



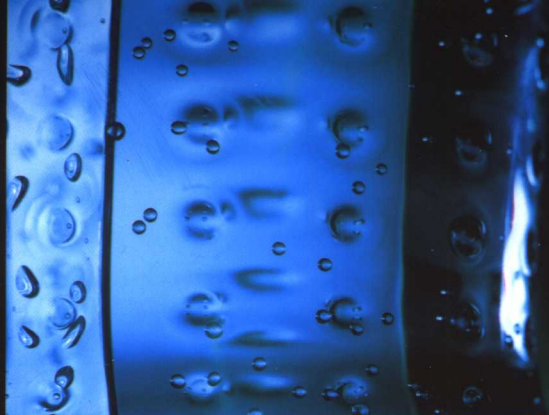
太阳能实用技术丛书

太阳能制冷技术

薛德千 编著



化学工业出版社
环境·能源出版中心



太阳能实用技术丛书

● 太阳能制冷技术

太阳灶技术

太阳热水器及系统

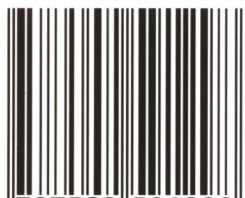
光伏发电户用系统

太阳能干燥技术

太阳能光伏照明系统

并网型太阳能光伏发电系统

ISBN 7-5025-9129-X



9 787502 591298 >

销售分类建议：能源

ISBN 7-5025-9129-X

定价：28.00元

太阳能实用技术丛书

太阳能制冷技术

薛德千 编著



化学工业出版社
环境·能源出版中心
·北京·

本书是《太阳能实用技术丛书》之一。

利用太阳能进行制冷是太阳能利用的一个重要内容。本书对太阳能热转换和光电转换的制冷技术的基本原理、制冷系统的热工性能、结构方案等进行了全面的叙述,其中包括有太阳能吸收式制冷、太阳能除湿式制冷、太阳能吸附式制冷、太阳能蒸气喷射式制冷、太阳能热机驱动压缩式制冷以及太阳能光伏制冷等。同时还介绍和分析了国内外的研究动向和应用实例,叙述深入浅出,内容丰富、实用性强。

本书可供能源领域的技术人员及太阳能企业、研究所及高等院校师生参考,特别是对制冷技术有兴趣的太阳能利用工作人员会有所帮助,也可供广大能源及太阳能业余爱好者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能制冷技术/薛德千编著. —北京:化学工业出版社, 2006. 7
(太阳能实用技术丛书)
ISBN 7-5025-9129-X

I. 太… II. 薛… III. 太阳能制冷 IV. TK511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 084682 号

太阳能实用技术丛书

太阳能制冷技术

薛德千 编著

责任编辑:戴燕红 郑宇印

责任校对:洪雅姝

封面设计:胡艳玮

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心

(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 12 1/4 字数 223 千字

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-9129-X

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

《太阳能实用技术丛书》编委会

主 编：罗运俊

副 主 编：王长贵

编委会成员（按汉语拼音排序）：

陈晓夫 崔容强 戴燕红

季秉厚 刘 宏 罗运俊

任宏琛 陶 桢 田晓红

王长贵 吴达成 薛德千

张璧光

序

能源是人类社会求生存和发展的物质基础。建立在煤炭、石油、天然气等化石燃料基础上的常规能源体系，曾极大地推动、并继续支撑着人类社会的发展。但化石燃料的大规模开采和使用，已使资源日益枯竭、环境不断恶化，还诱发了不少国家之间、地区之间的政治经济纠纷，甚至引起冲突和局部战争。我国的矿物能源资源以煤的储量比较丰富，然而人均能源资源只有世界人均能源资源的二分之一左右。从能源消费结构来看，我国是世界上最大的煤炭消费国，煤炭消费约占总能耗的 67%，这是导致环境严重污染、生态逐年恶化的根本原因之一。因此，大力开拓新能源与可再生能源的实际应用成为我国解决能源紧张和保护生态环境的重要战略任务。

