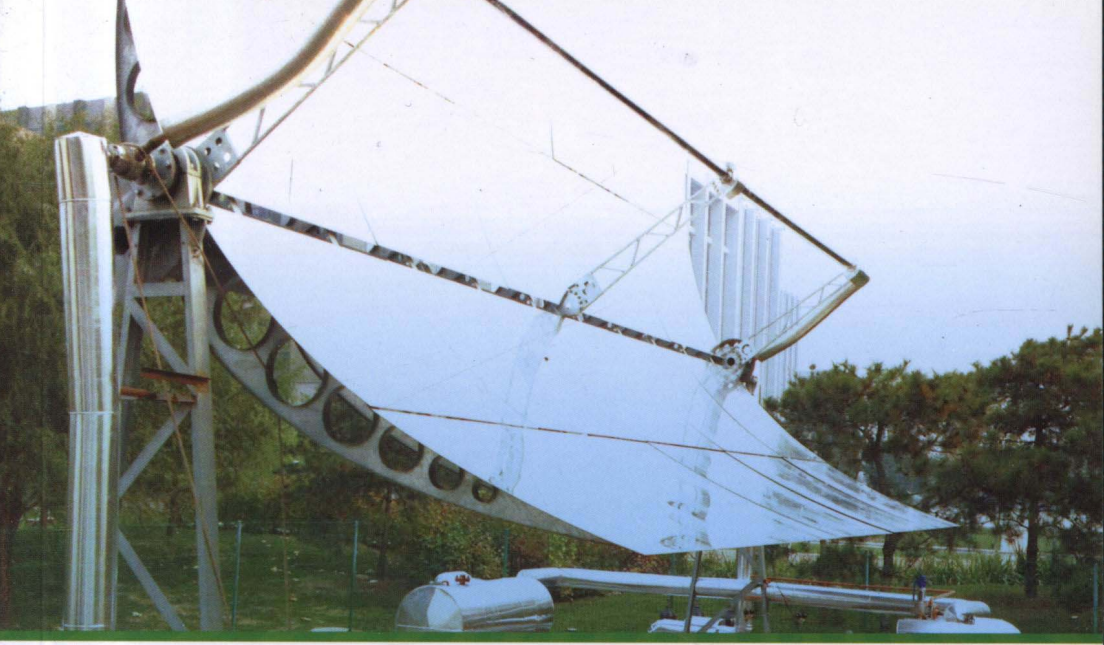
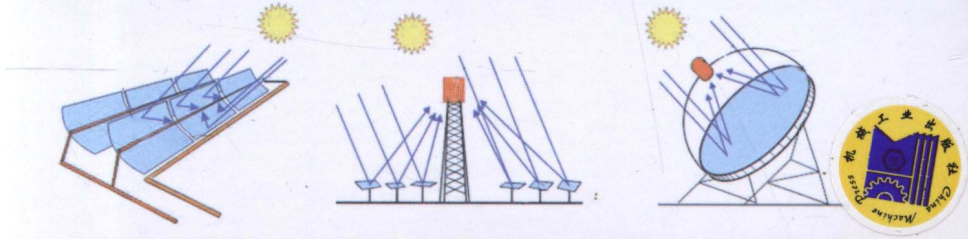


太阳能热发电站

宋记锋 丁树娟 编著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



太阳能热发电站

宋记锋　丁树娟　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书以太阳能热发电站设计、运行为主线，依次讲述太阳轨迹计算、太阳辐射能、传热学基础、槽式热发电站、塔式热发电站、碟式热发电站，涉及光热电站的原理介绍、结构设计、聚光、集热、换热、蓄热等模块的参数描述。本书中理论与实际工程应用相结合，注重横向比较，给出了比较详细的电站设计参数，便于教师组织教学和学生连贯、系统的学习。本书可供太阳能发电专业方向的学生使用，以及作为电力设计院、电力研究院人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能热发电站/宋记锋，丁树娟编著. —北京：
机械工业出版社，2012.10
ISBN 978-7-111-39898-1

Ⅰ.①太… Ⅱ.①宋…②丁… Ⅲ.①太阳能发电—
电站 Ⅳ.①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 231138 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑：张俊红 责任编辑：江婧婧
版式设计：姜 婷 责任校对：樊钟英
封面设计：马精明 责任印制：张 楠
北京双青印刷厂印刷
2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
148mm×210mm · 6.875 印张 · 203 千字
0001—3000册
标准书号：ISBN 978-7-111-39898-1
定价：35.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务		网络服务	
社 服 务 中 心：	(010)88361066	教 材 网：	http://www.cmpedu.com
销 售 一 部：	(010)68326294	机工官网：	http://www.cmpbook.com
销 售 二 部：	(010)88379649	机工官博：	http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：	(010)88379203	**封面无防伪标均为盗版**	

