

TAIYANGNENG ZHILENG

太阳能制冷

■ 王如竹 代彦军 编著 ■



化学工业出版社

TAIYANGNENG ZHILENG

太阳能制冷

■ 王如竹 代彦军 编著 ■



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能制冷/王如竹,代彦军编著. —北京:化学工业出版社,2006.8

ISBN 7-5025-9317-9

I. 太… II. ①王…②代… III. 太阳能制冷 IV. TK511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 104138 号

太阳能制冷

王如竹 代彦军 编著

责任编辑:郑叶琳

文字编辑:余纪军

责任校对:蒋宇

封面设计:胡艳玮

*

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

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市万龙印装有限公司装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 23½ 字数 445 千字

2007年1月第1版 2007年1月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-9317-9

定 价:49.00 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

太阳能是各种可再生能源中最重要的基本能源，生物质能、风能、海洋能、水力能等都来自太阳能，广义地说，太阳能包含以上各种可再生能源。太阳能作为可再生能源的一种，则是指太阳能的直接转化和利用。大规模利用太阳能是世界各国政府和学者都十分重视的热门课题。我国已经把太阳能利用作为后续能源战略中可再生能源的重要组成部分，并出台了一系列的政策指导性文件鼓励和支持太阳能转化研究和应用事业的发展。2006年实施的“可再生能源法”则进一步推进了太阳能利用的研究开发和应用，太阳能建筑一体化已经成为太阳能利用的主要关键词。

20世纪90年代以来联合国召开了一系列有各国领导人参加的高峰会议，讨论和制定世界太阳能战略规划、国际太阳能公约，设立国际太阳能基金等，推动全球太阳能和可再生能源的开发利用。开发利用太阳能和可再生能源成为国际社会的一大主题和共同行动，成为各国制定可持续发展战略的重要内容。自“六五”以来我国政府一直把研究开发太阳能和可再生能源技术列入国家科技攻关计划，大大推动了我国太阳能和可再生能源技术和产业的发展。

按照太阳能利用不同途径，太阳能利用技术可分为太阳能热利用、太阳能光利用、太阳能储存与转换利用三大类。以上各种技术中，太阳能光热利用技术相对发展最为成熟，各类太阳能集热器、太阳能热水系统、被动式和主动式太阳房、太阳能干燥技术等在我国和世界上许多地区得到了应用。就太阳能光热利用技术而言，目前热点主要集中在太阳能建筑一体化、太阳能热发电、基于太阳能热利用的复合能量系统（供热水、采暖、空调制冷、强化自然通风）以及海水淡化与苦咸水处理、干燥等方面。就太阳能热水器而言，据国家太阳能热利用专业委员会统计，截至2005年，中国太阳能集热器总保有量达到7500万平方米，覆盖约4000万家庭的1.5亿人口。2005年推广量达到1500万平方米，比欧美10年的总和还多。我国太阳能热水器年生产能力1500万平方米，居世界第一。

但是太阳能热利用与季节并不是很匹配，冬季寒冷需要太阳能时太阳能辐射强度往往不够高，而夏季天气炎热时太阳能辐射强度则很高，此时对热水的需求则很少。好的太阳能热利用系统不仅要考虑冬季采暖、四季供应热水，更要考虑太阳能的夏季应用问题。太阳能空调制冷显然是夏季太阳能有效利用的最佳方案，太阳能建筑一体化系统可以成为建筑物空调系统的热源，太阳能热系统与热

驱动制冷机结合就可以构建真正的太阳能空调系统。利用太阳能的辐射热，我们还可以直接制冰。

本书结合国内外太阳能制冷空调的研究进展以及作者在近 10 年以来的研究实践，就太阳能制冷空调的几种形式做了详细介绍和分析，具体内容有：太阳能吸收式制冷（溴化锂-水，水-氨），太阳能吸附式制冷（物理吸附与化学吸附多种吸附制冷工作对），太阳能热驱动的除湿蒸发冷却空调，太阳能驱动的蒸气喷射制冷和太阳能半导体制冷等。针对各种制冷方式的不同，书中详细叙述了各自制冷方式的工作原理、设计方法及其性能评价。由于本书主要涉及太阳能热利用，因此书中还介绍了太阳能热利用基础，并介绍了太阳能热泵。