太阳能是新能源与可再生能源的重要组成部分。太阳能属于分布性洁净的自然资源，能就地开发利用，具有取之不尽、用之不竭、不会污染环境和破坏生态平衡等特点。太阳能的开发利用有着巨大的市场前景，不仅带来很好的社会效益、环境效益，而且还有明显的经济价值。

我国地域广阔，是太阳能资源丰富的国家之一，三分之二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。尤其在大西北，更具有有效开发利用的潜力。为此，化学工业出版社专门组织了一批长期从事太阳能开发利用研究的专家和学者撰写了这套《太阳能实用技术丛书》。全套丛书共 7 册，涉及太阳能实用技术的各个领域。撰写各分册的作者都是相关专业行家，实践经验丰富，学术水平较高。丛书的内容系统全面、实用性和可读性强，对有志开发利用太阳能行业的人员富有参考价值。期望这套丛书的出版会对我国太阳能行业的发展和产品的创新开发提供有益的借鉴，为节约常规能源、减少环境污染、满足人民生活需要作出应有的贡献。



中国科学院院士
清华大学热能工程与热物理研究所所长
原中国太阳能学会理事长

前 言

人类对太阳能的利用从古到今，永无停止。自 20 世纪 80 年代以来，能源和环境问题日益严重。促使人类寻求更新的经济发展模式，可持续发展理论受到人们广泛的重视，基本点是倡导以不破坏生态环境为基础的经济发展模式。几百年来，人类建立了煤炭、石油、天然气等化石燃料基础上的能源体系，但是资源日益枯竭、环境不断恶化，必须寻求一种新的、清洁、安全、可靠的、可持续发展的能源体系，由此产生了太阳能利用的新篇章。

太阳能至少具有两方面的优势：一是输入的能量代价为零，二是排放的污染为零，这也是今天特别关注的原因。目前，对新能源和可再生能源动力装置的主要评价指标大多仍沿用常规化石燃料能源装置的指标，例如效率、功率、单位功率成本、环保指标等。但这些指标对新能源动力装置（包括太阳能）大不一样，应予以不同评价。对于太阳能制冷装置，首先要优化的方向应该是降低单位实用制冷功率的成本，而不是提高其制冷效率。

我国是太阳能资源十分丰富的国家，三分之二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，尤其是大西北，开发利用太阳能具有很大的潜力。尽快地发展太阳能产业是当务之急。目前，太阳能利用大多数还是在太阳能热水器、太阳房等方面，太阳能制冷的应用刚刚起步，很不成熟，很多产品还处于研制、试验、示范阶段。

太阳能制冷技术发展比较快的方面是太阳能供冷供暖的综合系统，利用溴化锂吸收式制冷技术和较成熟的真空管集热器产品结合，比较成功地供冷供暖，建立了不少示范工程项目。太阳能固体吸附式制冷技术的研究近一二十年来已有新的突破，创造出较理想的实用产品——太阳能间隙式吸附冰箱，白天太阳能加热的热水供晚间使用，夜间制冰供白天使用。太阳能连续回热式吸附制冰机和空调机很快可以投入实际应用阶段。

