可再生能源丛书

太阳能光伏发电技术

沈　辉　曾祖勤　主编

化学工业出版社

·北京·

（京）新登字 039 号

图书在版编目（CIP）数据

太阳能光伏发电技术/沈辉，曾祖勤主编．—北京：化学工业出版社，2005.8
（可再生能源丛书）
ISBN 7-5025-7535-9

Ⅰ．太…　Ⅱ．①沈…②曾…　Ⅲ．太阳能发电　Ⅳ．TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 094388 号

可再生能源丛书
太阳能光伏发电技术
沈　辉　曾祖勤　主编
责任编辑：侯玉周
文字编辑：廉　静
责任校对：王素芹
封面设计：关　飞

化学工业出版社出版发行
（北京市朝阳区惠新里 3 号　邮政编码 100029）
购书咨询：（010）64982530
（010）64918013
购书传真：（010）64982630
http://www.cip.com.cn

新华书店北京发行所经销
北京云浩印刷有限责任公司印刷
三河市延风装订厂装订
开本 720mm×1000mm　1/16　印张 13¾　字数 251 千字
2005 年 9 月第 1 版　2005 年 9 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-7535-9
定　价：28.00 元

版权所有　违者必究
该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

前　言

如果从发现光伏现象算起，太阳电池已经经历了 160 多年的发展历史。早在 1839 年法国人就发现了光伏现象，但在 38 年后才研制出第一片硒太阳电池，因当时的光电转换效率太低（1%），硒太阳电池作为发电器件没有得到推广应用。直到 1954 年美国贝尔实验室的 3 位科学家才成功制备了具有实用价值的单晶硅太阳电池。当时硅太阳电池的转换效率只有 4.5%，几年后提高到 10% 左右。由于价格昂贵，硅太阳电池开始仅用于地球卫星、空间站等太空飞行器的供电。1973 年由于世界石油危机，太阳能作为洁净、可再生能源得到世界各国高度重视，太阳电池材料与生产工艺得到很大发展。除了单晶硅电池外，多晶浇铸硅电池得到迅速发展。此外，以非晶硅、碲化镉和铜铟硒为代表的薄膜太阳电池也相继进入市场。从 1995 年以后，太阳电池以 30% 的年增长幅度高速发展。至 2004 年底，世界太阳电池总产量超过 1200MW。与此同时，太阳电池售价也大幅度下降，已从 20 世纪 50 年代的 1785 美元/W，降低到现在的 2～3 美元/W。

由于硅材料资源极其丰富且生产工艺相当成熟，晶体硅太阳电池在未来 10 年内将继续占销售和应用的主导市场。专家预计，到 21 世纪中叶，太阳能发电将在整个能源结构中占 20%～50%。在全球范围光伏并网发电系统将在地面得到大规模推广应用。太空光伏电站也有望在不久的将来实现。

太阳电池的发展，仍将向高效、低价方向发展。为此，太阳电池薄膜化是最有发展潜力的发展方向和研究课题。

在光伏发电的研究方面，人们将不断发现新原理、新材料、新工艺。薄膜太阳电池甚至有机材料太阳电池将逐步进入市场，使太阳电池家族更加丰富多彩和充满活力。

目前，欧洲、美国、日本大规模推广光伏并网发电的“屋顶计划”，一方面以逐步取代终将枯竭的常规化石能源；另一方面避免人类的生存环境继续恶化。

为推动西部大开发，我国正在进行西部太阳能发电工程，以改善西部生存条件和投资环境，促进西部经济发展。

我国政府已经在推动太阳能光伏发电发展方面采取了一系列措施。

□西藏阿里地区的专项光伏工程

2000 年国家投资 6000 万元人民币启动该项目，在阿里地区安装太阳电池总计约 600kW 的光伏电站，为当地居民提供电力。项目已经完成。

□ *GEF* 项目

我国政府与世界银行共同投资推动中国可再生能源市场，主要是光伏和风力发电，计划用 *5* 年时间安装 *10MW* 光伏系统，以解决无电地区居民生活用电问题。

□ “光明工程”项目

由国家发展与改革委员会牵头，筹集 *100* 亿元，用 *10* 年时间（到 *2010* 年）用风电、光电和其他可再生能源技术解决 *2300* 万户无电地区居民的生活、边防哨所、微波通讯、公路道班、石油管道和铁路信号等用电问题。预计 *2005* 年光伏系统装机总量达到 *105MW*，*2010* 年达到 *300MW*。这是到目前为止国家组织的最大可再生能源推广项目，也得到了日本、德国、荷兰、美国等及一些国际组织和大企业的支持。

