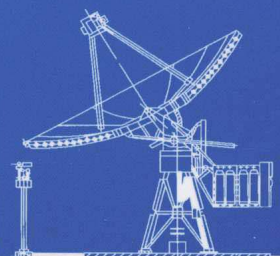


李明 季旭◎编著

槽式聚光太阳能系统的热电能量转换与利用

CAOSHI JUGUANG TAIYANGNENG XITONG DE
REDIAN NENGLIANG ZHUANHUAN YU LIYONG



科学出版社

槽式聚光太阳能系统的 热电能量转换与利用

李 明 季 旭 编著

科学出版社

北 京

内 容 提 要

本书通过对槽式聚光作用太阳能光电热耦合机理研究,探寻聚光作用下光-电、电-热、光-热三者之间彼此存在的科学联系、转换规律及最佳耦合模式,为太阳辐射能量的合理转换与高温利用提供了科学理论及实验基础。内容主要包括:太阳辐射的计算,相关的传热计算,槽式聚光下太阳能电池电性能与加热集热器的实验研究,槽式聚光热联供系统、热电系统性能研究,最后对槽式聚光太阳能热电联供系统经济性能进行了评价和展望。

本书可供从事太阳能光伏发电与可再生能源领域研究的科技人员和管理人员阅读,也可作为高等院校相关专业的教师与学生的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

槽式聚光太阳能系统的热电能量转换与利用 /李明,
季旭编著. —北京:科学出版社, 2011.2
ISBN 978-7-03-030011-9

I. ①槽… II. ①李… ②季… III. ①太阳能-能量转
换 ②太阳能-利用 IV. ①TK511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 007698 号

责任编辑:杨 岭 韩卫军 莫永国 / 封面设计:四川胜翔

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码 100717
<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年2月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2011年2月第一次印刷 印张: 15 1/2

印数: 1—1 200 字数: 400 000

定价: 52.00 元

前 言

能源是国民经济的命脉，能源与人民生活和人类的生存环境休戚相关，在社会可持续发展中起着举足轻重的作用。由于大量燃烧矿物能源，造成了全球性的环境污染和生态破坏，引发了人类对可再生能源利用的高度重视。世界各国纷纷加大人力、物力投入，调整优化能源结构，以期减少燃料废弃物排放、节能环保，达到人与自然协调发展。在各种能源中，太阳每年投射到地球表面的能量约相当于目前全世界总耗电量的 1.3 万倍，太阳能清洁、无污染、利用范围广、不受国域、地域限制等优点，在可再生能源利用中占据非常重要的地位。

我国于 2006 年实施的“可再生能源法”，有效促进了可再生能源的开发利用。近年来，国家积极推行了太阳能光伏与建筑结合、金太阳工程、可再生能源建筑应用城镇示范、家电下乡等一系列政策，有力推动了太阳能利用的发展。2008 年 3 月 18 日，国家发展和改革委员会发布了《可再生能源发展“十一五”规划》，规划中提出：到 2010 年，中国可再生能源在能源消费中的比重将达到 10%，可再生能源年利用量达到 3 亿吨标准煤，比 2005 年增长近 1 倍；太阳能发电总装机容量将达到 30 万千瓦时，太阳能热水器总集热面积将达到 1.5 亿平方米，太阳能热水器装备产业的国内制造能力达到较强的国际竞争力，具备太阳能光伏发电多晶硅材料的生产能力。目前，我国太阳能热水器保有量、太阳电池生产总量均居世界首位，不但在实现国家节能减排战略目标中发挥着积极作用，而且在人民群众生产生活中亦占据越来越重要的位置。

太阳能利用按其不同方式基本可分为太阳能热利用、太阳能光伏发电、太阳能储存与转换利用三大类。太阳能热利用包括以低温利用为主的太阳能热水系统、太阳能干燥、太阳能海水淡化、太阳能制冷、太阳能采暖及以中高温利用为主的太阳能热发电；太阳能光伏发电在太阳能独立发电系统、太阳能并网发电及利用太阳电池进行电力供给的器件等方面具有广泛应用；太阳能储存与

转换利用则致力于解决太阳能供给的稳定性与持续性，常与太阳能热利用及太阳能光伏发电相结合。目前太阳能低温热利用技术日趋成熟，向着更为经济的方向发展，太阳能中高温热发电技术处于典型工程示范、不断发展完善的阶段。太阳能光伏发电在电池材料研究、太阳电池制造技术、工艺创新、系统集成、并网发电等方面不断取得进步，正朝降低成本、规模化利用的方向迈进。为提高太阳能转换综合利用率，将太阳能光热利用与光伏利用相结合是一个重要途径。本书内容正是反映采用槽式聚光集热装置提高太阳辐射能流密度作用于太阳电池对外发电，同时回收电池热量实现供热，为实现太阳能高效利用而开展的相关研究工作。