总之，只要我们大胆创新、努力实践，太阳能制冷技术将会得到飞速发展，各种太阳能制冷产品将会涌入市场，太阳能利用的产业将会推向新的高潮。

本书根据太阳能的特点，介绍了可能运用的一些制冷技术。由于编者水平有限，错误之处在所难免，恳切盼望读者批评指正。

编 者

2006 年 6 月

目 录

第 1 章 太阳能量的传递	1
1.1 太阳辐射特性	1
1.2 地球表面的日射量的计算	4
1.3 太阳方位的确定	7
1.4 太阳辐射的测量	10
第 2 章 太阳集热器	12
2.1 概述	12
2.2 太阳集热器的分类	13
2.3 平板型太阳集热器	14
2.4 真空管太阳集热器	29
2.5 聚光型集热器	41
第 3 章 太阳能吸收式制冷机	45
3.1 概述	45
3.2 吸收剂-制冷剂二元溶液的特性	47
3.3 溴化锂吸收式制冷机	65
3.4 氨吸收式制冷机	86
第 4 章 太阳能除湿式制冷机	93
4.1 概述	93
4.2 湿空气的热力过程	94
4.3 太阳能除湿式制冷机的结构方案	106
第 5 章 太阳能吸附式制冷系统	110
5.1 概述	110
5.2 太阳能间隙式吸附制冷系统	112
5.3 太阳能连续回热式吸附制冷系统	118
5.4 太阳能双效复叠吸附式制冷系统	126
第 6 章 太阳能蒸气喷射式制冷	131
6.1 概述	131
6.2 蒸气喷射式制冷机的工作原理及热力计算	132
6.3 太阳能增压喷射制冷循环系统	138

第 7 章 太阳能热机驱动压缩式制冷	146
7.1 概述	146
7.2 太阳能热动力	150
7.3 太阳能热机驱动的压缩式制冷机	152
第 8 章 太阳能光伏制冷	156
8.1 概述	156
8.2 太阳能光伏冰箱系统	168
8.3 太阳能供电与半导体制冷系统	174
8.4 固定式光伏方阵最佳倾角的选择	180
参考文献	186

第 1 章 太阳能量的传递

1.1 太阳辐射特性

太阳是地球上的光和热的主要源泉，它的内部进行着巨大的核反应，产生巨大无比的能量向四周辐射，其中很少的部分投射到地球上。根据探测和理论计算，太阳的表面温度为 5770K 或 5497℃，中心的温度高达 $(1500 \sim 2000) \times 10^4 \text{℃}$ ，压力高达 340 多亿兆帕，密度高达 160g/cm^3 。在地球大气外面垂直太阳辐射线的面积上，太阳的辐射能量密度为 1367W/m^2 ，称为太阳常数。由于太阳距离地球远在 $1.5 \times 10^8 \text{km}$ 以上，太阳发出的能量只有二十二亿分之一到达地球。

太阳辐射可分为两种。一种是从光球表面发射出来的光辐射，因它以电磁波的形式传播光和热，所以又叫做电磁辐射，这种辐射由可见光和人眼看不见的不可见光组成。它与绝对黑体在 6000K 时的理论辐射强度的分布基本上是一致的。图 1-1 是太阳能的光谱特性图，从中可以看出不同波长的辐射强度。

另一种是微粒辐射，它是由带正电荷的质子和大致等量的带负电荷的电子以及其他粒子组成的粒子流。微粒辐射平时较弱，能量也不稳定，在太阳活动极大期最为强烈，对人类和地球高层大气有一定的影响。但是一般来说，不等它辐射到地球表面上来，便在漫长遥远的路途中逐渐消失了，所以不会给地球送来什么热量。

地球是个大磁体，在它周围形成了一个很大的磁场。磁场控制的区域在 1000km 以上，直至几万公里，甚至几十万公里，这个广大区域叫做地球的磁层。当太阳微粒辐射到达磁层，使其不能到达地面。即使会有少数微粒闯入，也往往被磁层内部的磁场当场“俘获”。这是地球对太阳辐射设置的“第一道防线”。

在地球磁层下面的地球大气层中，对流层、平流层和电离层都对太阳辐射有吸收、反射和散射作用。其中电离层不仅可以使太阳辐射中的无线电波吸收或反射出去，而且会使有害的紫外线部分和 X 射线部分在这里被阻，不能到达地面。这就是“第二道防线”。



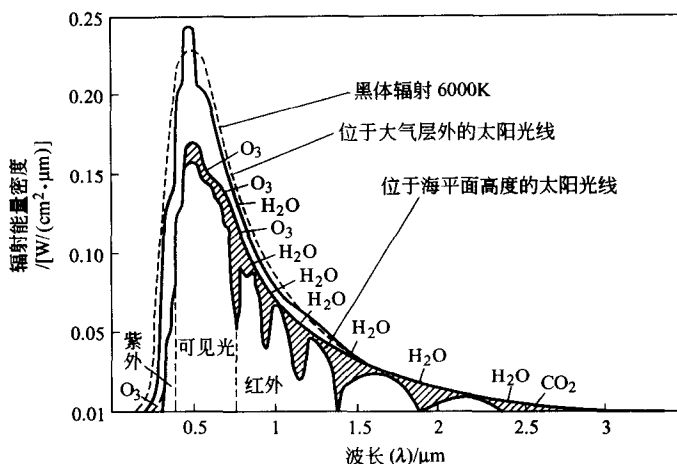


图 1-1 太阳能的光谱特性

(斜线部分代表由于被大气中的 O_2 、 H_2O 、 CO_2 等吸收不能到达地面的部分)