前　言

太阳能热利用是一种新兴的可再生能源利用技术，按照介质被加热的温度等级可分为低温热利用、中温热利用和高温热利用。迄今为止，太阳能热利用是太阳能利用中技术最成熟、转换效率较高、价格比较低廉的方式之一，尤其是中低温的热利用，而高温热利用则主要为太阳能热发电等。

太阳能热发电指利用太阳能热量加热换热工质推动轮机进行发电。太阳能热发电的概念最早在19世纪被提出，自从1878年在巴黎建立了第一个小型点聚焦太阳能热交换式蒸汽机以来，能源领域专家从各个方面对太阳能热发电技术展开探讨，太阳能热发电技术取得了显著的进展。太阳能热发电与常规燃煤、燃气、火力发电系统相比，太阳能热发电系统中用太阳能集热系统取代了锅炉系统，汽轮机系统构成则基本相同，但机组参数与常规火电有较大差异。

按照太阳能集热温度的高低，太阳能热发电系统可以分为塔式系统、碟式系统和槽式系统三大基本的朗肯循环类型和以热空气为工质的太阳能烟囱。这三种利用方式都为聚焦式集热类型。槽式太阳能热发电系统是利用槽形抛物面反射镜聚焦太阳能加热工质，经换热产生蒸汽后推动汽轮机带动发电机发电的能源动力系统。槽式太阳能集热系统由许多分散布置的槽形抛物面聚光集热器串联或并联组成。塔式太阳能热发电系统是利用定日镜跟踪太阳，并将太阳光聚焦在中心接收塔的接收器上，将聚焦的辐射能转变为热能，加热工质，驱动汽轮发电机发电。塔式太阳能热发电系统为典型的太阳能高温热利用方式，其系统最高集热温度可以达到1000℃以上。碟式太阳能热发电系统是由碟形镜面组成的抛物面反射镜，接收器在抛物面的焦点上，接收器内的传热工

质被加热后驱动发动机进行发电。碟式太阳能热发电技术是太阳能热发电中光电转换效率最高的一种方式。

我国在发展太阳能热发电技术上已经起步较晚，所以我们要加快脚步，相信太阳能热发电技术的发展将会带来显著的社会效益、经济效益和环境效益，将成为新能源的经济增长点，并实现可持续发展。

本书由华北电力大学宋记锋老师主编。在宋记锋老师的指导下，靳周、吴俊杰、罗娜编和张民幸编写了第 1 章和第 2 章，周传文编写了第3 章和第6 章，朱勇编写了第4 章和第5 章，最后由宋记锋和丁树娟统稿。

编者期望通过本书能对太阳能热发电技术做个很好的总结，其中很多工作是作者的研究所得，希望本书的出版能够推动我国太阳能热发电技术的发展，为我国太阳能热利用、节能减排事业的发展做出微薄的贡献。

太阳能热发电技术是涉及多学科，是综合性很强的研究热点，由于本书编写人员专业水平有限，对诸多问题的理解难免不够准确，如有不妥之处，恳请各位领导、专家、学者批评指正。编者希望通过本书，使广大读者充分认识太阳能热发电技术，为我国可再生能源发电事业的发展作出贡献。

编　者

目　　录

前言
绪论 …… 1
第 1 章　太阳几何学基础 …… 3
1.1　地球的自转、公转 …… 3
1.2　天球坐标系 …… 5
1.3　太阳角度计算 …… 7
1.3.1　太阳高度角 …… 7
1.3.2　太阳方位角 …… 8
1.3.3　日出日没的时角 …… 9
1.3.4　日出日没的方位角 …… 9
1.4　太阳时与时差 …… 10
1.4.1　真太阳时与平太阳时 …… 10
1.4.2　时差 …… 11
第 2 章　太阳辐射学 …… 14
2.1　引言 …… 14
2.2　太阳的能量 …… 14
2.3　地球大气层外的太阳辐射 …… 16
2.3.1　太阳常数 …… 16
2.3.2　太阳光谱 …… 17
2.4　地球表面的太阳辐射 …… 19
2.4.1　大气成分 …… 19
2.4.2　均质大气 …… 19
2.4.3　大气质量 …… 21
2.4.4　大气透明度 …… 24
2.4.5　直射辐射和散射辐射 …… 25
2.4.6　倾斜面上的太阳总辐射 …… 28