到目前为止，我国尚无太阳能制冷方面的专著，国际上也只有 A. A. Saiyh 组织编写的 *Solar Air Conditioning and Refrigeration* 论文集和国际制冷学会组织专家完成的 *Solar refrigeration* 手册二本参考书。本书的工作期望能对太阳能空调制冷做一个很好的总结，其中很多工作是作者本人及其研究队伍的研究心得。期望本书的出版能推动我国在太阳能空调制冷方面的研究和产品开发，形成更多的太阳能复合能量系统，为我国可再生能源利用事业做出微薄贡献。

本书编写的内容有很多来自于作者所指导的博士生导师研究论文，李明、王德昌、罗会龙、翟晓强、旷玉辉等的出色工作为本书提供了很好的素材。很高兴的是他们都已经踏上了工作岗位，继续从事阳光事业。作者所指导的在读的博士生韩延民、翟辉、付剑波、葛天舒、熊珍琴等则在继续进行太阳能空调制冷的研究工作，他们为本书的编写工作做出了积极的贡献。

上海交通大学太阳能制冷的研究工作长期得到中国太阳能热利用权威清华大学殷志强教授的支持和鼓励，他的精神鼓励和扶持给我们以动力。教育部太阳能发电及制冷工程研究中心的成立则推动了我们对太阳能综合高效利用的深入研究和产品研发。

回顾我们的太阳能制冷研究，我们不得不感谢华南理工大学华贲教授和清华大学过增元院士，他们作为首席科学家把我们带进了国家 973 项目——太阳能建筑物复合能量系统成为了 973 项目的重要内容。我们的研究中还得益于国家自然科学基金委杰出青年科学基金、上海市科学技术委员会重大项目以及国家“十五”攻关项目的支持。上海市生态建筑集成和示范重大项目——太阳能复合能量系统和国家“十五”攻关项目——太阳能低温贮粮研究为我们的太阳能空调工程应用提供了舞台。

作者在此深深感谢为《太阳能制冷》一书出版做出直接和间接贡献的人们。

王如竹 代彦军
2006 年 11 月

目 录

第 1 章 太阳能热利用基础	1
1.1 太阳辐射	1
1.1.1 太阳概貌	1
1.1.2 地球的运动规律	3
1.1.3 天球坐标系	5
1.1.4 太阳角的计算	6
1.1.5 倾斜面上的太阳光线入射角	8
1.1.6 太阳的跟踪	9
1.2 太阳能的热计算.....	10
1.2.1 大气层外的太阳辐射.....	10
1.2.2 太阳辐射在大气中的衰减.....	12
1.2.3 到达地表的太阳直射辐射.....	15
1.2.4 散射辐射.....	18
1.2.5 太阳的总辐射.....	20
1.3 太阳能资源.....	20
1.3.1 太阳能资源综述.....	20
1.3.2 我国的太阳能资源.....	20
1.4 太阳能热利用方式.....	22
1.4.1 太阳能热水系统.....	23
1.4.2 太阳灶.....	24
1.4.3 太阳房.....	26
1.4.4 太阳能空调系统.....	26
1.4.5 太阳能热发电.....	27
1.4.6 太阳能海水淡化.....	27
参考文献	28
第 2 章 太阳能集热器	29
2.1 平板型太阳能集热器.....	29
2.1.1 平板型集热器的结构.....	29

