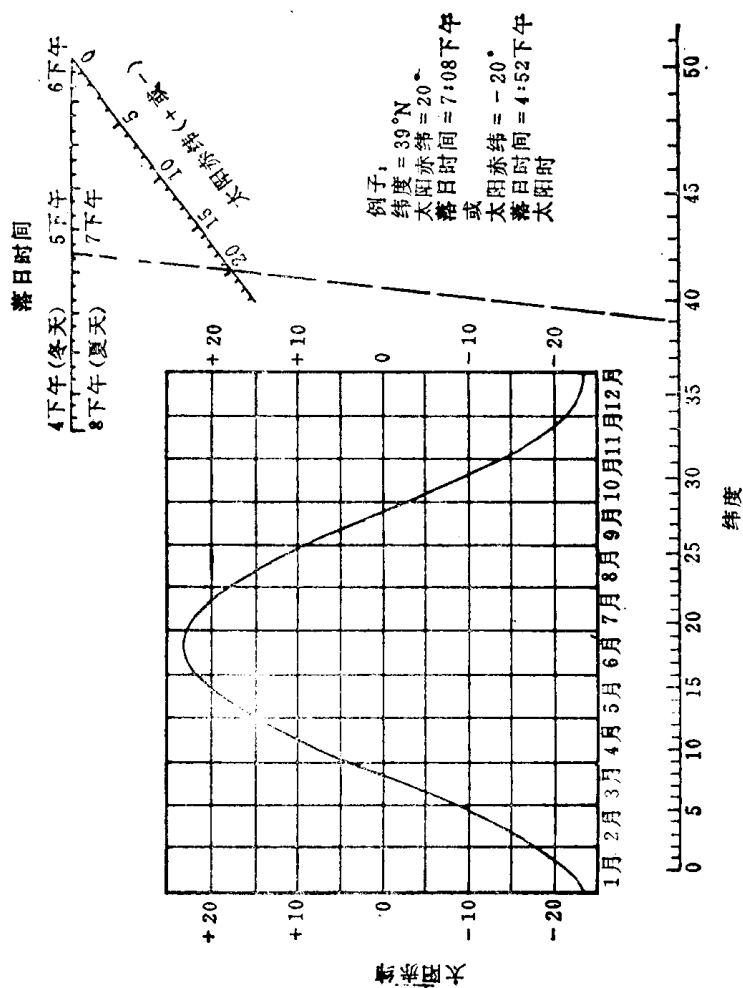
$$\sin(\gamma - 180) = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \theta} \quad (1.7)$$

或

$$\cos \gamma = \frac{\sin \delta - \sin \phi \cos \theta}{\cos \phi \sin \theta} \quad (1.8)$$

式(1.2)可用来解得落日时的时角 ω_r , 即当 $\theta = 90^\circ$ 时的 ω 值。

$$\cos \omega_r = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta \quad (1.9)$$

图1.5 计算 δ 和日升、日落时的太阳时的诺谟图

或

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (1.10)$$

由于白天的时数等于 $(2/15)\omega_s$, 即白天长 DL 为

$$DL = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (1.11)$$

一种简单的诺谟图 (图1.5) 可用来确定日升、日落地平线时的太阳时 [Whillier 1965]。在图中纬度和太阳赤纬之间画一直线, 延伸交于太阳时线上的点即日落时的太阳时。这一太阳时可用式 (1.4) 换算成当地的标准时间。

例1.2

求华盛顿特区 (纬度 $= 38^\circ 51'$) 7月4日东部标准时间下午4:30时太阳的天顶角和方位角。

解:

由例1.1知东部标准时间下午4:30的真太阳时是下午4:14或16.14时, 时角 ω 是 -63.5° , 由式 (1.5) 求得太阳赤纬是

$$\delta = 0.36 + 22.94 - 0.37 + 0.15 - 0.16 = 22.92^\circ$$

由表1.2内插查得 $\delta = 22.91^\circ$, 与用式 (1.5) 计算的结果一致。

$$\phi = 38^\circ 51' = 38 + 51/60 = 38.85^\circ$$

那么由式 (1.2) 可得

$$\theta = \cos^{-1}[\cos(38.85)\cos(22.92)\cos(-63.5) + \sin(38.85)\sin(22.92)] = \cos^{-1}[0.320 + 0.244] = 55.64^\circ = 55^\circ 39'$$

由式 (1.8) 可得

$$\gamma = \cos^{-1}\{[\sin(22.92) - \sin(38.85)\cos(55.64)] / [\cos(38.85)\sin(55.64)]\} = \cos^{-1}[(0.389 - 0.354) / 0.643] = 86.88^\circ = 86^\circ 53'$$

§ 1.2 地面上的太阳辐射

到达地面的太阳辐射强度从零至75%的太阳常数之间变化。阳光进入地球大气层, 受到云的反射和灰尘的散射作用。大气层上部的臭氧层吸收了大部分的太阳紫外 (UV) 辐射, 而许多红