2.5 太阳能资源评估 …… 29
2.5.1 太阳能总辐射的计算方法 …… 29
2.5.2 太阳能资源的丰富程度与稳定程度 …… 34
2.5.3 我国太阳能资源分布 …… 35
2.5.4 实例分析 …… 37
第3章 传热学基本理论 …… 39
3.1 引言 …… 39
3.2 导热 …… 40
3.2.1 导热基本定律 …… 40
3.2.2 通过平壁的导热 …… 41
3.2.3 通过圆管的导热 …… 42
3.2.4 通过球壳的导热 …… 43
3.3 对流换热 …… 44
3.3.1 牛顿冷却定律 …… 44
3.3.2 层流、湍流和雷诺数 …… 44
3.3.3 边界层理论 …… 45
3.3.4 对流换热的经验公式 …… 46
3.3.5 对流边界条件下平板和圆管壁的换热量 …… 52
3.4 热辐射 …… 54
3.4.1 热辐射现象的基本概念 …… 54
3.4.2 黑体辐射基本定律 …… 56
3.4.3 物体表面间的辐射换热 …… 61
3.4.4 通过半透明介质的辐射传递 …… 64
第4章 槽式热发电站 …… 67
4.1 太阳能集热系统 …… 67
4.1.1 太阳能聚光集热系统 …… 67
4.1.2 聚光器技术 …… 67
4.1.3 抛物面反光镜技术 …… 71
4.1.4 支架 …… 72
4.1.5 跟踪机构 …… 73
4.1.6 集热管 …… 73

4.1.7　金属-玻璃真空集热管 …… 75
4.1.8　集热管热力性能分析 …… 82
4.1.9　机械结构与驱动 …… 90
4.2　地址选择 …… 90
4.2.1　概述 …… 90
4.2.2　实例分析 …… 94
4.3　工艺技术方案 …… 99
4.3.1　技术方案的选择 …… 99
4.3.2　主要设备的选择 …… 142
4.3.3　技术方案的优化 …… 156
4.4　发电量计算与发电成本估算 …… 156
4.4.1　发电量计算模型 …… 156
4.4.2　不同参数、不同运行模式下的发电量计算 …… 160
4.4.3　发电成本估算 …… 165
4.5　应用案例 …… 170
4.5.1　SEGS 系统 …… 170
4.5.2　DISS 系统 …… 171
4.6　发展趋势 …… 174
第 5 章　塔式热发电站 …… 176
5.1　基本原理 …… 176
5.2　定日镜结构与控制 …… 177
5.2.1　定日镜总体设计 …… 177
5.2.2　高可靠性、高反射率玻璃镜的研制 …… 177
5.2.3　支架的结构设计及力学稳定性分析 …… 177
5.2.4　支架与玻璃反射镜的结合方法 …… 177
5.2.5　高准确度传动方式 …… 177
5.2.6　定日镜控制方式的研究及器件开发 …… 177
5.2.7　定日镜误差控制方法 …… 178
5.3　热工系统 …… 178
5.3.1　塔式太阳能热发电系统的结构 …… 178
5.3.2　定日镜系统 …… 178

5.3.3 塔式太阳能热发电的热交换系统 …… 181
5.3.4 适合我国国情的技术——相对比较成熟的塔式太阳能热发电集成方案 …… 183
5.4 实例分析 …… 186
5.4.1 PS10 太阳能热发电站 …… 186
5.4.2 PS20 太阳能热发电站 …… 187
第 6 章 斯特林热发电系统 …… 189
6.1 碟式太阳能热发电系统 …… 189
6.1.1 聚光器 …… 190
6.1.2 接收器 …… 192
6.1.3 热机 …… 195
6.1.4 发展现状 …… 195
6.2 斯特林发动机 …… 198
6.2.1 斯特林发动机简介 …… 198
6.2.2 斯特林发动机的原理 …… 199
6.2.3 斯特林发动机的基本类型 …… 202
6.3 碟式斯特林太阳能热发电系统的应用 …… 202
附录 各类热发电聚光能流密度参考数据 …… 205
参考文献 …… 209

绪　论

1. 太阳能热发电的定义

太阳能辐照强度较低，夏季中午时分水平面辐照强度约为 1kW/m^2，能量品质低，难以形成高效率的发电。太阳能热发电是通过对太阳光聚焦，获得几十倍、几百倍的太阳辐照度，进而加热工质，最终产生高温高压工质，进行热功转换，带动发电机发电。

