

太阳能聚光集热 及其应用技术

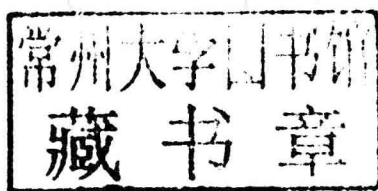
宋景慧 徐齐胜 代彦军 冯永新 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

太阳能聚光集热 及其应用技术

宋景慧 徐齐胜 代彦军 冯永新 编著
湛志钢 李方勇 李 显 马继帅



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要阐述了太阳能聚光集热技术、太阳能发电技术、太阳能制冷技术、太阳能海水淡化技术、太阳能存储和太阳能聚光集热技术示范应用,介绍了线性菲涅尔集热器与1.x效溴化锂吸收式制冷机、有机朗肯循环发电机组的匹配运行性能,并通过数值模拟的方法对太阳能光热利用系统做了优化设计。书中既系统地阐述了太阳能热利用的基本概念和理论,又深入介绍了太阳能光热发电、制冷系统的运行特性以及集热温度对整个系统的影响。

本书紧密结合我国可再生能源发展政策和节能减排大趋势,充分反映可再生能源与材料行业技术发展的新趋势和新动向,力求使读者获得适应于当前能源动力学科和材料行业技术发展需求的知识和技术。

本书可供能源、环境、材料等相关领域的科研人员、工程技术人员和管理人员参阅,也可作为高等院校相关专业师生的辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能聚光集热及其应用技术 / 宋景慧等编著. —北京: 中国电力出版社, 2017. 3
ISBN 978-7-5198-0140-3

I. ①太… II. ①宋… III. ①太阳能利用—光电技术—研究 IV. ①TK519

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第027924号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 赵鸣志(010-63412385) 马雪倩

责任校对: 王开云

装帧设计: 王红柳 赵姗姗

责任印制: 蔺义舟

印 刷: 三河市航远印刷有限公司

版 次: 2017年3月第一版

印 次: 2017年3月北京第一次印刷

开 本: 787毫米×1092毫米 16开本

印 张: 12.75

字 数: 311千字

印 数: 0001—1500册

定 价: 45.00元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

当今社会，全球经济繁荣发展，对能源的需求量巨大，且呈逐年增长趋势，煤炭、石油、天然气等化石能源长久以来极大地支撑和推动着人类社会的进步和发展，而化石能源储量有限，大规模的开采和应用已使人类面临着资源枯竭的威胁。此外，化石能源使用过程中排放出大量的有害气体，导致环境恶化，如燃煤导致大气中PM2.5居高不下；排放出的大量二氧化碳导致了全球气候变暖。根据国际能源协会（IEA）的预测，以目前的发展趋势，截止2030年全球能源消耗将增加50%；同时，大气层中温室气体的增加使得全球气温明显升高，并有可能引发一系列的环境问题。为了解决上述问题，目前越来越多的国家开始着力于研究清洁可再生能源利用技术，根据IEA的研究预测，到2035年可再生能源将提供全球35%的供电量。常见的可再生能源包括太阳能、风能、核能、地热能、生物质能、潮汐能等，其中太阳能因为具有清洁、可再生、分布广、容易获取等优点而得到广泛的应用。我国是太阳能资源十分丰富的国家之一，2/3的地区年辐射总量大于 $5020\text{MJ}/\text{m}^2$ ，年日照时数在2200h以上，尤其在西北地区，太阳能的开发利用具有广大的市场前景。

太阳能热利用是将太阳辐射能量直接转化成热能供人类利用。基本原理是利用集热装置将太阳能收集起来，再通过与介质的相互作用转换成热能而加以直接或间接的利用。太阳能光热可用于发电、制冷/供热、海水淡化、工业加热等领域。根据使用温度的范围，可以将太阳能热利用分为低温、中温以及高温利用，其中太阳能热发电属于中高温利用，温度一般在 250°C 以上。由于太阳能能流密度低，为了实现太阳能中高温利用，需采用太阳能聚焦集热技术，即利用大量的反射镜面将太阳直射光线聚集到相对很小的吸热表面，将吸热介质加热到中高温水平。

相对于光伏发电，聚光太阳能热发电（concentrating solar power, CSP）具有其独到的优势：①光热发电上网功率平稳，时间长，可以融合蓄能系统；②可以进行太阳能余热综合利用，这个特性可使光热发电与常规能源实现互补，实现减煤目标，达到节能减排效果；③优异的环境特性，光热发电每兆瓦时电量排出二氧化碳仅有12kg，光伏发电是110kg，天然气发电为435kg，煤电为900kg。各种太阳能热发电技术投入商业化应用的时间不同，因此技术的成熟程度也不尽相同。其中，槽式发电技术由于最早（1984年）投入商业化应用，电站运行经验相对丰富，因此是目前已建和在装装机容量中占比最多的技术类型。塔式电站虽然数量上没有槽式电站多，但是由于运行温度高、系统效率高，在这几年国内多个50MW的塔式电站正如火如荼地建设，大有后来居上之势。线性菲涅耳式集热器也有小规模示范电站，目前正在西班牙进行规模化（30MW）电站建设。碟式斯特林技术虽然系统效率最高，然而由于技术开发难度大，目前投入运行的电站寥寥无几。