2.1.2	平板型集热器的主要部件	30
2.1.3	平板型集热器的数学模型	33
2.1.4	平板型集热器的性能测试	39
2.2	真空管太阳能集热器	40
2.2.1	全玻璃真空管集热器	41
2.2.2	金属吸热体真空管集热器	42
2.2.3	真空管集热器效率计算	46
2.2.4	真空管集热器热性能试验	48
2.3	聚焦型太阳能集热器	48
2.3.1	聚焦型集热器的分类	49
2.3.2	聚光器的设计	50
2.3.3	抛物面聚焦型集热器的热性能	55
2.4	太阳能空气集热器	56
2.4.1	太阳能空气集热器的分类	57
2.4.2	太阳能空气集热器的设计和性能计算	59
2.4.3	太阳能空气集热器的性能测试	64
2.4.4	太阳能空气集热器的应用	64
2.5	太阳能热水器	65
2.5.1	太阳能热水装置的类型	66
2.5.2	太阳能热水器的性能分析	70
2.5.3	太阳能热水器的防冻措施	74
	参考文献	75
第3章 太阳能制冷与空调		76
3.1	吸收和吸附式制冷	76
3.1.1	吸收和吸附	76
3.1.2	吸收式循环	88
3.1.3	吸附式制冷循环	104
3.2	半导体热电制冷	119
3.2.1	热电制冷的原理	119
3.2.2	热电制冷的特性分析	121
3.2.3	多级热电堆	122
3.3	蒸气喷射式制冷循环	124
3.4	除湿与蒸发冷却	126
3.4.1	液体干燥剂除湿	127

3.4.2	固体干燥剂除湿	131
3.4.3	蒸发冷却	135
	参考文献	137
第4章	太阳能吸收式空调	138
4.1	溴化锂-水吸收式空调系统	138
4.1.1	太阳能驱动的单效溴化锂吸收式制冷空调系统	139
4.1.2	太阳能驱动的双效、两级溴化锂吸收式制冷空调系统以及 其他相关的研究	166
4.1.3	小结	177
4.2	氨-水吸收式制冷系统	177
4.2.1	太阳能驱动的氨-水吸收式制冷系统的发展	178
4.2.2	连续式太阳能驱动的氨-水制冷系统	180
4.2.3	间歇式太阳能驱动的氨-水制冷系统	183
4.2.4	太阳能驱动的氨-水吸收式制冷系统的前景	186
	参考文献	187
第5章	太阳能吸附式制冷空调	190
5.1	太阳能吸附式制冷系统的特点及其分类	190
5.1.1	太阳能吸附式制冷系统的特点	190
5.1.2	太阳能吸附式制冷系统的分类	191
5.2	活性炭-甲醇吸附式制冷系统	192
5.2.1	活性炭-甲醇工作对	192
5.2.2	活性炭-甲醇平板式太阳能吸附式制冰机	192
5.2.3	活性炭-甲醇平板式太阳能吸附式制冰机真空管吸附集热器	205
5.2.4	典型的活性炭-甲醇太阳能吸附制冰机	212
5.3	活性炭-氨吸附式制冷系统	215
5.3.1	活性炭-氨吸附工作对	215
5.3.2	活性炭-氨太阳能吸附式制冷系统	216
5.4	氯化铯-氨吸附式制冷系统	217
5.4.1	氯化铯-氨吸附工作对	217
5.4.2	$\text{SrCl}_2\text{-NH}_3$ 太阳能吸附制冰机	218
5.5	硅胶-水吸附式制冷系统	219
5.5.1	硅胶-水吸附工作对	219
5.5.2	硅胶-水太阳能吸附制冰机	220

5.5.3	太阳能热水驱动的硅胶-水吸附式冷水机组	220
5.5.4	硅胶-水吸附式空调系统的应用实例	222
5.6	分子筛-水吸附式空调系统	227
5.6.1	分子筛-水吸附式吸附工作对	227
5.6.2	分子筛-水太阳能吸附式空调冷藏库	228
5.6.3	太阳能冷管	228
5.7	太阳能蓄能转换空调	229
	参考文献	231
第6章	太阳能驱动的除湿空调	234
6.1	液体除湿空调系统	234
6.1.1	液体除湿过程	234
6.1.2	氯化锂、溴化锂和氯化钙除湿剂	234
6.1.3	填料的选择	236
6.1.4	空气和溶液相对的流动方式及其性能比较研究	237
6.1.5	几种不同的除湿装置	238
6.1.6	对除湿装置性能进行估计的几个参数	240
6.1.7	影响除湿性能的一些参数	241
6.1.8	多级除湿	242
6.1.9	溶液的再生	243
6.1.10	液体除湿系统	246
6.1.11	其他类型的液体除湿装置	248
6.2	固体转轮除湿空调系统	249
6.2.1	固体除湿空调的特点	249
6.2.2	干燥剂材料	250
6.2.3	干燥剂除湿	251
6.2.4	固体除湿空调系统循环方式	253
6.2.5	太阳能低温干燥保粮系统	256
6.2.6	转轮式除湿空调系统在粮食贮存中的应用	259
6.2.7	用于贮粮通风的太阳能再生吸附除湿系统	260
6.2.8	带辅助热源的太阳能再生吸附除湿冷却系统	261
6.2.9	太阳能干燥剂除湿强化辐射制冷系统	261
6.2.10	太阳能干燥剂除湿空调系统	262
6.2.11	混合式除湿空调系统	263
	参考文献	268