本书前三章内容是传统意义上对太阳能利用所涉及的太阳能辐射资源及相关理论、太阳能热利用、太阳能光伏发电的基础知识介绍，第四章是太阳能光伏光热利用等相关内容的介绍，第五章至第九章则是本课题组利用槽式聚光集热装置进行太阳能热电联供研究所涉及的相关理论研究及实验研究工作的介绍。本课题组研究生魏生贤、徐永锋、王云峰、项明、李国良等长期研究积累及辛勤实验工作是本书内容的重要来源，而课题组全体人员长期研究工作的积累则是本书得以顺利出版的关键。书中不妥之处敬请读者提出宝贵意见，不吝赐教。

作者衷心感谢国家高技术发展计划（“863”计划）、国家自然科学基金、教育部长江学者和创新团队发展计划、云南省科技发展专项计划等的支持。最后，作者深深感谢为本书出版做出贡献的所有人们。

李 明 季 旭

2010年11月于云南师范大学

目 录

第一章 太阳能资源、辐射及传热理论	1
1.1 太阳能资源	1
1.1.1 世界能源状况及太阳能开发利用的意义	1
1.1.2 我国太阳能资源	2
1.2 太阳辐射	3
1.2.1 地球绕太阳运行的规律	3
1.2.2 标准晴天直接辐射量的计算模型	7
1.3 相关的传热计算问题	13
1.3.1 导热	13
1.3.2 对流换热	17
1.3.3 辐射换热	20
参考文献	26
第二章 太阳能光热利用	27
2.1 太阳能干燥	27
2.1.1 干燥原理	28
2.1.2 太阳能干燥装置	29
2.1.3 太阳能干燥的实际应用	31
2.2 太阳能热水器	35
2.2.1 平板型太阳能集热器	35
2.2.2 全玻璃真空管型太阳能集热器	40
2.2.3 储热水箱	45
2.2.4 太阳能热水系统	46
2.2.5 太阳能集热器能与建筑一体化	52
2.3 太阳灶	52
2.3.1 概述	52
2.3.2 太阳灶的分类	53
2.3.3 太阳灶的工作原理	53
2.4 太阳房	57
2.4.1 太阳房工作原理	57

2.4.2	被动式太阳房	58
2.4.3	主动式太阳房	60
2.4.4	太阳房的建筑设计	61
2.4.5	太阳房的实际应用及前景	63
2.5	太阳能制冷	65
2.5.1	概述	65
2.5.2	太阳能吸收式制冷	66
2.5.3	太阳能吸附式制冷	68
2.5.4	太阳能制冷应用实例	71
2.6	太阳能海水淡化	73
2.6.1	概述	73
2.6.2	太阳能蒸馏器	74
2.6.3	复合式海水淡化装置	76
2.6.4	太阳能海水淡化的实际应用及前景	77
2.7	太阳能热发电	78
2.7.1	火力发电系统	79
2.7.2	槽式太阳能热发电系统	80
2.7.3	塔式太阳能热发电系统	83
2.7.4	碟式太阳能热发电系统	85
	参考文献	87

第三章	太阳能光伏利用	89
3.1	太阳电池的分类	89
3.1.1	按基体材料分类	89
3.1.2	按电池结构分类	90
3.1.3	按采光形式分类	90
3.2	太阳电池的工作原理	90
3.2.1	半导体物理基础	90
3.2.2	太阳电池工作原理	93
3.3	太阳电池的电特性	94
3.3.1	太阳电池的等效电路	94
3.3.2	伏安特性曲线	96
3.3.3	填充因子	96
3.3.4	转换效率	97
3.3.5	电流温度系数和电压温度系数	97
3.4	太阳电池制造工艺	97
3.4.1	硅材料的制备	97
3.4.2	单晶硅的制备	98
3.4.3	多晶硅的制备	98
3.4.4	太阳电池的制造	98