太阳能（光热）制冷是利用吸收式制冷技术、吸附式制冷技术、喷射式制冷技术以及除

湿空调技术，用热驱动制冷机制冷。与常规电驱动的压缩式制冷技术相比，太阳能制冷设备没有压缩机，几乎不消耗电能等常规能源，可集成储热技术，运行成本低；采用的制冷工质不含氟利昂，对大气层保护具有重要意义。

海水淡化技术大体分为两类——膜法和热法，太阳能海水淡化属于后者，利用集热技术收集太阳能热量加热海水，蒸发冷凝出水。国内外成熟的技术有多级闪蒸、低温多效、压汽蒸馏等，但目前高昂的成本是制约太阳能海水淡化推广开来的瓶颈。

储热技术是提高能源利用效率和保护环境的重要技术，可用于解决热能供给与需求失配的矛盾，在太阳能利用、电力的“移峰填谷”、废热和余热的回收利用以及工业与民用建筑和空调的节能等领域具有广泛的应用前景，目前已成为世界范围内的研究热点。太阳能储热技术可以克服太阳能辐射能量不稳定、不连续的缺点，可大大提高系统的稳定性与可靠性。

在国内经济发展的步伐放缓，能源结构调整不断深入，太阳能热利用技术迎来了发展的机遇。2014年11月，国家发展和改革委员会正式公布《国家应对气候变化规划（2014~2020年）》，规划指出了控制温室气体排放的九大主要措施，其中太阳能光热被列入优化能源结构的行动措施之一，规划还提出要“扩大太阳能热利用技术的应用领域，支持并开展太阳能热发电项目示范。2020年太阳能发电装机容量达到1亿kW，太阳能热利用安装面积达到8亿m²”。同时，国务院办公厅正式印发《能源发展战略行动计划（2014~2020年）》，计划指出，要稳步实施太阳能热发电示范工程，太阳能光热发电作为20个重点创新方向被重点提及。2016年9月14日，国家能源局公布首批20个太阳能热发电示范项目，同日发布的《关于建设太阳能热发电示范项目的通知》要求有关电网企业配合做好示范项目配套电网建设规划，确保示范项目发电量全额消纳。随后国家发展改革委发出《关于太阳能热发电标杆上网电价政策的通知》，核定太阳能热发电标杆上网电价为1.15元/kWh，纳入示范项目名单的项目可以享受。这些政策的出台将有力地推动太阳能热发电产业化发展，我国光热发电市场即将全面放开，甚至迎来井喷的局面，光热发电时代已然来临。

编著者根据多年来对可再生能源，尤其是太阳能光热发电的研究和工程实践，编写了此书，以供能源、环境、材料等相关领域的科研人员、工程技术人员和管理人员参阅，也可供高等院校相关专业的师生参考。

本书分为10章，在介绍太阳能集热技术及装置的基础上，概述了国内外太阳能热利用技术的发展趋势。阐述了太阳能光热在多领域利用的原理。重点论述了太阳能光热发电、太阳能制冷技术，并系统的介绍了太阳能聚光集热能量综合利用实验台试验。结合示范项目，详细介绍了线性菲涅尔集热器与1.α效溴化锂吸收式制冷机、有机朗肯循环发电机组的匹配运行性能，并通过数值模拟的方法对太阳能光热利用系统做了优化设计。

本书第1~第6、第8章由宋景慧教授、代彦军教授与研究生马继帅编写，第7章由李显博士与研究生马继帅编写，第9章由冯永新教授与湛志钢高工编写，第10章由徐齐胜教授与李方勇高工编写。

由于编者水平有限，编写时间仓促，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

前言	
第 1 章 太阳辐射与太阳能资源	1
1.1 地球自转与公转	2
1.2 天球坐标系	3
1.3 太阳角	5
1.4 太阳时	6
1.5 太阳辐射	7
1.6 太阳能资源分布	13
1.7 太阳能利用	15
第 2 章 太阳能聚光集热技术发展现状及趋势	17
2.1 国内外技术发展现状	17
2.2 产业发展趋势	21
2.3 政策与法规	28
第 3 章 非聚光集热器	44
3.1 太阳能集热器概述	44
3.2 平板集热器	45
3.3 真空管集热器	54
3.4 其他非聚光集热器	60
第 4 章 聚光型集热器	64
4.1 聚光型集热器概述	64
4.2 槽式集热器	64
4.3 菲涅尔集热器	69
4.4 碟式集热器	75
4.5 塔式集热器	80
第 5 章 太阳能聚光集热发电技术	88
5.1 太阳能热发电技术概述	88
5.2 槽式发电技术	90
5.3 塔式发电技术	94
5.4 碟式发电技术	100
5.5 线性菲涅尔式发电技术	101