由于太阳轨迹的变化，进行聚焦的前提是配置太阳跟踪装置。

2. 产业背景

太阳能热发电作为新能源发电一个不可或缺的组成部分，经过数十年的发展，已进入商业化阶段，美国能源局已将太阳能热发电定义为基础能源。太阳能热发电的优势在于通过热储存和与其他能源的互补，能够提供稳定的电力供应，对电网冲击小，具备调频、调峰能力，规模效益显著，因此太阳能热发电引起全球范围内越来越多的重视。

在资源方面，我国是太阳能资源非常丰富的国家之一，全国超过 2/3 的土地面积每年接收的太阳辐射超过 5.02 × 106kJ/m^2。按照国际通用标准，太阳直射值(DNI)只要大于每年 1800kWh/m^2，太阳能热发电就会具有较好的经济效益。在我国，西藏、新疆、内蒙古、甘肃西部、青海部分地区都是潜在的太阳能热发电站候选地址。根据国产化后的电价成本和国内适宜进行太阳能热发电区域所覆盖的范围，进行大规模商业化太阳能热发电站建设的基础条件是完全具备的。

在政策方面，经历了金融危机以及面临全球气候变暖的问题后，各发达国家均把新能源产业作为拯救经济的一个突破口给予了积极的扶持和推动。而在国内，随着胡锦涛总书记和温家宝总理相继在联合国气候变化峰会和哥本哈根会议上表明我国应对气候变化的立场，就我国可再生能源利用和二氧化碳减排比例做出郑重承诺后，国内新能源的发展如箭在弦，我国新能源产业进入一个快速发展的阶段。此

外，国家为推进可再生能源的发展，相继出台了一系列法律法规和政策，其中包括《可再生能源法》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006～2020年)》和《可再生能源中长期发展规划》等，其中最重要的就是提出了可再生能源在我国整个能源消费中所占的比例到2020年要达到15%左右，这使得太阳能热发电在商业上具有推广应用的前景。

在市场前景方面，根据国际能源署(IEA)下属的SolarPACES、欧洲太阳能热发电协会(ESTELA)和绿色和平组织的预测认为，太阳能聚光热发电(CSP)到2030年在全球能源供应份额中将占3%～3.6%，到2050年将占8%～11.8%。这意味着到2050年CSP装机容量将达到830GW，每年新增41GW。在未来5～10年内累计年增长率将达到17%～27%。因此，开展该项目的研究也是市场发展的需求。

近年来，国内太阳能热发电研究已形成一种趋势，许多地方政府积极争取相关的项目或将设备制造商落户当地，以期形成新的经济增长点。特别是在国家发展新兴战略性产业的框架下，当风电和太阳能光伏产业在我国已呈现规模化格局，太阳能热发电将受到各方的关注，并引发新一轮的热潮。

随着可再生能源配额制的即将实施，五大发电集团(中国华能集团公司、中国大唐集团公司、中国华电集团公司、中国国电集团公司和中国电力投资集团公司)和地方能源公司高度重视太阳能热发电项目的开发与技术储备，纷纷寻求新能源项目。2011年我国大唐集团新能源股份有限公司中标我国首个50MW槽式太阳能热发电特许权示范项目。此外，其还正在甘肃嘉峪关建设了1.5MW槽式太阳能与燃煤机组的光煤互补电站。虽然国内槽式太阳能热发电市场尚不成熟，但据不完全统计，正在酝酿的热发电项目装机容量已高达4GW，潜在市场巨大。

第 1 章　太阳几何学基础

太阳能热利用是指将太阳辐射能转换为热能并加以利用。因此，在太阳能热利用的研究领域中，首先必须深入了解太阳辐射能，而到达地球表面上的太阳辐射能，直接受到天文、地理、几何、物理等多个因素的影响。

因此，要了解到达太阳能热利用装置的太阳辐射能，掌握不同时间、不同日期、不同月份日照变化的规律，就必须了解地球与太阳的运动规律。

1.1　地球的自转、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围绕太阳公转引起的。

地球每天由西向东绕着通过它自身的南极和北极的一根假想轴自转一周。这根假想轴被称为“地轴”。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，还绕太阳在偏心率很小的椭圆形轨道上运行，称为“公转”，其周期为一年。地球公转的轨道称为“黄道”，公转轨道所在的平面称为“黄道面”。地球的自转轴与黄道面的法线倾斜成 23°27′的夹角，也就是地球赤道面与黄道面有 23°27′的夹角，所以也称为“黄赤夹角”。地球公转时，自转轴的方向始终不变，这就使得阳光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、冬至四个典型季节日代表地球公转的行程图。春分日，太阳垂直照射在地球的赤道位置上，地面上昼夜相等；夏至日，太阳垂直照射在北纬 23°27′的地球表面上，在南极圈(南纬 66°33′)内的地区整天见不到太阳，而北极圈内的地方则整天太阳不落；秋分日，阳光又垂直照射在地球的赤道位置上，地面上