3.5 高效硅太阳电池	100
3.5.1 太阳电池的发展	100
3.5.2 高效硅太阳电池	101
3.6 光伏发电系统	102
3.6.1 光伏发电系统的构成	102
3.6.2 光伏发电系统的分类	103
3.6.3 光伏发电系统的应用	103
参考文献	104
第四章 太阳能光伏光热综合利用	105
4.1 平板式 PV/T 系统	105
4.1.1 平板式 PV/T 系统工作原理	105
4.1.2 国内外研究现状	106
4.1.3 热电联供集热器	106
4.1.4 平板式 PV/T 系统概况	109
4.1.5 平板式 PV/T 示范工程	112
4.2 聚光式 PV/T 系统	113
4.2.1 聚光式 PV/T 系统工作原理	113
4.2.2 国内外研究现状	114
4.2.3 聚光装置	115
4.2.4 聚光式 PV/T 系统示范工程	118
参考文献	119
第五章 槽式聚光太阳能热电系统设计与制作	122
5.1 太阳聚光器	122
5.1.1 聚光器的分类	122
5.1.2 反射器的组成	126
5.1.3 抛物反射镜面	128
5.1.4 槽式反射集热器的聚光比	131
5.1.5 抛物面和抛物线槽式聚光器的数学描述	133
5.1.6 槽式聚光器焦面能流密度分布的测量	138
5.2 太阳跟踪系统	140
5.2.1 跟踪系统的分类	141
5.2.2 跟踪方式的优化组合和设计方案	142
5.2.3 跟踪方法及跟踪方式的选择	145
5.2.4 跟踪系统结构及原理	146
5.2.5 跟踪系统设计	150
5.2.6 跟踪系统改进与提高	151
5.3 接收器的设计与制作	153
5.3.1 直通式金属玻璃真空管	154

5.3.2 光伏/光热利用复合吸收器	154
5.4 性能测试系统	156
5.4.1 聚光光强的测试	156
5.4.2 热性能的测试	156
5.4.3 电性能的测试	157
参考文献	157
第六章 槽式聚光下太阳电池电性能的实验研究	159
6.1 槽式聚光太阳能热电联供系统相关参数	159
6.1.1 2m ² TCPV/T 系统的相关参数	159
6.1.2 10m ² TCPV/T 系统的相关参数	160
6.1.3 实验所用电池相关参数	160
6.2 太阳电池输出特性相关理论方程	161
6.3 2m ² 系统聚光前后太阳电池阵列的输出性能分析	163
6.3.1 聚光前后 4 种不同电池阵列性能	163
6.3.2 光强和温度对太阳电池阵列性能的影响	168
6.4 10m ² 系统聚光前后不同电池阵列性能	183
6.4.1 砷化镓电池阵列性能实验	183
6.4.2 聚光硅电池阵列性能实验	188
6.5 普通光照下不均匀性对空间太阳电池阵列输出特性分析	191
参考文献	196
第七章 槽式聚光集热系统的研究	198
7.1 槽式聚光集热装置数学模型	198
7.1.1 槽式聚光加热全玻璃真空管	198
7.1.2 抛物柱面反射器与无套管圆柱形接收器	200
7.1.3 抛物柱面反射器与金属-玻璃套管吸收体	201
7.2 槽式聚光加热集热器的实验研究	203
7.2.1 玻璃真空管及 CHAPS 管试验	203
7.2.2 真空管、铜管等实验研究	205
参考文献	211
第八章 槽式聚光热电联供系统性能研究	212
8.1 槽式聚光太阳能热电联供系统工作原理与系统结构	212
8.1.1 系统的工作原理	212
8.1.2 系统结构	212
8.2 槽式聚光热电联供系统性能实验	214
8.2.1 2m ² 系统的性能实验	214
8.2.2 10m ² 系统的性能实验	215
8.3 槽式聚光热电联供系统模型	218

8.3.1	辐射传递模型	218
8.3.2	热平衡模型	218
8.3.3	模拟计算系统光电效率的另一形式	219
8.3.4	课题组建立的系统热电性能模型	221
8.4	内部特性与外部特性对系统热电性能的模拟与分析	222
8.4.1	内部特性对系统性能的影响分析	222
8.4.2	外部特性对系统性能的影响分析	225
	参考文献	226
第九章	槽式聚光太阳能热电联供系统经济性能评价	228
9.1	太阳能经济	228
9.1.1	能量偿还	228
9.1.2	经济偿还	228
9.2	经济评价方法	228
9.2.1	综合能源价格法	228
9.2.2	寿命周期法	229
9.2.3	净现值分析	229
9.3	平板式与槽式聚光热电联供系统性能比较	230
9.3.1	平板式光伏系统	230
9.3.2	槽式聚光 PV/T 系统	231
9.3.3	实验结果和性能分析	232
9.4	平板式与槽式聚光热电联供系统经济性分析	234
9.4.1	平板式太阳能 PV 系统的经济性	234
9.4.2	槽式聚光太阳能 PV/T 系统的经济性	235
	参考文献	236