第7章 太阳能制冷空调及其能量贮存	271
7.1 太阳能热贮存与蓄热	271
7.1.1 显热贮热	271
7.1.2 潜热贮热	273
7.1.3 热化学贮能	274
7.1.4 太阳能蓄热系统中应注意的问题	274
7.2 太阳能温度分层水箱性能分析	275
7.2.1 温度分层水箱的特点	275
7.2.2 太阳能温度分层水箱	276
7.2.3 测试结果	276
7.2.4 贮能及可用能对比分析	278
7.3 太阳能化学潜能贮存与利用	279
7.3.1 太阳能化学潜能贮存系统及原理	279
7.3.2 太阳能-浓溶液再生转换装置热质传递过程	280
7.3.3 计算与分析	282
7.4 蓄能空调系统	283
7.4.1 显热蓄能太阳能空调	283
7.4.2 相变蓄能太阳能空调	288
7.4.3 制冷/制热潜能蓄能太阳能空调	290
7.4.4 展望	292
参考文献	292
第8章 太阳能供热与制冷复合系统	295
8.1 太阳能热泵热水器	295
8.1.1 太阳能热泵热水器的分类及工作原理	295
8.1.2 直膨式太阳能辅助热泵热水器	297
8.2 太阳能有效利用的热泵中央空调冷/热水系统	309
8.2.1 多功能直膨式太阳能辅助热泵空调及热水系统	309
8.2.2 直膨式太阳能辅助热泵空调及热水系统的能量分析	310
8.2.3 对系统全年工作性能的预测	315
8.2.4 直膨式太阳能辅助热泵空调及热水系统的工作特点	318
8.3 太阳能热水器/冰箱复合机	318
8.4 太阳能供热水、采暖、空调制冷、自然通风复合能量利用系统	322
8.4.1 太阳能生态建筑一体化结构	322
8.4.2 太阳能复合能量系统的构建	323

8.4.3	太阳能复合能量系统的数据采集及自动控制系统	325
8.4.4	太阳能复合能量系统的运行测试与分析	327
8.5	蒸气压缩/液体除湿/吸附式制冷复合空调系统	335
8.5.1	复合空调系统	336
8.5.2	复合空调系统的性能分析	338
8.5.3	吸附式制冷机的功率匹配	341
8.5.4	与常规空调系统的比较	342
	参考文献	343
第9章	被动式太阳能制冷	345
9.1	太阳能强化自然通风被动式制冷	345
9.1.1	自然通风的计算	345
9.1.2	太阳能强化自然通风的原理	347
9.1.3	太阳能强化自然通风的应用	350
9.2	辐射制冷	353
9.3	遮阳	355
9.3.1	遮阳方式	355
9.3.2	遮阳与建筑节能	357
9.3.3	遮阳材料	358
9.3.4	遮阳设计	358
9.3.5	建筑遮阳的发展趋势	359
	参考文献	362

第 1 章 太阳能热利用基础

太阳能作为一种洁净的能源，既是一次能源，又是可再生能源，有着矿物能源不可比拟的优越性。经测算表明，太阳每秒能够释放出 $391 \times 10^{21} \text{ kW}$ 的能量，而辐射到地球表面的能量虽然只有它二十二亿分之一，但也相当于全世界目前发电总量的 8 万倍。因此太阳能资源十分丰富，是可再生能源中最引人注目、开发研究最多、应用最广的清洁能源。