□西部 *7* 省无电乡通电工程

2002 年，中央政府和地方省政府共同投资 *18* 亿元人民币，在西部 *7* 省无电地区乡政府所在镇安装光伏电站，规模一般在 *20*～*80kW*，共计约 *15MW*，要求项目在一年内完成。

2003 年，将实施与以上规模类似的项目，在西部无电村安装光伏电站，以解决这些地区绝大部分居民的生活用电问题。

近年来，我国在光伏研究和产业方面加快了发展，*2004* 年太阳电池的产量首次超过了印度。*2005* 年将是我国可再生能源发展史上具有重大影响的一年，*2005* 年 *2* 月 *28* 日第十届全国人民代表大会常务委员会第十四次会议通过《中华人民共和国可再生能源法》，并将于 *2006* 年 *1* 月 *1* 日正式实施，这将极大地促进我国包括太阳能在内的可再生能源的发展。

鉴于国内太阳能光伏产业的发展，我们感到很有必要编写一本比较系统全面介绍光伏发电基本理论和实用技术的参考书。在与深圳能联电子公司总经理曾祖勤先生联合指导研究生时，我们多次就出书问题进行商谈。我与曾祖勤先生对全书的内容进行了策划，并组织了以我的研究生为主的编写小组，主要根据我们一些年从事太阳能光伏研究的实践和经验，特别是结合广东以至国内的光伏发展实际需要，参考许多相关资料，历时 *2* 年之久，经过多次修改才完成书稿。参加编写的主要是我实验室的同事，多数为我的研究生。先后参加本书编写的人员主要有沈辉、曾祖勤、邓幼俊、刘仁生、舒杰、邓涛、林伟、张臻，此外班群、刘勇、陶龙忠、夏建汉等也参与编写了个别章节的内容。华南理工大学李光吉教授和中山大学沈玉樑教授分别审阅了第 *3* 章“太阳电池组件”和第 *5* 章“电力电子与控制”，并作了一定的补充和修改。由于时间和水平有限，书稿仍有较多的不尽如人意的地方，等有机会再版时修改。我们深深感到在我国发展太阳能光伏发电的重要性，也为从事这一行而感到自豪，相信通过不断的努力，我国一定

会在不久的将来，在光伏发电研究和产业方面走在世界发展的先进行列之中。

太阳能是洁净、可再生能源，是传统化石能源的最为重要的替代能源之一。随着社会的发展，人类将更加自觉、主动和高效利用过去、今天和将来的生命之源、能量之源、希望之源——太阳能。

沈　辉

2005 年 5 月于广州中山大学

目　　录

1　太阳辐射简述 …… 1
1.1　太阳简介 …… 1
1.2　太阳与地球的位置关系 …… 3
1.3　地球绕太阳的运行规律 …… 5
1.4　计算太阳高度角、方位角、日照时间 …… 6
1.4.1　库珀方程 …… 6
1.4.2　太阳角的计算 …… 6
1.5　太阳常数和太阳光谱 …… 8
1.5.1　太阳常数 …… 8
1.5.2　太阳光谱 …… 8
1.6　地面太阳辐射的理论估算 …… 10
1.6.1　大气质量 …… 10
1.6.2　大气透明度的引入 …… 11
1.6.3　垂直于太阳光线的地表上的直接辐射强度 …… 12
1.6.4　水平面上的直接太阳辐射 …… 13
1.7　工程中常用的计算太阳辐射的方法 …… 14
1.8　中国太阳能分布 …… 16
1.8.1　日照时数与日照百分率 …… 17
1.8.2　日照时数的时空分布 …… 18
1.8.3　日照百分率 …… 19
参考文献 …… 20
2　太阳电池基础 …… 21
2.1　太阳电池发展历史 …… 21
2.2　半导体材料与理论 …… 25
2.3　硅片的生产 …… 27
2.4　太阳电池原理 …… 30
2.5　太阳电池工艺 …… 31
2.6　太阳电池理论分析 …… 34
2.6.1　太阳电池模型 …… 34