昼夜相等；冬至日，阳光则垂直照射在南纬23°27′的地球表面上，北极圈(北纬66°33′)内整日不见阳光，而南极圈内的地方则整天太阳不落。

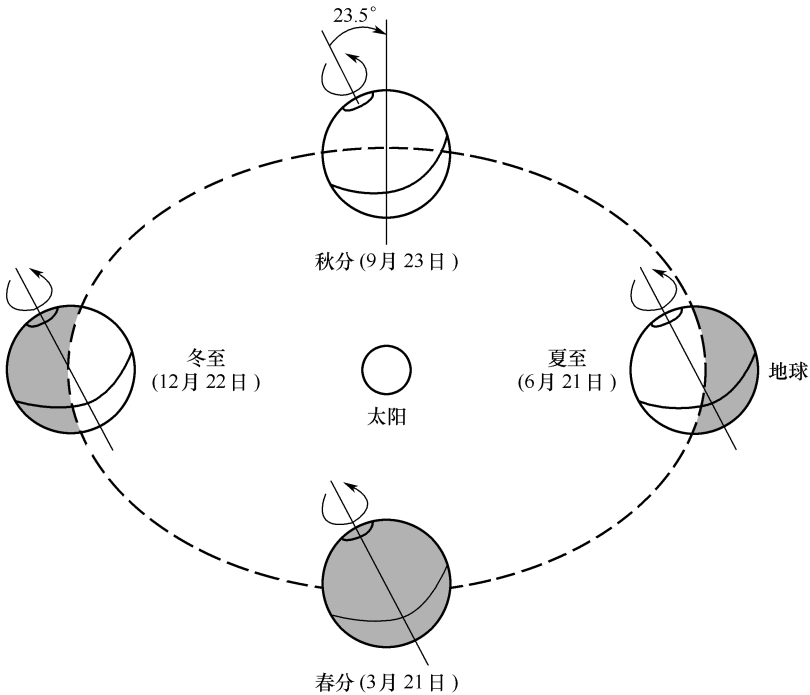


图 1-1　地球绕太阳运行示意图

地球绕太阳运行一周，历时一年，计365天5小时48分46秒，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”。

由于地球绕太阳运行轨道是一个椭圆，所以地球与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

1.496×10^8km。天文学中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为5×10^6km。

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二次方成反比，它所引起的太阳辐照能量的变化为年平均值的±3.5%之内。正因为如此，严格地说，不同日期测到的日射数值是不能互相比较的，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，可以有以下公式：

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

式中，S_{R_0}为日地平均距离所对应的日射数值；S_R为任何时间测定的日射数值；R_0为日地平均距离；R为任何时间的日地距离。

在实际应用中，为方便起见，一般不是直接使用任何时间的日地距离，按式(1-1)计算；而是根据事先做好的表格，按日历的日期去查找$(R/R_0)^2$。

1.2　天球坐标系

所谓“天球”，就是人们站在地球表面上，仰望天空，平视四周时看到的那个假想球面。根据相对运动的原理，太阳就好像在这个球面上周而复始地运动一样。要确定太阳在天球上的位置，最方便的方法是采用天球坐标系。天球坐标系需要选择一些基本的参数。

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，这条直线叫做

“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 1-2 所示。

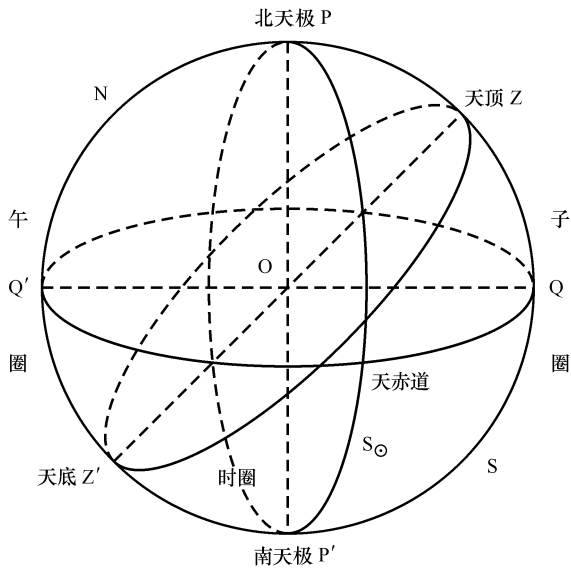


图 1-2　天球的基本点和圈

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，所以天球绕天轴旋转也是等速运动的，即每小时转动 15°。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。