第一章 太阳能资源、辐射及传热理论

1.1 太阳能资源

1.1.1 世界能源状况及太阳能开发利用的意义

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。目前,世界上绝大多数国家都以石油、天然气和煤炭等矿物燃料为主要能源,然而地球上的矿物能源是有限的。据《BP世界能源统计 2009》的数据表明,全球原油剩余探明储量为 1.258 万亿桶(不含加拿大油砂)。按 2008 年的年开采速度计算,原油、天然气和煤炭仅可分别开采 42 年、60 年和 122 年^[1],形势非常严峻。另一方面,地球上化石能源的分布极为不均。美国、欧盟、中国等对能源需求大的国家和地区的能源储量很少;而中东、俄罗斯等地自身对能源需求较少,但储量却占到了全球的 60%以上。随着全球经济的发展、世界人口的剧增和人民生活水平的不断提高,世界能源需求量持续增大,能源短缺的问题将越来越严重,能源分布不均也会带来更严峻的问题。也就是说,煤炭、石油、天然气等资源因不断消耗,储量会越来越少,最终将会耗尽。据国际能源署规划,预计到 2030 年,电力燃料的 60%将由低碳能源提供;其中可再生能源占 37%、核能占 18%、配备了碳捕捉和封存技术的燃煤火电站占 5%。替代能源尤其是可再生能源,不仅将成为不可或缺的重要能源,而且将成为降低温室气体排放的重要举措。能源问题已成为影响未来经济、社会可持续性发展的重要因素;甚至会出现因争夺能源而引发国家之间的战争。

矿物燃料的大量使用,必将向大气排放大量的 CO_2 ,对气候和环境造成巨大的破坏。在过去的 100 年中,全球平均气温上升了 $0.3\sim 0.6^\circ\text{C}$,全球海平面平均上升了 $10\sim 25\text{cm}$ 。如果不对温室气体排放采取减排措施,未来全球平均气温将每十年升高 0.2°C ^[2]。据世界卫生组织于 2006~2008 年间陆续发布的四期全球温室气体公报,大气中主要温室气体二氧化碳、甲烷和氧化亚氮的浓度已经达到了历史最高水平。这势必将进一步加速极地冰川融化,海平面上升、陆地面积缩小、生物物种减少以及人类疾病增多。

开发新能源不仅是解决未来能源短缺的主要途径,也是保护地球环境和人类自身安全的重要举措,目前已成为世界各国的战略发展方向。

美国是世界唯一的超级大国,在技术和资金方面的优势是其他国家不能匹敌的,在新能源领域的投入同样令世界瞩目。奥巴马上任以来,开发新能源、降低对石油的依赖一直是其能源政策的核心,提出了到 2012 年美国电力供应的 10%将来自可再生能源。2008 年,欧盟出台了“气候行动和可再生能源一揽子计划”,将减排目标和可再生能源发展紧密结合。其核心内容为“20-20-20”,目标要求温室气体(GHG)排放量在 2020 年须比 1990 年水平减少 20%,到 2020 年通过提高能源效率降低 20%能源消耗,并增加使用 20%的可再生能源,其中生物质燃料占总燃料消费的比例不低于 10%。早在 20 世纪 70 年代,日本政府就成立了专门机构加强可再生能源及新能源技术研发和推广普及工作。日本

政府特别重视太阳能发电，世界上太阳能发电的许多专利都掌握在日本厂家手中。我国也在 2007 年通过了《可再生能源中长期发展规划》，提出了可再生能源发展的原则和目标，明确指出将进一步加快新能源的开发利用。今后一个时期可再生能源发展的总体目标是：提高可再生能源在能源消费中的比重，解决偏远地区无电人口用电问题和农村生活燃料短缺问题，推行有机废弃物的能源化利用，推进可再生能源技术的产业化发展^[3]。

对于能源的开发应用，人类必须未雨绸缪，尽早寻求新的替代能源。在太阳能、风能、潮汐能、地热能等众多的新能源中，太阳能以其独特的优势成为了最理想的替代能源之一^[4]。

首先，太阳能储量的无限性。

太阳能是取之不尽、用之不竭的可再生能源。地球表面每秒内接收的太阳能为 9.0×10^{16} J，相当于 500 万吨标准煤。而且太阳的寿命，相对于人类历史来说可源源不断供给地球能源的时间相当于是无限的。取之不尽、用之不竭，这就决定了开发利用太阳能将是人类解决常规能源匮乏、枯竭的最有效途径之一。

其次，太阳能存在的普遍性。

虽然地理纬度的不同、气候条件的差异造成了太阳能辐射的不均匀，但相对于其他能源来说，太阳能对于地球上绝大多数地区具有存在的普遍性，可就地取用。这就为常规能源缺乏的国家和地区解决能源问题提供了美好前景。