2.6.2 太阳电池的效率 …… 36
2.7 太阳电池的表征 …… 38
2.7.1 太阳电池测试标准条件 …… 38
2.7.2 光谱响应 …… 39
2.7.3 电子束诱导电流 …… 39
2.7.4 减反射薄膜 …… 40
2.7.5 实际太阳电池分析 …… 40
2.8 太阳电池分类 …… 42
2.8.1 单晶硅太阳电池 …… 42
2.8.2 多晶硅太阳电池 …… 43
2.8.3 双面太阳电池 …… 44
2.8.4 非晶硅太阳电池 …… 44
2.8.5 高效晶体硅太阳电池 …… 45
2.9 太阳电池的发展 …… 55
2.9.1 颗粒硅带为衬底的多晶硅薄膜太阳电池 …… 55
2.9.2 染料敏化纳米晶太阳电池 …… 56
2.9.3 第三代太阳电池 …… 59
参考文献 …… 61
3 太阳电池组件 …… 64
3.1 太阳电池组件类型 …… 64
3.2 封装材料 …… 66
3.2.1 环氧树脂 …… 66
3.2.2 有机硅胶 …… 67
3.2.3 EVA 胶膜 …… 67
3.2.4 玻璃 …… 69
3.2.5 背面材料 …… 70
3.2.6 其他材料 …… 71
3.3 太阳电池组件制造设备 …… 71
3.3.1 激光划片机 …… 71
3.3.2 太阳电池层压机 …… 73
3.4 太阳电池组件封装工艺 …… 74
3.4.1 激光划片 …… 75
3.4.2 焊接 …… 76
3.4.3 层压 …… 76
3.4.4 固化 …… 76

3.4.5 检测 …… 77
3.4.6 技术要求 …… 78
参考文献 …… 78
4 光伏系统设计 …… 79
4.1 光伏系统的组成和原理 …… 79
4.2 光伏系统的分类与介绍 …… 80
4.2.1 小型太阳能供电系统 …… 80
4.2.2 简单直流系统 …… 81
4.2.3 大型太阳能供电系统 …… 81
4.2.4 交流、直流供电系统 …… 82
4.2.5 并网系统 …… 82
4.2.6 混合供电系统 …… 82
4.2.7 并网混合供电系统 …… 84
4.3 太阳能光伏系统的特点 …… 84
4.4 光伏系统的容量设计 …… 85
4.4.1 独立光伏系统软件设计 …… 85
4.4.2 计算斜面上的太阳辐射并选择最佳倾角 …… 96
4.4.3 混合光伏系统设计 …… 100
4.4.4 并网光伏系统设计 …… 106
4.5 光伏系统的硬件设计 …… 107
4.5.1 电缆的选取 …… 107
4.5.2 供电系统的基础建设 …… 108
4.5.3 接地和防雷设计 …… 109
4.6 太阳能光伏系统性能分析 …… 110
4.7 光伏系统设计软件介绍 …… 113
参考文献 …… 115
5 电力电子与控制 …… 116
5.1 充放电控制器 …… 116
5.1.1 控制器的基本原理 …… 116
5.1.2 控制器设计中的常用技术 …… 118
5.1.3 开发与选购控制器需注意的几个问题 …… 122
5.2 逆变器 …… 123
5.2.1 逆变器的基本原理 …… 124
5.2.2 光伏系统中的逆变驱动控制电路 …… 125
5.2.3 光伏并网发电系统中的逆变器电路 …… 126