要应用太阳能，必须了解太阳辐射的规律，利用可得到的太阳能资源，并且掌握太阳辐射能的计算方法。本章主要介绍以上几点，同时介绍国内外太阳能资源的分布情况以及主要的太阳能热利用方式。

1.1 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，从太阳发射出的电磁波到达地球约需 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，因此，若要掌握它的变化规律，还必须从了解地球和太阳的运动入手。

1.1.1 太阳概貌

太阳是离地球最近的一颗恒星。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，如图 1-1 所示。其体积是地球的 130 多万倍。太阳的质量为 $1.989 \times 10^{27} \text{ t}$ ，为地球质量的 33 万倍。太阳的平均密度为 1.4 g/cm^3 ，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压力的情况下，密度高达 160 g/cm^3 ，正因为如此，日心的引力要比地心的引力大 29 倍。

太阳表面的有效温度为 5762 K ，而中心区的温度高达 $8 \times 10^6 \sim 40 \times 10^6 \text{ K}$ 。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。因此它的热量主要来源于氢聚变成氦的聚合反应。太

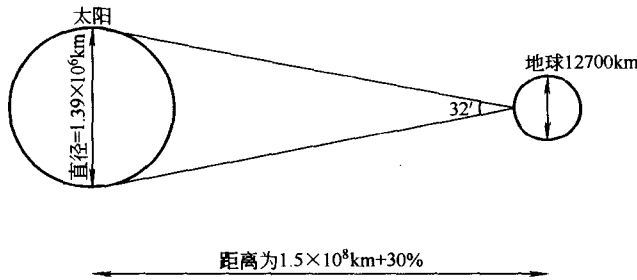


图 1-1 日地关系示意图

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，其中有二十二亿分之一到达地球表面，尽管如此，它仍是地球上最多的能源，约有 $173 \times 10^{12} \text{ kW}$ 。这是一个巨大的能源。

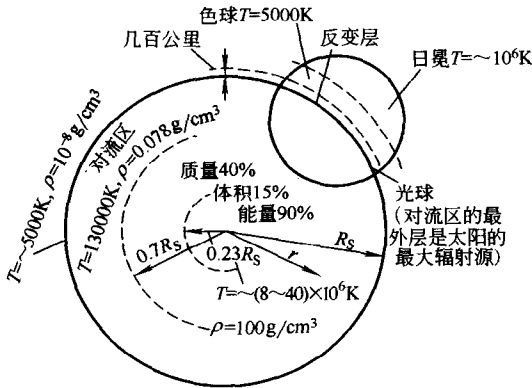


图 1-2 太阳结构示意图

太阳的结构如图 1-2 所示：在半径为 $0.23R_s$ (R_s 为太阳半径) 的区域内，可称为“产能核心”，温度约为 $8 \times 10^6 \text{ K} \sim 40 \times 10^6 \text{ K}$ ，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；从 $0.23R_s \sim 0.70R_s$ 的范围内，温度下降到 130000K 左右，密度下降到 0.078g/cm^3 ；在 $0.70R_s \sim 1R_s$ 的范围内是对流区，温度下降至 5000K ，密度为 10^{-8}g/cm^3 ，这就是整个太阳内部的基本情况。人们肉眼所见到的太阳表面叫做光球，它的有效温度是 5762K ，厚约 500km ，密度为 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。

光球外面数百公里的较冷气层是一层具有不同透明度的太阳雾，叫做反变层。反变层外面的 $10000 \sim 15000\text{km}$ 叫做色球层。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，温度高达摄氏 100 万度，高度达几十个太阳半径，甚至地球也浸入日冕的余晖中。

由上述可知，太阳并非是一恒定温度的黑体，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，则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。