“第三道防线”是在平流层里 24km 左右的高空中，有一个臭氧特别丰富的层，叫做臭氧层。它可以将进入这里的绝大部分紫外线吸收掉。

由于地球设置了这样“三道防线”，把太阳辐射中的有害部分清除了，从而使得人类和各种生物得到保护，能够在地球上平安地生存下来。

下面介绍地球大气层中的各种物质对太阳辐射的影响。大气中的氧、臭氧、水、二氧化碳和尘埃等对太阳辐射均有不同程度的吸收作用，其中，氧在大气中的含量约占 21%，它主要吸收波长小于 $0.2\mu m$ 的太阳辐射波段，特别是对于 $0.155\mu m$ 的辐射波段的吸收能力最强，所以在低层大气内很难找到小于 $0.2\mu m$ 的太阳辐射。臭氧主要吸收紫外线，它吸收的能量占太阳辐射总能量的 21% 左右。大气中如果含水汽较多，太阳的位置又不太高，水汽可以吸收太阳辐射总能量的 20%，液态水吸收的太阳辐射能量则更多。二氧化碳和尘埃吸收的太阳辐射能量很少。

大气中的水分子、小水滴以及尘埃等大粒子对太阳辐射有反射作用。它们的反射能力约占平均太阳常数的 7% 左右。特别是云层的反射能力很大，但云层的反射能力同云量、云状和云的厚度有关。300m 厚的高积云反射能力可达 72%，积云层的反射能力为 52%。据测算，以地球的平均云量的 54% 计算，大约就有近 1/4 的太阳辐射能量被云层反射回宇宙空间去了。

当太阳辐射以平行光束射向地球大气层时，要遇到空气分子、尘埃和云雾等质点的阻挡而产生散射作用。这种散射不同于吸收，它不会将太阳辐射能转变为各个质点的内能，而只能改变太阳辐射的方向，使太阳辐射在质点上向四面八方传出能量，从而使一部分太阳辐射变为大气的逆辐射，射出地球大气层之外，无



法来到地球表面。这是太阳辐射能量减弱的一个重要原因。

由于大气的存在和影响，到达地球表面的太阳辐射能可分成两个部分，一部分叫直接辐射，另一部分叫散射辐射，这两部分的总和就叫总辐射。投射到地面的那部分太阳光线叫直接辐射。不是直接投射到地面上，而是通过大气、云、雾、水滴、灰尘以及其他物体的不同方向散射而到达地面的那部分太阳光线叫散射辐射。这两部分辐射的能量差别很大。一般来说，晴朗的白天直接辐射占总辐射的大部分，阴雨天散射辐射占总辐射的大部分，夜晚则完全是散射辐射。利用太阳能实际上是利用太阳的总辐射。但是，对于大多数太阳能设备来说，则主要是利用太阳辐射能的直接辐射部分。

总之，理论上粗略估算太阳发射出来的总辐射能量大约为 3.75×10^{28} MW。到达地球范围内的太阳总辐射能量大约为 173×10^9 MW。其中，被大气吸收的太阳辐射能大约为 40×10^5 MW，占到达地球范围内的太阳总辐射能量的 23%；被大气分子和尘粒反射回宇宙空间的太阳辐射能大约为 52×10^9 MW，占 47%。在到达地球表面的太阳辐射能中，到达地球陆地表面的大约为 17×10^9 MW，大约占到达地球范围内的太阳总辐射能量的 10%，它相当于目前全世界一年内消耗的各种能源所产生的总能量的 3.5 万多倍。在陆地表面所接受的这部分太阳辐射能中，被植物吸收的仅占 0.015%，被人们利用作为燃料和食物的仅占 0.002%，已利用的比重微乎其微。可见太阳能利用的潜力是相当大的，开发利用太阳能对人类服务是大有可为的。