5.2.4 逆变器的分类 …… 128
5.2.5 逆变器的几个重要指标 …… 130
5.2.6 光伏逆变器技术的未来发展 …… 131
5.2.7 光伏逆变器的几个重要制造商 …… 131
5.3 最大功率跟踪 …… 132
5.3.1 最大功率跟踪的基本原理 …… 132
5.3.2 光伏系统中的 $MPPT$ 常用算法 …… 133
5.4 遥控与遥测 …… 135
5.4.1 遥控遥测的意义 …… 135
5.4.2 遥控遥测的实现原理 …… 135
5.4.3 遥控与遥测的应用 …… 137
参考文献 …… 140
6 光伏技术应用 …… 141
6.1 太阳电池在太空的应用 …… 141
6.1.1 神州五号 …… 142
6.1.2 空间太阳能电站 …… 142
6.2 太阳能灯 …… 144
6.2.1 太阳能路灯 …… 144
6.2.2 太阳能利用与 LED 照明的结合 …… 145
6.2.3 太阳能灯的其他形式 …… 147
6.3 太阳能车和游艇 …… 148
6.3.1 太阳能电动车 …… 148
6.3.2 太阳能汽车大赛 …… 148
6.3.3 太阳能游艇 …… 149
6.4 太阳能光伏在高速公路上的应用 …… 151
6.4.1 太阳能光伏在高速公路上的常见应用方式 …… 151
6.4.2 太阳能在其他交通领域方面的应用 …… 152
6.5 太阳能光伏在通信方面的应用 …… 153
6.6 太阳能光伏在家电中的应用 …… 155
6.6.1 太阳能光伏在家电中的应用现状 …… 156
6.6.2 太阳能光伏在家电中的应用特点和形式 …… 156
6.6.3 太阳能光伏在家电中应用的主要领域及前景 …… 157
6.6.4 太阳能光伏在家电中大规模应用的意义 …… 159
6.6.5 对我国光伏家电产业发展的建议 …… 160
6.7 其他地面太阳电池电源的应用 …… 160

6.7.1 光伏水泵的应用 …… 160
6.7.2 畜牧围栏 …… 161
6.7.3 农林业方面的应用 …… 161
6.7.4 太阳能玩具 …… 161
6.7.5 阴极保护 …… 161
6.8 光伏建筑一体化 …… 162
6.8.1 背景 …… 162
6.8.2 光伏与建筑物相结合的形式和特点 …… 162
6.8.3 光伏建筑一体化应用实例 …… 164
6.8.4 BIPV 前景 …… 172
6.9 光伏电站 …… 172
6.10 超大规模光伏发电 …… 176
参考文献 …… 177
7 光伏前景展望 …… 179
7.1 国内外光伏发展现状与趋势 …… 179
7.2 我国光伏产业现状与存在问题 …… 182
7.3 光伏发展机遇和建议 …… 184
7.4 我国光伏发展战略对策 …… 185
附录一 太阳位置计算程序 …… 187
附录二 太阳电池组件相关信息 …… 205

1　太阳辐射简述

本章主要介绍太阳辐射的基本知识，并说明太阳辐射的计算方法。为了利用太阳能，有必要了解和掌握有关太阳辐射的基本知识，以便更好地进行太阳能光伏发电系统的设计和应用。

1.1　太 阳 简 介

太阳是离地球最近的一颗恒星，也是太阳系的中心天体，它的质量占太阳系总质量的 99.865%。太阳也是太阳系里惟一自己发光的天体，它给地球带来光和热。如果没有太阳光的照射，地面的温度将会很快地降低到接近绝对零度。由于太阳光的照射，地面平均温度才会保持在 14℃ 左右，形成了人类和绝大部分生物生存的条件。除了原子能、地热和火山爆发的能量外，地面上大部分能源均直接或间接同太阳有关[3]。

太阳是一个主要由氢和氦组成的炽热的气体火球，半径为 6.96×10^5 km（是地球半径的 109 倍），质量约为 1.99×10^{27} t（是地球质量的 33 万倍），平均密度约为地球的 1/4。太阳表面的有效温度为 5762K，而内部中心区域的温度则高达几千万度。太阳的能量主要来源于氢聚变成氦的聚变反应，每秒有 6.57×10^{11} kg 的氢聚合生成 6.53×10^{11} kg 的氦，连续产生 3.90×10^{23} kW 能量。这些能量以电磁波的形式，以 3×10^5 km/s 的速度穿越太空射向四面八方。地球只接受到太阳总辐射的二十二亿分之一，即有 1.77×10^{14} kW 达到地球大气层上边缘（“上界”），由于穿越大气层时的衰减，最后约 8.5×10^{13} kW 到达地球表面，这个数量相当于全世界发电量的几十万倍。