再者，太阳能利用的清洁性。

太阳能像风能、潮汐能等洁净能源一样，只要合理开发和利用就不会产生废渣、废水、噪音，也不会影响生态环境和平衡，可有效避免使用常规能源时所带来的大气和环境问题。

因此，开发利用太阳能可有效地解决化石能源短缺和分布不均的问题以及燃烧化石能源带来的环境问题，这对于人类社会自身的发展和地球环境的保护都具有深远的战略意义。

1.1.2 我国太阳能资源

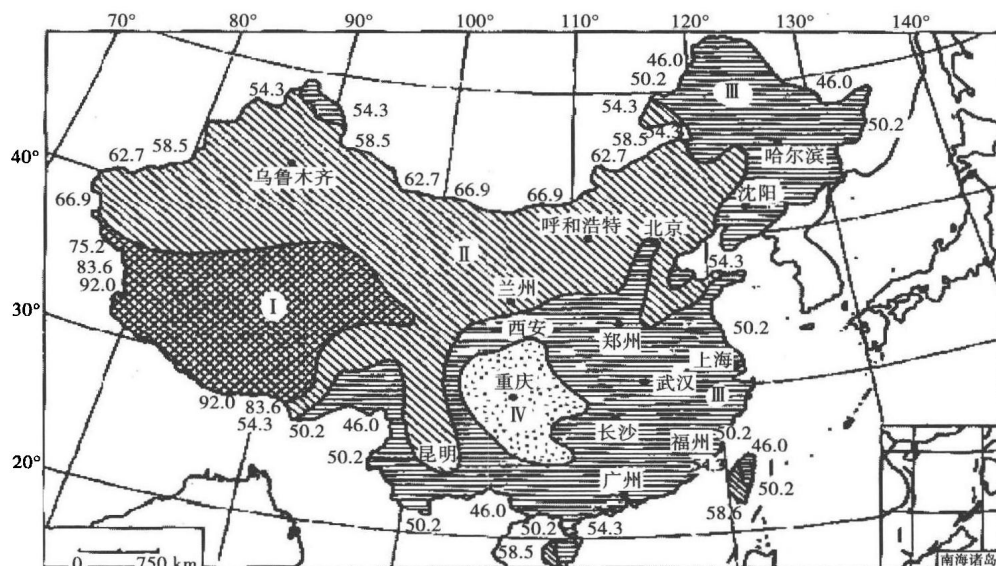
我国地处北半球欧亚大陆的东部，土地辽阔，幅员广大。国土跨度从南至北，自西至东，距离都在 5000km 以上，总面积达 960 万 km^2 ，占世界陆地总面积的 7%，居世界第三位。在我国广阔富饶的土地上，有着十分丰富的太阳能资源。全国陆地表面每年接收的太阳辐射相当于 49 000 亿吨标准煤。如果将这些太阳能全都用于发电，约等于上万个三峡电站的发电量总和。全国各地每年的太阳能总辐射量为 $3340 \sim 8400 \text{ MJ/m}^2$ ，中值为 5852 MJ/m^2 。

我国太阳能资源丰富和比较丰富的 I、II、III 类地区，年日照时数大于 2200h，太阳辐射总量高于 5016 MJ/m^2 ，面积约占全国总面积的 2/3 以上，见表 1-1 及图 1-1。其中尤其以西藏地区最大，平均海拔 4000m 以上，大气层薄而清洁，透明度好，纬度低，日照时间长。以“日光城”拉萨为例，其年均日照时间为 3005.7h，相对日照达 68%，年平均晴天 108.5 天，阴天 98.8 天，太阳总辐射为 8160 MJ/m^2 。而四川和贵州一带的太阳辐射总量最小，以“雾都”重庆为例，其年平均日照时间为 1152.2 小时，相对日照仅为 26%，年平均晴天 24.7 天，阴天 244.6 天。我国太阳能资源的分布特点是：太阳辐射的高值中心和低值中心都处在北纬 $22^\circ \sim 35^\circ$ 之间，即青藏高原和四川盆地。太阳年辐射总量，同经度上，北方大于南方（新疆和西藏例外）；同纬度上，西部大于东部（四川盆地例外）。我国不同太阳能资源等级的水平面上年太阳辐射照量、年日照时数及主要代表地区见表 1-1 和

图 1-1^[2]。

表 1-1 中国太阳能资源区划

等级	太阳能条件	年太阳辐照量 /MJ/ (m ² · a)	年日照时数 /h	主要代表地区
I	资源丰富区	>6700	3200~3300	宁夏北、甘肃西、新疆东南、青海西、西藏西
II	资源较富区	5400~6700	3000~3200	冀西北、京津晋北、内蒙及宁夏南、甘肃中东、青海东、西藏南、新疆南
III	资源一般区	5000~5400	2200~3000	鲁豫冀东南、晋南、新疆北、吉林、辽宁、云南、陕北、甘肃东南、粤南
		4200~5000	1400~2200	湘、桂、赣、江、浙、沪、皖、鄂、闽北、粤北、陕南、黑龙江
IV	资源贫乏区	<4200	1000~1400	川、黔、渝