太阳是以光辐射的方式把能量输送到地球表面上来，利用太阳能就是利用太阳光线的能量。现代物理学认为，多种光，包括太阳光在内，都是物质的一种存在形式。光既具有波动性，又具有粒子性，即光具有波粒二象性。单个光子的能量是极小的，它们是能量的最小单元。但是，即使在最微弱的光线中，光子的数目也超过千千万万。这样集中起来就可以产生人们能够感觉得到的能量了。科学研究表明，不同频率或波长的光子或光线具有不同的能量，频率越高能量越大。

人眼见到的太阳光叫可见光，呈白色。但是科学实践证明，它不是单色光，而是由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种颜色的光组成的，是一种复色光。各种颜色的光都有相应的波长范围，如表 1-1 所示。

表 1-1 各种颜色光的波长

光 波长	红外线	红色光	橙色光	黄色光	绿色光	青色光	蓝色光	紫色光	紫外线
波长/nm	>0.76μm	700	620	580	510	490	470	420	<0.4μm
光谱范围/nm		640~750	600~640	550~600	480~550	465~520	450~480	400~450	



通常，人们把太阳光的各色光按频率或波长大小的次序排列成的光带图叫做太阳光谱。太阳不仅发射可见光，同时还发射许多人肉眼看不见的光，可见光的波长范围只占整个太阳光谱的一小部分。整个太阳光谱包括紫外光区、可见光区和红外光区三个部分。其主要部分，即能量很强的部分，由 $0.3\sim 30\mu\text{m}$ 的波长组成。其中，波长小于 $0.4\mu\text{m}$ 的紫外区和波长大于 $0.76\mu\text{m}$ 的红外区，则是人眼看不见的紫外线和红外线；波长在 $0.4\sim 0.76\mu\text{m}$ 的可见光区，就是我们所看见的白光。在到达地面的太阳光辐射中，紫外线占的比例很小，大约为 8.03% ；主要是可见光区和红外区的光线，分别占 46.43% 和 45.54% 。

太阳光中不同波长的光线具有不同的能量。在地球大气层的外表面具有最大能量的光线，其波长大约为 $0.48\mu\text{m}$ 。太阳辐射穿过大气层时，紫外线和红外线被大气吸收较多，紫外区和可见光区被大气分子和云雾等质点散射较多，所以到达地球表面的太阳辐射能随波长的分布情况就比较复杂了。大体情况是，晴朗的白天，太阳在中午前后的 $4\sim 5\text{h}$ 这段时间，能量最大的光线是绿光和黄光部分；而在早晨和晚间，能量最大的光线则是红光部分。地面上具有最大能量的光线，其波长比大气层外表面的波长要长。

在太阳光谱中，不同波长的光线对物质产生的作用和穿透物体的本领是不同的。紫外线很活跃，它可以产生强烈的化学作用、生物作用和激发荧光等。红外线则不很活跃，被物体吸收后主要引起热效应。至于可见光，因为它的频率范围较宽，可起杀菌的生物作用，被物体吸收后也可转变为热量。植物的生长主要依靠吸收可见光谱部分，大量的波长小于 $0.3\mu\text{m}$ 的紫外线对植物是有害的，波长超过 $0.8\mu\text{m}$ 的红外线仅能提高植物的温度并加速水分的蒸发，不能引起光化学反应（光合作用）。

光的传播速度是非常快的。 $1.5\times 10^8\text{km}$ 之遥的太阳辐射光传送到地面只要 $8\text{min}19\text{s}$ 。实验得到的目前最精确的光速为 $3.0\times 10^8\text{km/s}$ 。