根据目前太阳产生的核能速率估算，氢的储量足够维持 600 亿年，而地球内部组织因热核反应聚合成氦，它的寿命约为 50 亿年，因此，从这个意义上讲，可以说太阳的能量是取之不尽、用之不竭的。

太阳的结构和能量传递方式如图 1-1 所示，简要说明如下。

太阳的质量很大，在太阳自身的重力作用下，太阳物质向核心聚集，核心中心的密度和温度很高，使得能够发生原子核反应。这些核反应是太阳的能源，所产生的能量连续不断地向空间辐射，并且控制着太阳的活动。根据各种间接和直接的资料，认为太阳从中心到边缘可分为核反应区、辐射区、对流区和太阳大气。

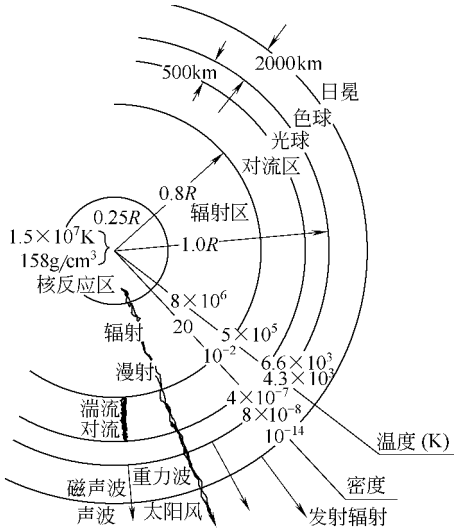


图 1-1　太阳的结构和能量传递方式

（1）**核反应区**

在太阳半径 25% **（即** $0.25R$**）的区域内，是太阳的核心，集中了太阳一半以上的质量。此处温度大约** 1500 **万度**（K），**压力约为** 2500 **亿大气压**（1atm＝101325Pa），**密度接近** 158g/cm^3。**这部分产生的能量占太阳产生的总能量的** 99%，**并以对流和辐射方式向外辐射。氢聚合时放出伽玛射线，这种射线通过较冷区域时，消耗能量，增加波长，变成** X **射线或紫外线及可见光。**

（2）**辐射区**

在核反应区的外面是辐射区，所属范围从 $0.25\sim0.8R$，**温度下降到** 13 **万度，密度下降为** 0.079g/cm^3。**在太阳核心产生的能量通过这个区域由辐射传输出去。**

（3）**对流区**

在辐射区的外面是对流区（对流层），所属范围从 $0.8\sim1.0R$，**温度下降为** 5000K，**密度为** 10^{-8}g/cm^3。**在对流区内，能量主要靠对流传播。对流区及其里面的部分是看不见的，它们的性质只能靠同观测相符合的理论计算来确定。**

（4）**太阳大气**

大致可以分为光球、色球、日冕等层次，各层次的物理性质有明显区别。太阳大气的最底层称为光球，太阳的全部光能几乎全从这个层次发出。太阳的连续光谱基本上就是光球的光谱，太阳光谱内的吸收线基本上也是在这一层内形成

的。光球的厚度约为 500km。色球是太阳大气的中层，是光球向外的延伸，一直可延伸到几千公里的高度。太阳大气的最外层称为日冕，日冕是极端稀薄的气体壳，可以延伸到几个太阳半径之远。严格说来，上述太阳大气的分层仅有形式的意义，实际上各层之间并不存在着明显的界限，它们的温度、密度随着高度是连续地改变的。

可见，太阳并不是一个一定温度的黑体，而是许多层不同波长放射、吸收的辐射体。不过，在描述太阳时，通常将太阳看作是温度为 6000K、波长为 0.3～3.0μm 的黑色辐射体。

1.2 太阳与地球的位置关系

在设计太阳电池应用系统时，不可避免地都会涉及到太阳高度角、方位角、日照时间等计算问题，因而必须对地球绕太阳运行的基本规律及其相关的天文背景有一定了解。

（1）天球与天球坐标系

以观察者为球心，以任意长度（无限长）为半径，其上分布着所有天体的球面叫做天球。图 1-2 所示为天球及天球坐标系。通过天球的中心（即观察者的眼睛）与铅直线相垂直的平面称为地平面；地平面将天球分为上下两个半球；地平面与天球的交线是个大圆，称为地平圈；通过天球的中心的铅直线与天球的交点分别称为天顶和天底。地球每天绕着它本身的极轴自西向东地自转一周；反过来说，假定地球不动，那么天球将每天绕着它本身的轴线自东向西地自转一周，我们称之为周日运动。在周日运动过程中，天球上有两个不动点，叫做南天极和北天极，连接两个天极的直线称为天轴；通过天球的中心（即观察者的眼睛）与天轴相垂直的平面称为天球赤道面；天球赤道面与天球的交线是个大圆，称为天赤道。通过天顶和天极的大圆称为子午圈。