第 6 章	太阳能聚光集热制冷技术	104
6.1	太阳能制冷技术概述	104
6.2	太阳能制冷技术原理	106
6.3	太阳能制冷机组	114
6.4	太阳能制冷技术的应用	117
第 7 章	太阳能聚光集热海水淡化技术	123
7.1	太阳能海水淡化技术概述	123
7.2	太阳能集热海水淡化技术原理	124
7.3	太阳能聚光集热海水淡化系统	130
7.4	系统评价指标	135
7.5	太阳能海水淡化工程案例	137
第 8 章	太阳能储热技术	144
8.1	太阳能储热技术分类	144
8.2	太阳能显热存储	147
8.3	太阳能潜热存储	151
8.4	太阳能化学存储	161
第 9 章	太阳能聚光集热系统仿真	166
9.1	仿真技术简介	166
9.2	太阳能聚光集热系统仿真方法	167
9.3	太阳能聚光集热系统集热器镜场仿真	169
9.4	太阳能聚光集热系统吸收器仿真	174
9.5	太阳能聚光集热系统吸收式制冷机仿真	179
9.6	太阳能聚光集热系统运行仿真	181
第 10 章	太阳能聚光集热系统实例分析	185
10.1	太阳能聚光集热试验台系统实例	185
10.2	太阳能聚光集热系统集热器性能测试	189
10.3	太阳能聚光集热系统制冷性能	192
10.4	太阳能聚光集热系统发电性能	195

太阳辐射与太阳能资源

太阳是离地球最近的一颗恒星，也是太阳系中最大的星体。太阳是一个主要由氢和氦组成的气态球。根据最新的测定，日地间的距离为 $1.49597892 \times 10^8 \text{ km}$ 。从地球上望去，太阳的张角为 $31^\circ 59'$ ，把角度换算成弧度再乘上日地距离，便可得出太阳的直径为 $1.392 \times 10^6 \text{ km}$ ，这是地球直径的 109 倍。就体积而论，则比地球大 130 多万倍。太阳不仅体积硕大，其质量也很可观。根据万有引力定律，在已知地球质量为 $6.0 \times 10^{21} \text{ t}$ 的情况下，可以推算出太阳的质量为 $1.989 \times 10^{27} \text{ t}$ ，也就是说太阳的质量为地球质量的 33 万倍。知道了质量和体积，就不难求得太阳的平均密度为 1.4 g/cm^3 ，即比水重近 50%。实际上，太阳各处的密度相差悬殊，外层的密度比较小，内部在承受外部巨大的压力情况下，密度高达 160 g/cm^3 ，正是因为如此，日心的引力要比地心的引力大 29 倍。日地关系示意图如图 1-1 所示。

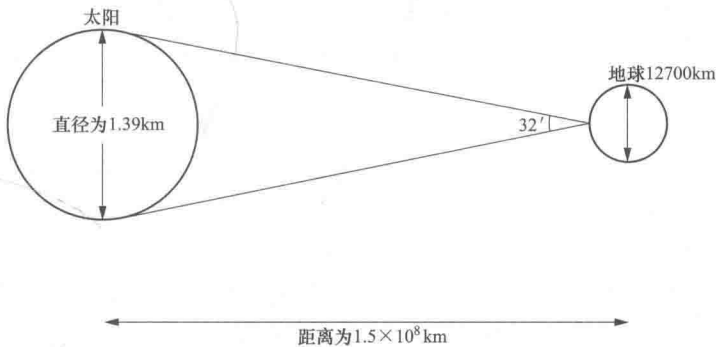


图 1-1 日地关系示意图

太阳表面的有效温度为 5762 K ，而中心区的温度高达 $40 \times 10^6 \text{ K}$ 。内部压力有 3400 多亿标准大气压。由于太阳内部的温度极高、压力极大，物质早已离子化，呈等离子状态，不同元素的原子核相互碰撞，引起了一系列核子反应，从而构成太阳的能源，它的热量主要来源于氢聚变成氦的聚合反应。太阳一刻不停地发射着巨大的能量，每秒有 $657 \times 10^9 \text{ kg}$ 的氢聚变成 $657 \times 10^9 \text{ kg}$ 的氦，连续产生 $391 \times 10^{21} \text{ kW}$ 的能量。这些能量以电磁波的形式向空间辐射，其中有 22 亿分之一到达地球表面，尽管如此，它仍是地球上最多的能源，约为 $173 \times 10^{12} \text{ kW}$ 。这是一个巨大的能源。

太阳结构示意图如图 1-2 所示：在半径为 $0.23R$ (R 为太阳半径) 的区域内，可称为产能核心，温度为 $8 \times 10^6 \sim 40 \times 10^6 \text{ K}$ ，密度为水的 $80 \sim 100$ 倍，占太阳全部质量的 40%，体积的 15%，产能的 90%，以对流和辐射的方式向外传送能量；在 $0.23R \sim 0.70R$ 的范围内，