图 1-1 我国的太阳能资源分布图 $[100\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$

1.2 太阳辐射

设计槽式聚光热电联供系统时，须明确太阳的运行轨迹才能做到跟踪系统追踪太阳，使槽式聚光镜面始终与太阳光线垂直，达到较好接收效果。在计算系统全年的发电及产热总量时，又须确定达到聚光镜面上太阳辐射量的大小（单位时间、单位面积上有多少太阳能）。这些均与地球绕太阳运动的规律，与太阳辐射的性质和大气气候条件紧密有关。因此，本节从太阳和地球间的关系入手，讨论太阳的运行规律、太阳辐射量的计算等内容。

1.2.1 地球绕太阳运行的规律^[2]

1.2.1.1 地球公转与赤纬

贯穿地球中心与南北极相连的线称为地轴。地球除了围绕地轴自转外，还在椭圆形轨

道上围绕太阳公转，运行周期为一年。椭圆的偏心率不大，1月1日近日点时，日地距离为 $147.1 \times 10^6 \text{ km}$ ，比日地平均距离短 1.7%；7月1日远日点时为 $152.1 \times 10^6 \text{ km}$ ，比日地平均距离长 1.7%；4月初和10月初，地球和太阳的距离为日地平均距离，等于 $149.5 \times 10^6 \text{ km}$ 。由于到达地球表面太阳辐射强度与距离的平方成反比，它所引起太阳辐射能量的变化为年平均值的 $\pm 3.5\%$ 之内。地球自转轴与椭圆轨道平面（称黄道平面）的夹角为 $66^\circ 33'$ 。在空间的方向始终不变，总是指向北极，因而赤道平面与黄道平面的夹角为 $23^\circ 27'$ 。但是，地心与太阳中心的连线（即午时太阳光线）与地球赤道平面的夹角是一个以一年为周期变化的量，它的变化范围为 $\pm 23^\circ 27'$ ，这个角就是太阳赤纬，用 δ 表示。赤纬角是地球绕日运行规律造成的特殊现象。致使处于黄道平面不同位置上的地球接收到的太阳光线方向也不同，从而形成四季的变化。

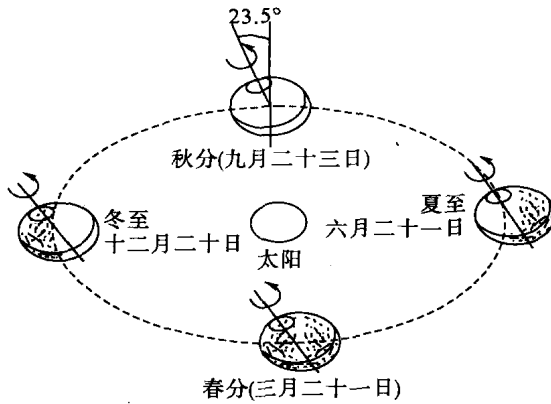


图 1-2 地球绕太阳运行示意图

图 1-2 是地球绕太阳运行的四个典型季节日的地球公转的行程图。北半球夏至（6月21日）即南半球冬至，太阳光线正射北回归线 $\delta = 23^\circ 27'$ ；北半球冬至（12月22日）即南半球夏至，太阳光线正射南回归线 $\delta = -23^\circ 27'$ ；春分及秋分太阳正射赤道， $\delta = 0$ ，地球南北半球日夜相等。每天的赤纬角可由库珀（Cooper）方程计算：

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

式中， n 为日序，即所求日在一年中的日子数，如春分， $n = 81$ ，则 $\delta = 0$ ，自春分日起的第 d 天的太阳赤纬为：

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

1.2.1.2 地球自转与太阳时

地球始终绕着地轴由西向东在自转。对于地球上的观察者来说，太阳就是每天清晨从东方升起，傍晚由西落下。地球自转一周（ 360° ）为一昼夜（ $24h$ ）。显而易见，若时间用角度来表示，一小时就相当于地球自转了 15° 。