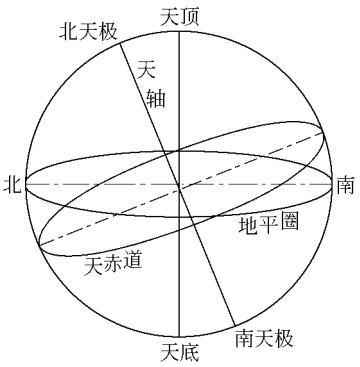


图 1-2　天球及天球坐标系

可以在上述这些极和圈（面）的基础上定义几种天球坐标系，以便研究天体在天球上的位置和它们的运动规律。最常用的有地平坐标系和赤道坐标系；后者根据原点的不同又可细分为时角坐标系和赤道坐标系。下面着重介绍与设计太阳电池应用系统有关的地平坐标系和时角坐标系。

（2）地平坐标系

以地平圈为基本圈，天顶为基本点，南点为原点的坐标系叫做地平坐标

系，如图 1-3 所示。通过天顶和太阳（或任一天体）X 作一大圆，叫做地平经圈；地平经圈交地平圈于 M 点；从原点 S 沿地平圈顺时针方向计量，弧 SM 为地平经度，或方位角 A；弧 XM 为地平纬度，或高度角 h，向上为正，向下为负。弧 ZX 称为天顶距，自 Z 起计量，用 Z 表示。显然 $Z=90^\circ-h$。由于天体有周日运动，所以天体的地平坐标随着时间在不断地变化着。此外，天体的地平坐标还和观测者在地面上的位置有一定关系，即地平坐标随观测地点而异。

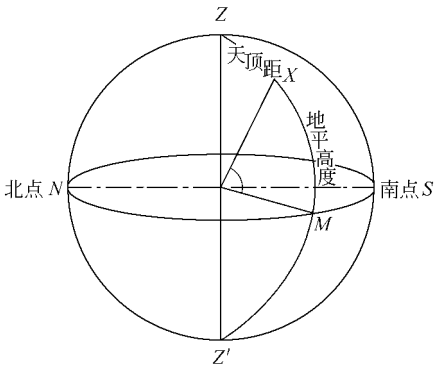


图 1-3　地平坐标系

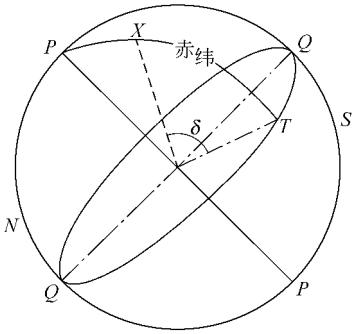


图 1-4　时角坐标系

（3）时角坐标系

以天赤道为基本圈，北天极为基本点，天赤道和子午圈在南点附近的交点为原点的坐标系叫作时角坐标系或第一赤道坐标系，如图 1-4 所示。通过北天极和太阳（或任一天体）X 作一大圆，叫做时圈；时圈交天赤道于 T 点；从原点 Q 沿天赤道顺时针方向计量，弧 QT 为时角 τ，τ 以度、分、秒为单位来表示，也可以时、分、秒为单位来表示；弧 XT 叫做赤纬 δ，δ 以度、分、秒为单位来表示；从天赤道算起，向上为正，向下为负。当天体作周日运动时，天体的赤纬 δ 不随周日运动而变化，但天体的时角 τ 却从 0° 均匀地增加到 360°。此外，在同一瞬间，在地理经度不同的观测地点观测同一天体的时角 τ 是不同的，即同一天体的时角 τ 随观测地点而异。