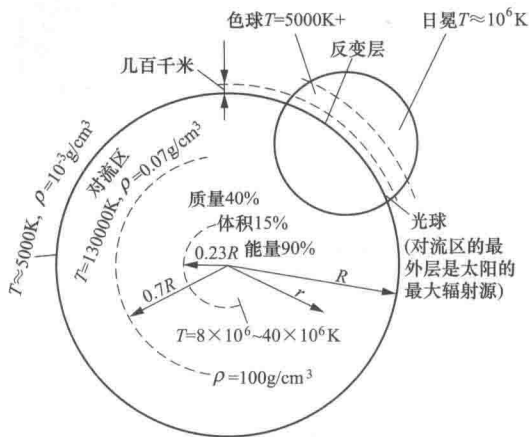


图 1-2 太阳结构示意图

注: T 表示温度, K ; R 表示太阳半径, km ;
 r 表示太阳内部某点到球心半径, km ; ρ 表示密度, g/cm^3 ;
 温度数值后的“+”表示“以上”之意。

温度下降到 $130000K$ 左右, 密度下降到 $0.078g/cm^3$; $0.70R \sim 1R$ 的范围内是对流区, 温度下降至 $5000K$, 密度为 $10^{-8} g/cm^3$ 。这就是整个太阳的基本内部情况。

人们肉眼所见到的太阳表面叫作光球, 它的有效温度是 $5762K$, 厚约 $500km$, 密度 $10^{-6} g/cm^3$, 太阳的绝大多数辐射能都从这里发出。光球表面有黑子和光斑, 对太阳能的影响只有 0.5% , 可以忽略不计。

光球外面数百千米后的较冷气层是一层具有不同透明度的太阳雾, 叫作反变层。反变层外面的 $10000 \sim 15000km$ 叫作色球层。最外面一层是深入太空中的银白色的日冕, 它发出一部分质点和电子而产生散射, 温度高达 100 万 $^{\circ}C$, 高度达几十个太阳半径, 甚至地球也浸入日冕的余晖中。

甚至地球也浸入日冕的余晖中。

1.1 地球自转与公转

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 $23^{\circ}27'$ 的夹角, 也就是地球赤道面与黄道面有 $23^{\circ}27'$ 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^[1]。

图 1-3 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 $23^{\circ}27'$ 的地球表面上, 在南极圈 (南纬 $66^{\circ}33'$) 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 $23^{\circ}27'$ 的地球表面上, 北极圈 (北纬 $66^{\circ}33'$) 内整日不见阳光, 而南极圈内的地方则整天太阳不落。

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, 因此地球与太阳之间的距离在一年之内是变化的, 见表 1-1。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。

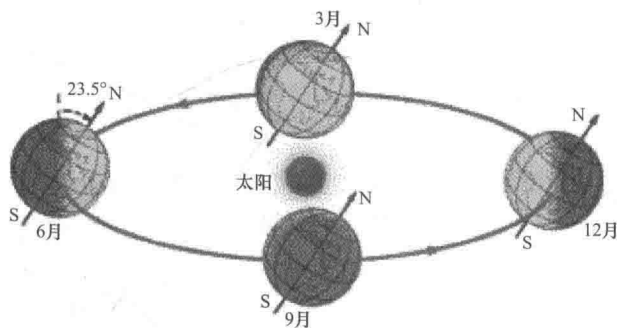


图 1-3 地球绕太阳运行示意图

表 1-1

日地距离的变化

日期	距离 (km)	日期	距离 (km)
1月初	147096000 (最短)	7月初	152105000 (最长)
4月初	149601000	10月初	149601000

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 $5 \times 10^6 \text{ km}$ 。

由于到达地球表面的太阳辐照度与距离的二次方成反比，日地距离的变化所引起的太阳辐照能量的变化在年平均值的 $\pm 3.5\%$ 之内。正因为如此，不同日期测到的日射数值严格地说是不能互相比较的，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：

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

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。

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

在计算太阳辐射中，离不开有关天球坐标的知识。所谓天球，就是人们站在地球表面上，仰望天空，在平视四周时看到的这个假想球面。根据相对运动原理，太阳好像是在这个球面上周而复始的运动一样。若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。常用的天球坐标系是赤道坐标系和水平坐标系。^[2]

1.2.1 赤道坐标系

这是以赤道 QQ' 为基本圈，以天赤道和天子午圈的交点 Q 为原点的天球坐标系。图 1-4 中， P 和 P' 分别为北天极和南天极，通过 PP' 的大圆都垂直于天赤道。显然，通过 P 和球面上的太阳 (S_0 点) 的半圆也垂直于天赤道，两者相交于 B 点。

在赤道坐标系中，太阳 S_0 的位置由下列两个坐标决定：

第一个坐标是圆弧 QB 所对应的圆心角，通常称为时角，用 ω 表示。时角从天子午圈上的 Q 点算起，即从太阳时的正午算起，顺时针方向为正，逆时针方向为负，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 QS_0 所对应的圆心角，叫作赤纬，用 δ 表示。赤纬从天赤道起算。对于太阳来说，向北天极由春分、秋分日的 0° 变化到夏至的正 $23^\circ 27'$ ；向南天极由春分和秋分日的 0° 变化到冬至日的负 $23^\circ 27'$ 。