1.2 地球表面的日射量的计算

利用太阳能就是利用太阳光辐射所产生的能量。人们在利用太阳能的科研实验工作中，特别关心太阳常数。它的物理意义是在平均日地距离时，在地球大气层的上界，单位面积上单位时间内在垂直于太阳光线的平面上所获得的太阳总辐射能的数值，常用单位为 W/m^2 。太阳常数取值为 $(1367\pm 7)\text{W}/\text{m}^2$ ，这个数值在太阳活动的极大期和极小期变化都很小，仅为 2% 左右 $[(1367\pm 7)\text{W}/\text{m}^2 = (1183.4\pm 6)\text{kcal}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)]$ 。

太阳辐射能实际到达地球表面的大小受多种因素的影响。一般来说，太阳高



度、大气质量、大气透明度、地理纬度、日照时间及海拔高度是影响的主要因素。

地球表面的太阳辐射能量可分为直射日射和散射日射两部分。入射到大气层中的太阳光因被构成大气的物质所吸收和散射，实际到达地面的太阳辐射能量已经减弱了。直接到达地面的部分称为直射光 (I_D)；而经大气分子和悬浮的颗粒散射的太阳光中有一部分也可到达地面，此部分称为天空日射 (I_S)。天空日射一般按完全散射处理。天空日射在太阳周围较多，而和太阳成 90° 角的地方很少，特别是当大气被污染或天空有薄云时，则在太阳附近的天空日射非常多，所以，在一般空气调节领域里把太阳为中心的一定立体角范围内的日射完全按近似直射光处理。当计算平板型集热器的集热量时，也不妨如此处理。而计算聚光型集热器时，则必须把真正的直射光分离开进行单独测定。

另外，由于地表面或其他建筑物等的反射作用而射入的太阳光称为反射日射 (I_R)。透过云层的日射和经地面反射后又被云层反射到地表面的这部分日射，统称为云的日射 (I_C)。将以上列举的三部分间接日射总称为散射，用 I_d 表示。

$$I_d = I_S + I_R + I_C \quad (1-1)$$

总日射量 (I) 等于直射 (I_D) 和散射 (I_d) 之和 (图 1-2)。

$$I = I_D + I_d \quad (1-2)$$

(1) 直射日射 I_D 的计算 如前所述，当天空无云时，将直接到达地面的日射称为直射。但进入大气层的日射因被大气中悬浮物质吸收和散射而衰减。

如图 1-3 所示，日射通过大气层的距离为 dm ，其衰减为 dI ，则可用式(1-3)表示日射量的衰减

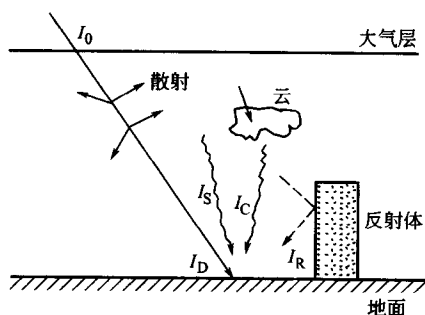


图 1-2 总日射量的组成

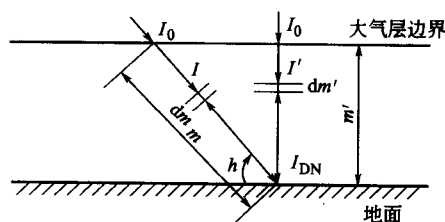


图 1-3 直射日射的计算

$$\frac{dI}{dm} = -kI \quad (1-3)$$

解上式则得出

$$I = I_0 e^{-km} \quad (1-4)$$



式中 k ——消光系数。

为了消去 k ，假定太阳在天顶时的日射量为 I' ，这时通过大气层的距离为 m' ，则

$$I' = I_0 e^{-km'} \tag{1-5}$$

由式(1-4) 和式(1-5) 可得出

$$I = I_0 \left(\frac{I'}{I_0} \right)^{m/m'} \tag{1-6}$$

I'/I_0 是太阳在天顶时地面上日射量和大气层外面日射量之比，它是衡量大气透明度的标准，称其为大气透过率，用 P 表示。 m/m' 是太阳高度为 h 和太阳在天顶时，其光线通路的长度比，由图 1-3 可知，它等于 $\text{csch} = 1/\sinh$ 。