以上只是简要介绍了一点相关的天文背景知识。如果要准确计算太阳高度角、方位角、日照时间等数据，还需要了解以上坐标系之间的转换关系，这又牵涉到时间系统，有兴趣的读者可以找一些有关的天文方面的资料进行知识补充[2～6]。作者在本书附录 A 中提供了计算太阳高度角、方位角、日照时间等的实用程序，利用此实用程序，读者可以不需要十分了解相关的天文背景知识，也可以准确地计算太阳高度角、方位角、日照时间等数据。

1.3　地球绕太阳的运行规律

众所周知，地球每天绕着通过它本身南极和北极的“地轴”自西向东地自转一周。每转一周（360°）为一昼夜，一昼夜又分为 24h，所以地球每小时自转 15°。

地球除了自转外，还绕太阳循着偏心率很小的椭圆形轨道（黄道）上运行，称为“公转”，其周期为一年。地球的自转轴与公转运行的轨道面（黄道面）的法线倾斜成 23°27′的夹角，而且地球公转时其自转轴的方向始终不变，总是指向天球的北极。因此，地球处于运行轨道的不同位置时，阳光投射到地球上的方向也就不同，形成地球四季的变化。图 1-5（a）表示地球绕太阳运行的四个典型季节日的地球公转的行程图，图 1-5（b）表示对应于上述四个典型季节日地球受到太阳照射的情况。

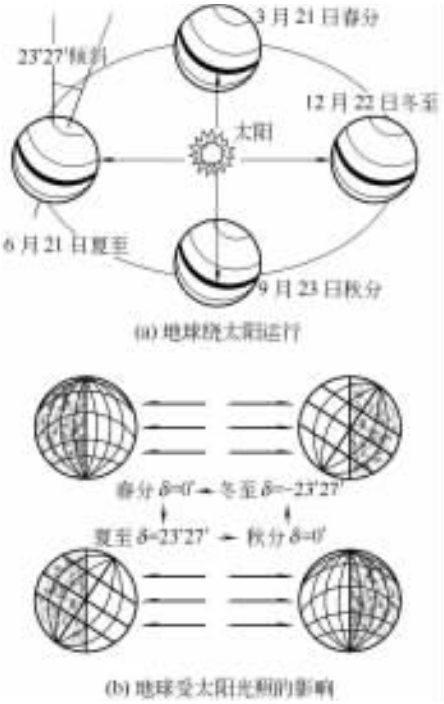


图 1-5　地球绕太阳运行及其影响

假设观察者位于地球北半球中纬度地区，我们可以对太阳在天球上的周年视运动情况做如下描述。

每年的春分日（3 月 21 日），太阳从赤道以南到达赤道（太阳的赤纬 $\delta=0°$），地球北半球的天文春季开始。在周日视运动中，太阳出于正东而没于正西，白昼和黑夜等长。太阳在正午的高度等于 $90°-\phi$（ϕ 为观察者当地的地理纬度）。

春分过后，太阳的升落点逐日移向北方，白昼时间增长，黑夜时间缩短，正午时太阳的高度逐日增加。夏至日（6 月 22 日），太阳正午高度达到最大值 $90°-\phi+23°27'$，白昼最长，这时地球北半球天文夏季开始。夏至过后，太阳正午高度逐日降低，同时白昼缩短，太阳的升落又趋向正东和正西。

秋分日（9 月 23 日），太阳又从赤道以北到达赤道（太阳的赤纬 $\delta=0°$），地球北半球的天文秋季开始。在周日视运动中，太阳又出于正东而没于正西，白昼和黑夜等长。秋分过后，太阳的升落点逐日移向南方，白昼时间缩短，黑夜时间增长，正午时太阳的高度逐日减低。冬至日（12 月 22 日），太阳正午高度达到最小值 $90°-\phi-23°27'$，黑夜最长，这时地球北半球天文冬季开始。冬至过后，太阳正午高度逐日升高，同时白昼增长，太阳的升落又趋向正东和正西，直到春分日（3 月 21 日）太阳从赤道以南到达赤道。

1.4 计算太阳高度角、方位角、日照时间

1.4.1 库珀方程

太阳光线与地球赤道面的交角就是太阳的赤纬角，以 δ 表示。在一年当中，太阳赤纬每天都在变化，但不超过 $\pm23°27'$ 的范围。夏天最大变化到夏至日的 $+23°27'$；冬天最小变化到冬至日的 $-23°27'$。太阳赤纬随季节变化，按照库珀（Cooper）方程，由式（1-1）计算