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′，叫做“天赤道”。

3. 时圈

通过北天极 P 和太阳 $S_{\odot}$ 的大圆 $PS_{\odot}P'$，叫做“时圈”。它与天赤道是相互垂直的。由于天赤道到太阳的角度距离是用相应于这个圆的

纬度来度量的，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 恰好位于观测点的头顶上，称为“天顶”，和 Z 相对应的另一个 Z′，则位于观测者的脚下，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，叫做“真地平”，有时又叫“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，因此也叫做“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 叫做“北点”，而与北极正相对的点 S 叫做“南点”若观测者面向北，其右方距南北点各为 90°，E 叫做“东点”，而与东点正相对的点 W 叫“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。

1.3　太阳角度计算

无论是哪一种形式的太阳能热利用装置，都必然要涉及太阳高度角、方位角、日照时间等计算问题。如图 1-3 所示，指向太阳的矢量 $\boldsymbol{S}$ 与天顶 Z 的夹角 θ_Z 就是太阳的天顶角；矢量 $\boldsymbol{S}$ 与地平面的夹角 α_S 就是太阳高度角；$\boldsymbol{S}$ 在地平面上的投影线与南北方向线之间的夹角 γ_S 就是太阳的方位角。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，以及日出日落时，角和方位角的计算式。

1.3.1　太阳高度角

计算太阳高度角的表达式为

$$\sin\alpha_s = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega \tag{1-2}$$

式中，α_s 为太阳高度角；φ 为地理纬度；δ 为太阳赤纬；ω 为时角。

当太阳正午时，$\omega = 0$，式(1-2)可简化为

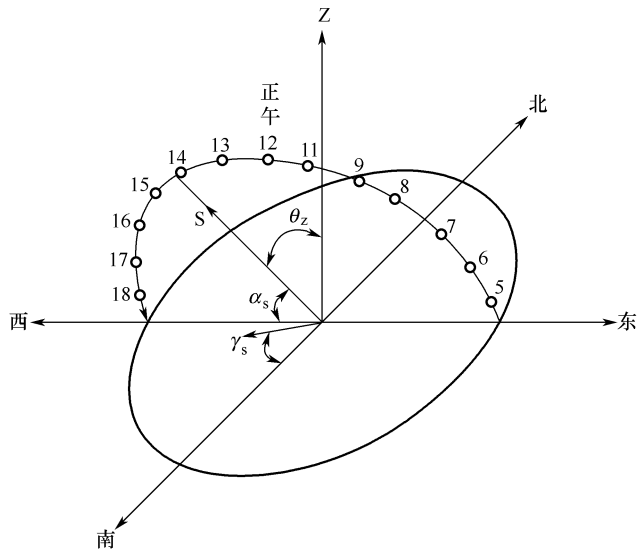


图 1-3 太阳高度角及方位角示意图

$$\begin{aligned}\sin\alpha_s &= \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta = \cos(\varphi - \delta)\\ &= \sin[90^\circ \pm (\varphi - \delta)]\end{aligned} \tag{1-3}$$

当正午太阳在天顶以南，即 $\Phi > \delta$ 时，取

$$\begin{aligned}\sin\alpha &= [90^\circ - (\varphi - \delta)]\\ \alpha_s &= 90^\circ - \varphi + \delta\end{aligned} \tag{1-4}$$

当正午太阳在天顶以北，即 $\Phi < \delta$ 时，取

$$\begin{aligned}\sin\alpha_s &= [90^\circ + (\varphi - \delta)]\\ \alpha_s &= 90^\circ + \varphi - \delta\end{aligned} \tag{1-5}$$

当正午太阳正对天顶，即 $\Phi = \delta$ 时，则有

$$\alpha_s = 90^\circ \tag{1-6}$$

1.3.2 太阳方位角

计算太阳方位角的表达式为

$$\sin\gamma_s = \frac{\cos\delta\sin\omega}{\cos\alpha_s} \tag{1-7}$$

或