太阳赤纬随时间的变化如图 1-5 所示， δ 可由 Cooper 方程近似计算：

$$\delta = 23.45 \sin\left(360^\circ \times \frac{284+n}{365}\right) \quad (1-2)$$

式中 n ——一年中的日期序号，如春分 $n=81$ ，算得 $\delta=0$ 。

由春分算起的第 d 天的太阳赤纬，则为

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{2\pi d}{365}\right) \quad (1-3)$$

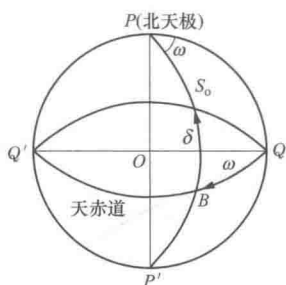


图 1-4 赤道坐标系

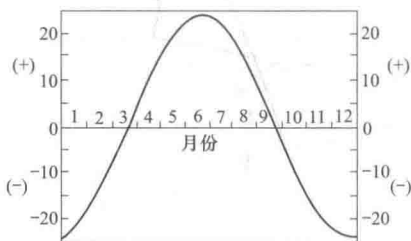


图 1-5 太阳赤纬随时间的变化

1.2.2 地平坐标系

通过天球球心 O 作一直线和观测点铅垂线平行，并与天球相交于 Z 和 Z' 。 Z 点叫作天顶， Z' 点叫作天底。通过球心 O 与 ZZ' 相垂直的平面在天球上所截出的大圆，叫作真地平。地平坐标系就是以真地平为基本圆，以南点 S 为原点的天体坐标系，如图 1-6 所示。天顶是基本的极，所有经过天顶的大圆都垂直于真地平。因此，通过天顶 Z 和太阳 S_0 的大圆也垂直于地平面，两者相交于 M 点。在地平坐标系中，太阳 S 的位置是由下面两个坐标确定：

第一个坐标是天顶距离，即圆弧 ZS_0 ，或天顶角 $\angle ZOS_0$ ，用 θ_z 表示，也可用太阳的地平高度（简称太阳高度）表示，即圆弧 S_0M 或中心角 $\angle S_0OM$ ，记作 α_s 。天顶距离和太阳高度有下列关系：



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

第二个坐标是方位角，即圆弧 SM ，用 γ_s 表示。取南点 S 为起点，向西（顺时针方向）为正，向东为负。

1.3 太阳角

太阳能集热器的设计计算都要涉及太阳高度角、方位角以及日照时间等问题。下面只介绍太阳高度角 α_s 、太阳方位角 γ_s 和日照时间 N 的计算式。

1.3.1 太阳高度角 α_s 的计算

图 1-7 中，指示太阳方位的向量 \vec{S} 与其在地平面的投影 \vec{S}_h 的夹角 α_s 就是太阳高度角，可以用下面的公式计算：

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

式中 φ ——当地纬度；

δ ——太阳赤纬；

ω ——时角。

1.3.2 太阳方位角 γ_s 的计算

在图 1-7 中， \vec{S} 在地平线上的投影线与南北方向线之间的夹角 γ_s 就是太阳方位角。 γ_s 可以由下面两式中的任意一个确定：

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s} \quad (1-6)$$

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \alpha_s \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha_s \cos \varphi} \quad (1-7)$$

1.3.3 日出日没角 ω_θ 以及日照时间 N 的计算

太阳视圆面中心在出没地平线的瞬间，太阳高度角 $\alpha_s = 0$ 。如果不考虑地表曲线以及太阳折射的影响，由式 (1-8) 即可得出日出日没角 ω_θ 的表达式

$$\cos \omega_\theta = -\tan \varphi \tan \delta \quad (1-8)$$

由于 $\cos \omega_\theta = \cos(-\omega_\theta)$ ，这两个解是：

$$\omega_{\theta, \text{日出}} = -\omega_\theta; \omega_{\theta, \text{日没}} = \omega_\theta$$

ω_θ 以度表示，负值表示日出时角 $\omega_{\theta, \text{日出}}$ ，正值表示日没时角 $\omega_{\theta, \text{日没}}$ 。

由于地球每小时自转 15° ，因此日照时间 N 可以用日出日没时角的绝对值除以 $15^\circ/\text{h}$ 得到：

$$N = \frac{\omega_{\theta, \text{日没}} + |\omega_{\theta, \text{日出}}|}{15^\circ/\text{h}} = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (1-9)$$

1.3.4 太阳角在集热器安装中的应用^[2]

投射到集热器上的太阳辐射能量与太阳高度、方位以及日照时间有关。因此，在太阳能系统的设计计算和安装中，经常涉及太阳角的计算。这里仅举太阳角在集热器安装中应用的几个例子。