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

式中，n 为一年中的天数，如：在春分，$n=81$，则 $\delta=0$，自春分日起的第 d 天的太阳赤纬为

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

表 1-1 给出了各月每隔 4 日的太阳赤纬，这些数值在计算中十分有用。

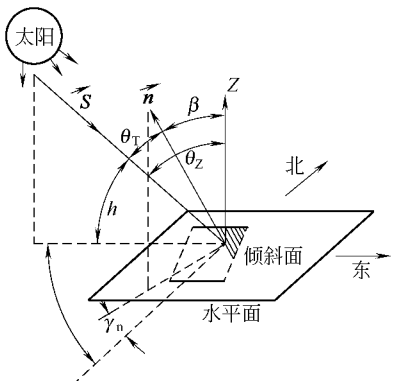


图 1-6 太阳角的定义

1.4.2 太阳角的计算

如图 1-6 所示，指向太阳的向量 $\vec{S}$ 与天顶 Z 的夹角定义为天顶角，用 θ_z 表示；向量 $\vec{S}$ 与地平面的夹角定义为太阳高度角，用 h 表示；$\vec{S}$ 在地面上的投影线与南北方向线之间的夹角为太阳方位角，用 γ 表示。太阳的时角用 ω 表示，它定义为：在正午时 $\omega=0$，每隔一小时增 15°，上午为正，下午为负。例如：上午 11 时，$\omega=+15°$；上午 8 时，$\omega=15°\times(12-8)=60°$；下午 1 时，$\omega=-15°$；下午 3

表 1-1　太阳赤纬（δ）　　**单位：（°）**

δ 月份 / 日期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	−23.1	−17.3	−7.9	4.2	14.8	21.9	23.2	18.2	8.6	−2.9	−14.2	−21.7
5	−22.7	−16.2	−6.4	5.8	16.0	22.5	22.9	17.2	7.1	−4.4	−15.4	−22.3
9	−22.2	−14.9	−4.8	7.3	17.1	22.9	22.5	16.1	5.6	−5.9	−16.6	−22.7
13	−21.6	−13.6	−3.3	8.7	18.2	23.2	21.9	14.9	4.1	−7.5	−17.7	−23.1
17	−20.9	−12.3	−1.7	10.2	18.1	23.4	21.3	13.7	2.6	−8.9	−18.8	−23.3
21	−20.1	−10.9	−0.1	11.6	20.0	23.4	20.6	12.4	1.0	−10.4	−19.7	−23.4
25	−19.2	−9.4	1.5	12.9	20.8	23.4	19.8	11.1	−0.5	−11.8	−20.6	−23.4
29	−13.2	—	3.0	14.2	21.5	23.3	19.0	9.7	−2.1	−13.2	−21.3	−23.3

时，$\omega=-15^\circ\times3=-45^\circ$。

（1）**太阳高度角**

计算太阳高度角的表达式为

$$\sin h = \sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos\omega \tag{1-3}$$

式中 ϕ——**地理纬度**；

δ——**太阳赤纬**；

ω——**太阳时角**。

正午时，$\omega=0$，$\cos\omega=1$。**式**（1-3）**可简化为**

$$\sin h = \sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta = \cos(\phi-\delta)$$

因为，$\cos(\phi-\delta)=\sin[90\pm(\phi-\delta)]$

所以，

$$\sin h = \sin[90\pm(\phi-\delta)] \tag{1-4}$$

正午时，若太阳在天顶以南，即 $\phi>\delta$，**取**

$$\sin h = \sin[90-(\phi-\delta)]$$

从而有，

$$h = 90+\phi-\delta \tag{1-5}$$

在南北回归线内，有时正午时太阳正对天顶，则有

$$\phi = \delta$$

从而，$h=90^\circ$。

（2）**太阳方位角**

太阳方位角按下式计算

$$\cos\gamma = \frac{\sin h\sin\phi - \sin\delta}{\cos h\cos\phi} \tag{1-6}$$

也可用下式计算

$$\sin\gamma = \frac{\cos\delta\sin\xi}{\cos h} \tag{1-7}$$