因此，如果用 I_{DN} 表示地表面的法线上的直射日射量，则

$$I_{\text{DN}} = I_0 P^{1/\sinh} \tag{1-7}$$

P 值越接近 1，则意味着空气越清洁，它随着地区、季节、时间的不同而变化。

表 1-2 列出了日本东京不同季节大气透过率的平均值。早上和晚上 P 值大，可按下式求出

$$P = P_0 + a(\tau - 12)^2 \times 10^{-4} \tag{1-8}$$

式中， τ 为中央的标准时间； P_0 和 a 值也可由表 1-2 查出。

表 1-2 不同月份太阳位置、日射量等有关常数的标准值

项 目	符号	单位	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
太阳赤纬	δ	(°)	-20.3	-11.7	0	11.7	20.3	23.4	20.3	11.7	0	-11.7	-20.3	-23.4
平均时差	e	min	-11.1	-13.8	-7.3	1.2	1.7	-1.6	-6.2	-3.0	6.9	15.2	14.0	1.8
太阳常数	I_0	$\frac{\text{kcal}}{(\text{m}^2 \cdot \text{h})}$	1208	1200	1185	1165	1148	1133	1126	1132	1145	1162	1181	1198
大气透过率 (东京晴天)	P	—	0.80	0.79	0.74	0.74	0.70	0.66	0.68	0.69	0.75	0.76	0.77	0.78
式(1-8) 中的常数	P_0	—	0.80	0.79	0.74	0.72	0.70	0.60	0.62	0.63	0.70	0.76	0.79	0.80
	a	—	55	50	45	40	40	40	40	45	45	45	50	55

注：1kcal=4184J，下同。

$1/\sinh$ 称为大气质量，其值列入表 1-3 中。上述情况均假定地表面和大气层无限平行，但实际上它们是曲线，所以多少会存在一些误差。在表 (1-3) 中也给出了贝姆波若德 (Bemporad) 考虑了曲率变化而求出的值。

表 1-3 大气质量

h	90°	60°	45°	30°	15°	10°	5°	0°
$1/\sinh$	1.000	1.155	1.414	2.000	3.864	5.758	11.48	∞
贝姆波若德值	1.000	1.154	1.413	1.995	3.816	5.600	10.40	35~40



(2) 散射日射的计算

① 天空日射 I_s 伯兰基 (Berlage) 整理了晴天时天空日射量的观测值, 并假定天空是等辉度的散射面, 推导出可供一般使用的理论公式。水平天空日射量可用式(1-9)表示

$$I_{SH} = \frac{1}{2} I_0 \sinh \frac{1 - P_{\sin h}}{1 - 1.4 \ln P} \quad (1-9)$$

当倾斜面和水平面成 θ 角时, 可以用下式表示倾斜面上天空的日射量

$$I_{S\theta} = \left(\cos^2 \frac{\theta}{2} \right) I_{SH} \quad (1-10)$$

在垂直面上则为

$$I_{SV} = \frac{1}{2} I_{SH} \quad (1-11)$$

② 反射日射 I_R 如果假定前方地面的物体是完全的散射面, 其平均反射率为 ρ_0 , 则由于地面物体反射而进入倾斜角为 θ 表面的日射量为

$$I_{R\theta} = \left(1 - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \rho_0 I_H \quad (1-12)$$

式中 I_H ——水平面上总日射量;

ρ_0 ——平均反射率, 参见表 1-4。

表 1-4 各种地表面的反射率

地面类型	反射率/%	地面类型	反射率/%
干燥新雪地	80~95	小麦地	10~25
脏雪地	40~50	牧草地	15~25
黑土地	5~15	水田	23
湿的灰色土	10~20	针叶树林	10~15
干燥砂土地	25~45	阔叶树林	15~20