(1) 集热器的定向。太阳能集热器的方位虽然也可以用罗盘定向，但是罗盘指示的方向

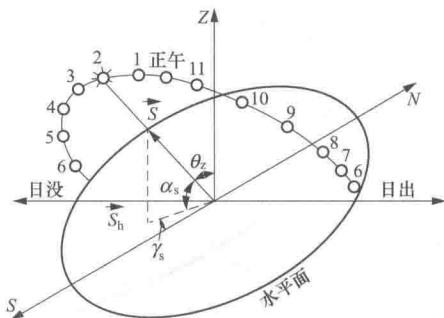


图 1-7 太阳视运动轨迹与太阳角示意图



是地磁的南、北极，它与地球自转的南、北极是不相合的。如果用正午的太阳方位定向，就能准确地达到目的。在北半球，纬度大于 $23^{\circ}27'$ 的地区，当纬度大于太阳赤纬时，正午时刻太阳正对南天极；纬度小于 $23^{\circ}27'$ 的地区，当太阳赤纬大于纬度时，正午时刻太阳正对北天极。所以，在正午时刻观测太阳（可以用棒影法）就能准确确定集热器的方向。

(2) 集热器的倾角。为了获得最大的太阳能量，必须将集热器的采光面在正午时垂直于太阳光线，即

$$S + \alpha_s = 90^{\circ} \quad (1-10)$$

式中 S ——集热器的倾角， $(^{\circ})$ 。

(3) 集热器的阴影。在安装集热器时，必须考虑周围建筑物和树林的遮挡，同时也要避免集热器之间互相遮挡。为此，需要经过计算并用图解法求得阴影面积。计算时可用式 (1-5) 求得太阳高度角，用式 (1-7) 可以求得太阳方位角，并用下式计算建筑物的影长 d

$$d = H \operatorname{arctan} \alpha_s \quad (1-11)$$

其中

$$H = H_1 - H_2$$

式中 α_s ——太阳高度角；

H ——建筑物的有效高度，m；

H_1 ——遮挡物的高度；

H_2 ——安装集热器的建筑物的高度。

由式 (1-11) 可知，太阳高度角 α_s 越小，建筑物的影长就越长。因此，在计算中应选用为集热器使用期间内的最小太阳高度角和相应的太阳方位角。例如，在北方，一般在 3~10 月使用，其中以 10 月的太阳高度角最低，所以应用 10 月的太阳高度角和相应的太阳方位角来计算各小时的影长。如果全年使用，则应以 12 月的有关角度数值进行分析计算。

1.4 太阳时

1.4.1 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。1 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，大约需要向前自转 1° 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，从西向东以均匀的速度运行，运行一周后和真太阳同时回到春分点，两者在一年中的形成完全一样，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 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。



1.4.2 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 , 即

$$E = \tau_e - \tau \quad (1-12)$$

式中 E ——时差;

τ_e ——真太阳时;

τ ——平太阳时。

图 1-8 给出了一年中每日的时差及其变化。从图中可见, 平太阳时与真太阳时的差别不大, 一年有四次两者相一致, 最大差值为 16min。

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, 叫作北京时。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:

$$\begin{aligned} \tau &= \text{北京时} - (L_{st} - L_{loc})/15(\text{h}) \\ &= \text{北京时} - 4 \times (120 - L_{loc})(\text{min}) \end{aligned} \quad (1-13)$$

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(1-12)和式(1-13), 则用北京时表示某一经度地区的真太阳时, 可用下式表示:

$$\tau_\theta = \text{北京时} - 4 \times (120 - L_{loc}) + E(\text{min}) \quad (1-14)$$

最后指出, 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。

1.5 太阳辐射

太阳辐射是指从太阳圆球面向宇宙空间发射的电磁波, 从太阳发射出的辐射到达地球约需 8min。太阳辐射的规律和太阳本身的结构密切相关; 同时众所周知, 到达地球上的太阳辐射能量随着季节、时刻、地球纬度的不同而变化, 即取决于太阳与地球的相互空间位置以及它们的运动规律。由上述可知, 太阳并非是一定温度的黑体, 而是有许多层不同波长放射、吸收的辐射体。但是在利用太阳能热辐射系统中, 将太阳看成是一个温度为 5762K, 波长为 $0.3 \sim 3\mu\text{m}$ 的黑色辐射体。

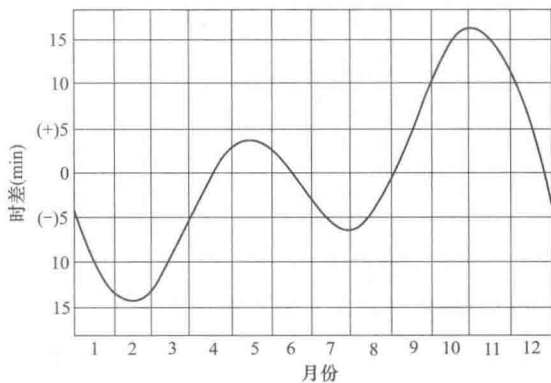


图 1-8 时差 E 在一年中的变化



太阳辐射的计算是太阳能利用的基础，从太阳发射出的电磁波首先到达大气层外，然后进入大气层，并在其中产生衰减，最后穿过大气层形成到达地表的太阳直射辐射和散射辐射，其共同构成了到达地表的总太阳辐射。下面我们就从太阳辐射到达地表的途径逐一进行分析，最终得出到达地表的太阳辐射的计算方法和公式。