在地球表面的任意地方，要掌握太阳在当地天空中随时间变化的运动规律，需通过真实太阳时来进行推导。真实太阳时与太阳在当地天空中的位置有关，其特点是午时（中午12点）阳光正好通过当地子午线，即在空中最高处。这与日常使用的标准时间并不一致，两者的转换公式如下：

$$\text{太阳时} = \text{标准时间} + E \pm 4(L_{st} - L_{loc}) \quad (1-3)$$

式中, L_{st} 为制定标准时间采用的标准经度; L_{loc} 为当地经度。当所处地点在东半球取负号, 西半球取正号。

中国以北京时为标准时间, 北京的经度为东经 120° , 全国所有地区都处于东半球, 则上式成为

$$\text{太阳时} = \text{北京时} + E - 4(120 - L_{loc}) \quad (1-4)$$

上式中有两项修正, 第一项 E 是地球绕日公转时进动和转速变化而产生的修正, 时差 E 以分为单位, 按下式计算:

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (1-5)$$

$$B = 360(n - 81)/364 \quad (1-6)$$

式中, 时差 E 也可用图 1-3 查出。

第二项是所在地区的经度 L_{loc} 与制定标准时间的经度 (我国定位东经 120°) 之差所产生的时间修正。由于一小时地球转动了 15° , 那么经度每相差 1 度, 在时间上就是 4min, 因此第二项修正项乘了 4, 表示每偏差一度时间差 4min。

太阳时可用角度表示, 其角度称为太阳时角, 以 ω 表示。它是以一个昼夜为变化周期的量, 取中午 12 点为零度, 上午取负值, 下午取正值。每昼夜变化为 $\pm 180^\circ$, 每小时相当于 15° , 如上午 11 点相当于 $\omega = -15^\circ$; 下午四点, $\omega = 60^\circ$ 。

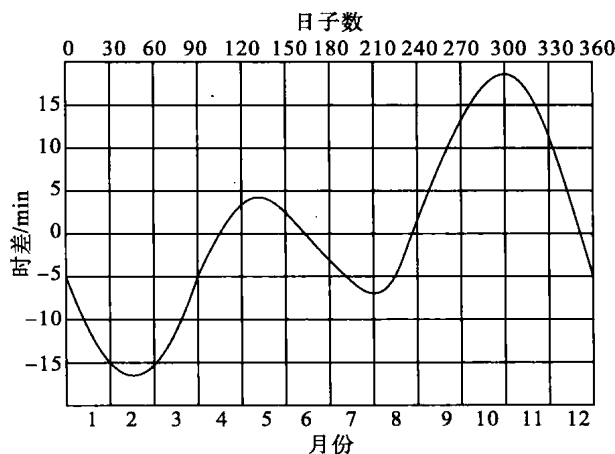


图 1-3 时差曲线

1.2.1.3 太阳角的计算

1. 有关角的定义

如图 1-4 所示, 指向太阳的入射光线与天顶的夹角定义为天顶角, 用 θ_z 表示。入射光线与水平面的夹角定义为太阳高度角, 用 α 表示。入射光线在地面上的投影线与南北水平方向线之间的夹角定义为太阳方位角, 用 γ_s 表示。对太阳方位角, 规定正南方为零度, 向西为正, 向东为负, 变化范围是 $\pm 180^\circ$ 。

与太阳方位角 γ_s 相类似, 集热器表面法线在地平面上也有一投影, 此投影线与正南方的夹角称为集热器的方位角, 用 γ 表示, 度量方法与太阳方位角相同; 集热器平面与水平面的夹角称为集热器的倾斜角, 用 β 表示。

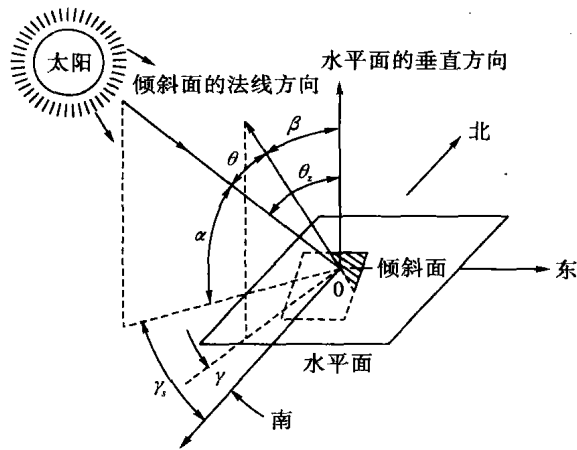


图 1-4 有关几何角度

2. 角度之间的关系

(1) 太阳高度角

计算太阳高度角的表达式为：

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (1-7)$$

式中， φ 为地理纬度。

正午时， $\omega = 0$ ， $\cos \omega = 1$ ，则由式 (1-7) 简化为：

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \delta \cos \varphi = \cos(\varphi - \delta) \quad (1-8)$$

若 $\varphi = \delta$ ，则太阳高度角 $\alpha = 90^\circ$ 。这说明，最大的太阳辐射发生在纬度刚好等于该日太阳赤纬角地区的正午时刻。