1.3 太阳方位的确定

计算进入集热器的日射量, 首先必须知道该地区不同季节、不同时刻太阳的位置。为了确定太阳的位置, 则必须求出太阳高度角 (h) 和方位角 (α)。如果用 φ 表示该地区的纬度, 用 δ 表示太阳赤纬 (太阳赤纬以一年为周期, 夏至是 $+23.5^\circ$, 冬至是 -23.5° , 春分和秋分是 0°), 用 t 表示时角 (正午的时角规定为 0° , 午前为负值, 午后为正值, 每小时变化 15°)。根据球面三角公式, h 和 α 可用下列公式表示

$$\sinh = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos t \quad (1-13)$$



$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \sin t}{\cosh} \quad (1-14)$$

当 $\sin \alpha > 1$ 时, 则表明 $|\alpha| > 90^\circ$, 此时不能使用上式, 必须用下式计算

$$\cos \alpha = \frac{\sinh \sin \varphi - \sin \delta}{\cosh \cos \varphi} \quad (1-15)$$

严格地讲, 随着年、月、日的不同, 太阳赤纬值也在变化, 应由理科年表查出, 但计算集热量时可使用表 1-2 (图 1-4)。

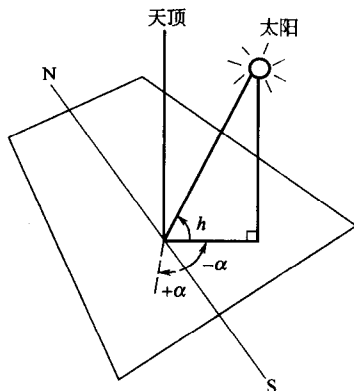


图 1-4 太阳方位的变化

由上式得到的值是以当地真太阳时为准求出的, 如果换算为以东经 135° (东京) 为基准的时间, 则对东经 135° 以东地区, 经度每变化 15° , 必须将时间调后 1h。由地球公转而引起的平均时差 (e), 每年约为 $\pm 15\text{min}$, 除了设计太阳计时器外, 其他情况可以忽略。如果在经度为 L 的地区, 时间用中央的标准时间 τ 表示, 则时角 t 可用下式计算

$$t = 15(\tau - 12) + L - 135 + \frac{e}{4} \quad (1-16)$$

对倾斜面的直射日射量, 如果用 I_{DN} 表示法线面上的直射日射量, 则水平面上的直射日射量 I_{DH} 可用式(1-17) 表示

$$I_{\text{DH}} = I_{\text{DN}} \sinh \quad (1-17)$$

如果对垂直面的入射角为 γ , 则垂直面上的直射日射量为

$$I_{\text{DV}} = I_{\text{DN}} \times \cosh \cos \gamma \quad (1-18)$$

参见图 1-5, $\gamma = \alpha - \epsilon$ 。 ϵ 是壁面的法线与正南面的偏角, 其方向和方位角 α 的规定相同, 取向西侧为正。

可以用下式计算出射到像集热器那样具有任意倾斜角 θ 和方位角 ϵ 的倾斜面的直射日射量 $I_{\text{D}\theta}$

$$I_{\text{D}\theta} = I_{\text{DN}} \cos \beta \quad (1-19)$$

$$\cos \beta = \sinh \cos \theta + \cosh \sin \theta \cos \gamma \quad (1-20)$$

当 $\cos \beta \leq 0$ 时, 则 $I_{\text{D}\theta} = 0$

例如, 计算在东京地区 1 月 15 日、晴朗天气、向南倾斜 45° 的倾斜面上每小时的日射量, 但散射日射中只包括天空日射。

步骤 1: 准备好像表 1-5 那样的计算表格和带函数的台式电子计算器。

步骤 2: 由表 1-2 和理科年表等查出东京的纬度 (φ)、经度 (L)、1 月的太

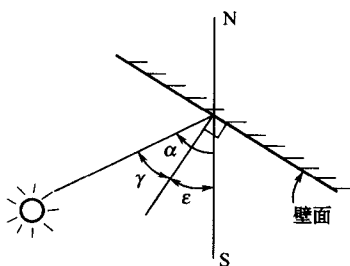


图 1-5 垂直面上的直射日射量