1.5.1 大气层外的太阳辐射

(1) 太阳常数。图 1-1 示意了日地间的几何关系。地球轨道的偏心率，以日地距离的变化来计算，不超过±3%。太阳本身的特征以及它与地球之间的空间关系，使地球大气层上界的太阳辐照度几乎是一个定值，太阳常数的定义因此而来，太阳常数通常用 I_{SG} 表示，其定义为：在平均日地距离时，在地球大气层外，垂直于太阳辐射的表面上，在单位面积上和单位时间内所接受到的太阳辐射能，叫作太阳常数。

19 世纪中期，就曾进行过在地球表面上确定太阳常数 I_{SG} 的实验，但是不同的研究学者得到的数据值极其不一致，差别达到了一倍甚至更大；只是到了 20 世纪初， I_{SG} 的差别才减少到±10%；20 世纪 60 年代，计算 I_{SG} 的差别已经被控制在±3%以内。引起差别的主要原因是缺乏标准的热量单位，另外，每个研究者的仪表的刻度不一致。因此，这方面研究的进展，只能在建立了统一的辐射标准之后。1956 年建立了国际辐射标准。1977 年，国际辐射委员会 (WRC) 建议将 I_{SG} 定为 $1384\text{W}/\text{m}^2$ 。

根据从高空飞机、气球、火箭以及卫星上利用绝对法或者相对法测量的结果，可以更准确地确定 I_{SG} 的值。根据美国国家航空与宇宙航行局 (NASA) 在人造卫星上的观测结果，由塞克凯拉 (Thekaekara) 和德拉蒙德 (Drummond) 于 1971 年将观测结果总结整理后提出 I_{SG} 的值为 $1353\text{W}/\text{m}^2$ ，并且给出了光谱分布。他们提出的数据已经被人们广泛地采用。

在 20 世纪 80 年代末，世界辐射计量标准 (WRR) 正式采用太阳常数 I_{SG} 的值为 $1370 \pm 6\text{W}/\text{m}^2$ 。

由于日地距离在一年当中是变化的，因此太阳常数也随之发生变化。1 月初，地球经过轨道上离太阳最近的点，也称为近日点。4 月初和 10 月初，地球在日地平均距离处。7 月初，地球经过轨道上离太阳最远的点，该点称为远日点。由表 1-1 可得，最近与最远的距离之差仅为 3.4%，因为到达地球大气上层的太阳辐照度与距离的平方成反比，所以，地球在近日点和远日点时的太阳辐照度变化为 6.7%。各月份的太阳常数数值列于表 1-2 中。

表 1-2 各月份的太阳常数数值 I_{SG} kcal/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I_{SG}	1208	1200	1185	1165	1148	1133	1126	1132	1145	1162	1181	1198

注 $1\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) = 1.163\text{W}/\text{m}^2$

应当指出，表中所列出的数据只是月平均值，实际上大气层外太阳常数在一年中随时间的变化是连续的。但是，在计算日照量时，只要按照表中的月平均值进行计算即可。

(2) 到达大气层上界的太阳辐射。大气层上界水平面上的太阳辐射日总量 H_0 可以由下式进行计算：

$$H_0 = \frac{24}{\pi} \gamma I_{SG} (\omega_{\theta} \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega_{\theta}) \quad (1-15)$$

式中 I_{SG} ——太阳常数；
 ω_{θ} ——日出日没时角；



φ ——当地纬度；

δ ——太阳赤纬；

γ ——日地距离变化所引起的大气层上界太阳辐照度的修正值。

$$\gamma = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \quad (1-16)$$

式中 n ——距离1月1日天数。

在赤道地区，一年内任何时间均为 $\omega_0 = \frac{\pi}{2}$ ， $\varphi = 0$ ，式可简化为

$$H_{0,E} = \frac{24}{\pi} \gamma I_{SG} \cos\delta \quad (1-17)$$

式中下标 E 表示赤道地区。

在极地（北极或南极）， $\varphi = \frac{\pi}{2}$ 。对于北极的夏季（南极的冬季）则为 $\omega_0 = \pi$ ，由式 (1-17) 可得：

$$H_{0,P} = 24 \gamma I_{SG} \sin\delta \quad (1-18)$$

式中下标 P 表示极地。

用式 (1-15) 可以计算任何纬度和各个季节的大气层上界水平面上的太阳辐射日总量。

1.5.2 到达地表的太阳直射辐射

对于太阳能应用来说，最关心的是到达地球表面的太阳能数值，下面讨论穿过大气层到达地表的太阳辐射的计算。如上所述，由于太阳辐射穿过大气时被吸收和散射，故到达地球表面的太阳辐射就包括直射和散射两部分。