1.1.2 地球的运动规律

1.1.2.1 地理坐标

地球是一个近似椭圆形的球体, 地球上任意点的位置都使用地理坐标的经度和纬度来表示。图 1-3 绘出了地球的地理坐标。

PP' 为地球的自转轴, P 为北极, P' 为南极。通过地心 O 所作的垂直于 PP' 的大圆 QQ' 叫做地球的赤道, 它将地球分为南、北两个半球。通过地面一点 M 平行于赤道的小圆 HMH' , 即为纬度圈。该点的铅垂线和赤道面的夹角 φ , 叫做地理纬度。从赤道向两极各分为 90° , 分别叫做南纬和北纬。过 PP' 的大圆叫做经度圈, 也称子午线, 简称经度。

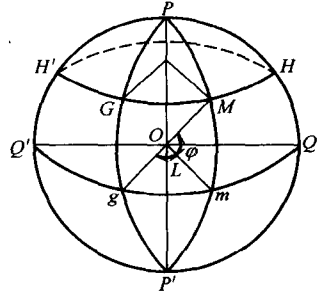


图 1-3 地理坐标

有了地理坐标后, 地球上任何地方的位置都可以用经度和纬度来表示。我国各大城市的经度和纬度数值都可以通过很多既定的图表获得, 在我国对太阳能利用中这类数据是必不可少的参数。

1.1.2.2 地球的自转和公转

地球绕着地轴(自转轴)不断地自转。自转一周, 即经度 360° 形成一昼夜。一昼夜分为 24 小时, 所以地球每小时自转 15° 。

时间的计量是以地球的自转为依据的。地球每天自转一周, 计 24 太阳时。太阳时和钟表指示的时间是有差别的。下面所采用的时间都是以太阳时为计时系统, 所以有必要介绍一下太阳时与钟时的换算。

钟表所指示的时间也称平太阳时(简称平时), 它与真太阳时之差叫做时差 E 。计算式如下:

$$E = \tau_0 - \tau \quad (1-1)$$

式中 τ_0 ——太阳时, min;

τ ——平太阳时, min。

表 1-1 给出了根据中国 1982 年的天文年历经过四舍五入所得出的时差。年际间的变化甚微, 可以忽略不计。

目前, 我国都采用“北京时间”, 即以北京所处的经度东经 120° 经圈上的平太阳时作为全国的标准时间, 用北京时间表示某一经度地区的平均太阳时, 可用下面的式子表示:

$$\tau = \text{标准时间} - (L_{st} - L) \quad (1-2)$$

太阳能制冷

式中 L_{st} ——地方时间的标准子午线经度，[东经，(°)]；
 L ——某一地区的地方经度，[东经，(°)]。

表 1-1 时差 (分)

月份 日期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-3	-13	-13	-4	+3	+2	-4	-6	0	+10	+16	+11
5	-5	-14	-12	-3	+3	+2	-5	-6	+1	+11	+16	+10
9	-7	-14	-11	-2	+4	+1	-6	-6	+2	+12	+16	+8
13	-8	-14	-10	-1	+4	0	-6	-5	+4	+13	+16	+6
17	-10	-14	-9	0	+4	-1	-6	-4	+5	+14	+15	+4
21	-11	-14	-8	+1	+4	-1	-6	-3	+7	+15	+14	+2
25	-12	-13	-6	+2	+3	-2	-6	-2	+8	+16	+13	0
29	-13	-	-5	+3	+3	-3	-6	-1	+9	+16	+12	-1

地球除了自转外还绕着太阳循着偏心率很小的椭圆形轨道（称为黄道）运行，这叫做公转，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 $23^{\circ}27'$ 夹角，而且在地球公转的同时其自转轴的方向始终保持不变，总是指向天球的北极，这就使得太阳光线直射赤道的位置有时可能偏南，有时可能偏北，形成地球上季节的变化。图 1-4 所示是地球公转的行程图。春分日和秋分日阳光直射在地球赤道上；夏至日阳光直射在北纬 $23^{\circ}27'$ 的地表上；冬至日阳光直射在南纬 $23^{\circ}27'$ 的地表上，如图 1-5 所示。