(2) 太阳方位角

太阳方位角按下式计算：

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \alpha \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \varphi} \quad (1-9)$$

也可用下式计算：

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \omega \cos \delta}{\cos \alpha} \quad (1-10)$$

根据地理纬度、太阳赤纬及观测时间，利用式 (1-9) 或 (1-10) 即可求出任何地区、任何季节、某一时刻的太阳方位角。

(3) 太阳入射角

对于计算集热器表面辐射量来说，最重要的是确定入射角 θ ，可由下式计算：

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) \\ & + \cos \delta \cos \omega (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (1-11)$$

式中， φ 为集热器所处的纬度。

(4) 日照时间

太阳在地平线的出没瞬间，其太阳高度角 $\alpha = 0$ 。若不考虑地表面曲率及大气折射的影响，根据式 (1-7)，可得到日出日没时角表达式：

$$\cos \omega_\theta = -\tan \varphi \tan \delta \quad (1-12)$$

式中, ω_θ 为日出或日没时间, 以度表示, 正为日没时角; 负为日出时角。对于北半球, 当 $-1 \leq -\tan\varphi \tan\delta \leq +1$, 解式 (1-11), 有:

$$\omega = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (1-13)$$

因为 $\cos\omega_\theta = \cos(-\omega_\theta)$, 所以 $\omega_{\theta\text{出}}$ 为 $-\omega_\theta$, 而 $\omega_{\theta\text{没}}$ 为 ω_θ 。求出时角 ω_θ 后, 日出日没时间用 $t = \omega/15^\circ$ (小时) 求出。一天中可能的日照时间由下式给出:

$$N = 2\arccos(-\tan\varphi \tan\delta)/15 \quad (1-14)$$

1.2.2 标准晴天直接辐射量的计算模型

1.2.2.1 太阳常数

太阳以连续不断的形式向宇宙空间辐射不同波长的能量。但这个量并非是一恒定值, 因此可将其分为常定辐射和异常辐射。常定辐射约占太阳辐射总能量的 90%, 包括可见光部分、近紫外部分和近红外部分。太阳本身是活动着的, 其能量也在波动式地变化。不过常定辐射的能量随着太阳活动的变化甚微。据测量, 在太阳活动峰值年仅比太阳活动宁静年增大 2.5%。太阳异常辐射包括太阳电磁辐射中的无线电波段部分、紫外线波段部分和微粒子流部分, 这些部分的能量随太阳活动的变化而剧烈地变化着。如紫外线的强度随太阳活动的变化在几十至几百倍之间; 微粒子流的变化则更大。另外, 地球还接收从宇宙空间其他星体辐射来的能量, 但仅占太阳辐射能的 10^{-8} , 可忽略不计。由此可知到达地球大气层顶部的太阳辐射总量也是变化的。由于需要一个辐射基准作为参考, 就采用了太阳常数作为世界各国公用参数。太阳常数 G_{sc} 是表征到达地球大气层顶部的太阳辐射量的数值, 定义为地球位于日地平均距离处, 在大气层上界垂直于太阳辐射束平面上形成的太阳辐照度。1971 年测得这个值是 1353 W/m^2 , 随后资料大多采用此值^[5]。

太阳常数虽为定值, 实际上大气层外的太阳辐射强度随着月份的改变而变化。可由图 1-5 确定。

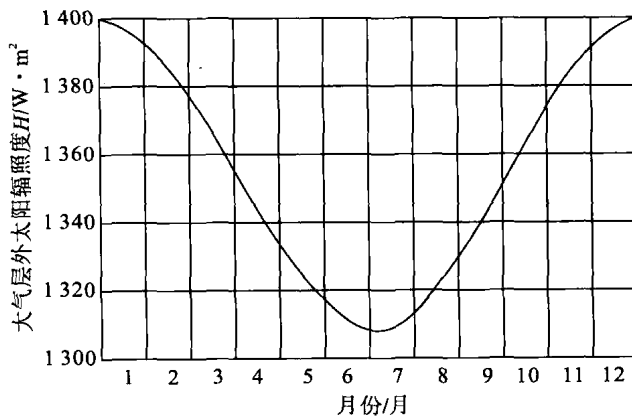


图 1-5 大气层外太阳辐照度与月份的关系

式 (1-15) 中的 G_{on} 是一年中第 n 天在法向平面上测得的大气层外的辐照度, $G_{on} = G_{sc} (1 + 0.033 \cos 360n/365)$ 。

1.2.2.2 大气层外水平面的太阳辐射

本小节讨论射到大气层外 (假设不存在大气的外层空间) 地球水平面上的太阳辐射量, 以便说明大气对太阳辐射的减弱。