太阳辐射在通过大气层时会产生一定的衰减，表示这种衰减程度的一个重要参数就是大气透明度。因此，首先说明大气透明度的概念和计算。

(1) 大气透明度。根据布克-兰贝特定律，波长为 λ 的太阳辐射 $I_{\lambda,n}$ ，经过厚度为 dm 的大气层后，辐射衰减为

$$dI_{\lambda,n} = -C_{\lambda} I_{\lambda,n} dm \quad (1-19)$$

将式 (1-19) 积分得

$$I_{\lambda,n} = I_{\lambda,0} e^{-C_{\lambda} m} \quad (1-20)$$

式中 $I_{\lambda,n}$ ——到达地表的法向太阳辐射光谱强度；

$I_{\lambda,0}$ ——大气层上界的太阳辐射光谱强度；

C_{λ} ——大气的消光系数；

m ——大气质量。

将式 (1-20) 写成

$$I_{\lambda,n} = I_{\lambda,0} P_{\lambda}^m \quad (1-21)$$

式中 $P_{\lambda} = e^{-C_{\lambda}}$ ，叫作单色光谱透明度。

将式 (1-21) 从波长 0 到波长 ∞ 的整个波段内积分就可以得到全色太阳辐射能 I_n ：

$$I_n = \int_0^{\infty} I_{\lambda,0} P_{\lambda}^m d\lambda \quad (1-22)$$

采用整个太阳辐射光谱范围内的单色透明度的平均值——复合透明度 P_m ，上式积分后为



$$I_n = \gamma I_{SG} P_m^m \quad (1-23)$$

或
$$P_m = \sqrt[m]{\frac{I_n}{\gamma I_{SG}}} \quad (1-24)$$

式中 P_m ——大气复合透明度；
 γ ——日-地距离修正值。

表 1-3 由 I_n (cal/[cal/(cm²·min)]) 求 P_2 值

I_n	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.60	0.550	0.555	0.560	0.564	0.569	0.573	0.577	0.582	0.586	0.590
0.70	0.595	0.599	0.603	0.607	0.611	0.615	0.620	0.624	0.628	0.632
0.80	0.636	0.640	0.644	0.647	0.651	0.655	0.659	0.663	0.667	0.670
0.90	0.674	0.678	0.682	0.685	0.689	0.693	0.696	0.700	0.704	0.707
1.00	0.711	0.714	0.718	0.721	0.725	0.728	0.732	0.735	0.739	0.742
1.10	0.746	0.749	0.752	0.755	0.759	0.762	0.765	0.769	0.772	0.775
1.20	0.778	0.782	0.785	0.788	0.791	0.795	0.798	0.801	0.804	0.807
1.30	0.810	0.813	0.816	0.820	0.823	0.826	0.829	0.832	0.835	0.838
1.40	0.841	0.844	0.847	0.850	0.853	0.856	0.859	0.862	0.865	0.867
1.50	0.870	0.873	0.876	0.879	0.887	0.885	0.888	0.890	0.893	0.896
1.60	0.899	0.902	0.905	0.907	0.910	0.913	0.916	0.918	0.921	0.924

根据日射观测资料发现，复合透明度 P_m 与大气质量 m 有明显关系。为了比较不同大气质量情况下的大气透明度值，必须把大气透明度修正到某一给定的大气质量。例如，将大气质量 m 的大气透明度 P_m 值订正到大气质量为 2 的大气透明度 P_2 （一般来说，此订正值比较合适）。目前有已经编制出的大气透明度换算表可以用来订正（西夫科夫编制）。

当 I_n 订正到 $m=2$ 的数值时，则可用 I_n 从表 1-3 中求得 P_2 值。

由 I_n [cal/(cm²·min)] 求 P_2 值见表 1-3。

大气透明度随地区、季节、时刻而变化。一般来说，城市比农村低。一年中，以夏季最低，这是由于大气中水蒸气增加所致。一天中 P 值的变化可用下式计算：

$$P = P_0 + \alpha (\tau - 12)^2 \times 10^{-4} \quad (1-25)$$

式中 τ ——时间（例如上午 8 时 $\tau=8$ ）；

P_0 、 α ——在各地是不同的，其具体数值可以有专用的手册查得。

(2) 到达地表的法向太阳直射辐射的计算。确定大气透明度后，就可以利用它来计算到达地球表面的法线方向的太阳辐射直接辐照度。

当 P_m 值订正到 $m=2$ 时，式 (1-23) 可以改写为

$$I_n = \gamma I_{SG} P_2^m \quad (1-26)$$

式中 γ ——日-地距离修正值；

P_2 ——订正到 $m=2$ 时的 P_m 值。

式 (1-26) 是用于计算到达地表法向太阳直射辐射的常用公式之一。

(3) 水平面上的太阳直射辐照度以及日总量的计算。到达地表水平面上太阳直射辐照度与垂直于太阳光线的表面上的直射辐照度的关系如图 1-9 所示，图中 AB 代表水平面，AC 代表垂直

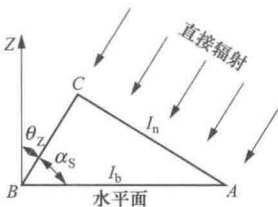


图 1-9 太阳直接辐照度与太阳高度角的关系