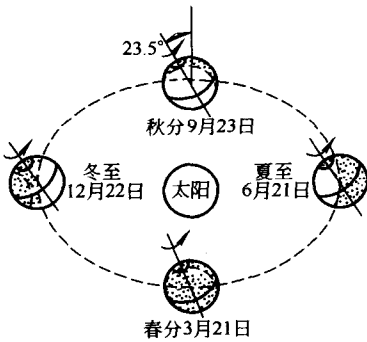


图 1-4 地球绕日运动示意图

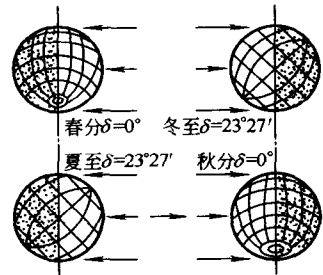


图 1-5 地球受日射情况示意图

需要指出，由于地球绕太阳旋转的运行轨道是一个椭圆形轨道，所以地球与太阳之间的距离在一年内是变化的。日地平均距离和最大、最小距离值列于表 1-2 中。

表 1-2 日-地距离的变化

日期	距离(公里)	日期	距离(公里)
1月1日	147,001,000(最小)	7月1日	152,003,000(最大)
4月1日	149,501,000(平均)	10月1日	149,501,000(平均)

1.1.3 天球坐标系

在计算太阳辐射能中，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地运动一样。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地平坐标系。

1.1.3.1 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 1-6 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 点) 的半圆也垂直于天赤道，两者相交于 B 点。

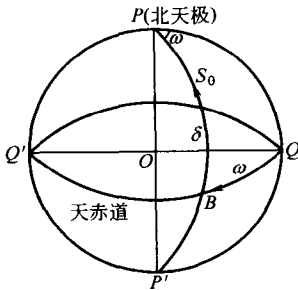


图 1-6 赤道坐标系

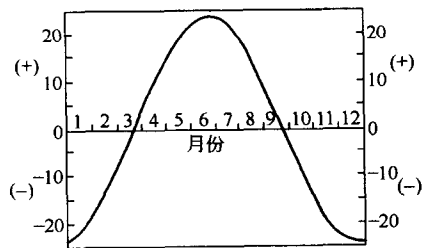


图 1-7 太阳赤纬的年变化

在赤道坐标系中，太阳 S 的位置由下列两个坐标决定：第一个坐标是圆弧 QB ，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（小时）乘以 15° 。第二个坐标是圆弧 QS ，叫做赤纬，用 δ 表示。赤纬从天赤道起算。对于太阳来说，向北天极由春分日、秋分日的 0° 变化到夏至日的正 $23^\circ 27'$ ；向南天极由春分日和秋分日的 0° 变化到冬至日的负 $23^\circ 27'$ 。

太阳赤纬随时间的变化见图 1-7， δ 可由 Cooper 方程近似计算：

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \times \frac{284 + n}{365} \right] \quad (1-3)$$

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

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{2\pi d}{365} \right) \quad (1-4)$$

1.1.3.2 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' 。

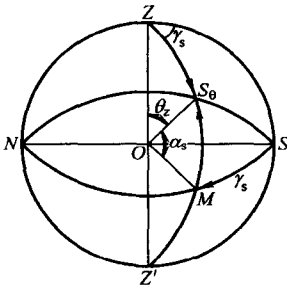


图 1-8 地平坐标

Z 点叫做天顶， Z' 点叫做天底。通过球心 O 与 ZZ' 相垂直的平面在天球上所截出的大圆，叫做真地平。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，见图 1-8。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 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 ，或天顶角 $\angle ZOS$ ，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 SM 或中心角 $\angle SOM$ ，记作 α_s 。天顶距和太阳高度有下列关系：

$$\theta_z + \alpha_s = 90^\circ \quad (1-5)$$

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。

1.1.4 太阳角的计算

太阳能收集器的设计计算都要涉及到太阳高度角、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。

1.1.4.1 太阳高度角 α_s 的计算

图 1-9 中， S 与地平面的夹角 α_s 就是太阳高度角，可以用下面的公式计算：

$$\sin \alpha_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (1-6)$$

式中 φ ——当地纬度，($^\circ$)；

δ ——太阳赤纬，($^\circ$)；

ω ——时角，($^\circ$)。

1.1.4.2 太阳方位角 γ_s 的计算

在图 1-9 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