

全国聚光式太阳灶短训班教材汇编(上)

聚光式太阳能集热器的原理

王锦侠 车茂隆 编著

江苏省盐城地区科学技术情报研究所编印

目 录

绪 论	(1)
-----	-------

第一章 太阳辐射能入射数据及其应用

§ 1 · 1 太阳常数和太阳辐射光谱的能量	(10)
§ 1 · 2 太阳高度角和太阳方位角	(11)
§ 1 · 3 日照时间和太阳能资源区划	(17)
§ 1 · 4 大气对太阳辐射的吸收和散射	(20)
§ 1 · 5 大气透明度和不同波长的反射率	(21)
§ 1 · 6 太阳直接辐射和天空辐射	(24)

第二章 聚光式集热器的基础理论

§ 2 · 1 概 述	(27)
§ 2 · 2 聚光式集热器的分类	(27)
§ 2 · 3 聚光式集热器的基础理论	(29)
1、聚光度	(29)
2、聚光器的极限聚光度	(29)
3、聚光度和最高可达温度	(31)
4、聚光式集热器的效率	(32)
§ 2 · 4 一些典型聚光式集热器的设计原理	(34)
1、抛物柱镜聚光式集热器	(34)
2、旋转抛物面聚光式集热器	(37)
3、球面镜固定不动吸热器跟踪的集热器 (S R T A)	(39)
4、固定条形镜面太阳能聚光器 (F M S C)	(43)
5、反射式圆型菲涅尔聚光器	(50)
6、复合抛物面聚光式集热器 (C P C)	(50)
7、菲涅尔透镜	(53)
8、定日镜	(55)
§ 2 · 5 聚光式集热器的跟踪	(59)
1、跟踪方式的分类	(60)
2、跟踪方式对集热器接收的长期年平均辐射量的影响	(60)
3、跟踪装置设计实例的介绍	(62)

第三章 聚光式太阳能集热器的材料

§ 3.1	概 述	(72)
§ 3.2	反光材料	(72)
1、	基本的要求	(72)
2、	反光材料分类及制备工艺	(72)
3、	几种反光材料的性能	(74)
§ 3.3	透明材料	(75)
1、	基本的要求	(76)
2、	透明材料的分类	(76)
3、	常用透明材料的性能	(77)
4、	提高透明材料性能的途径	(77)
§ 3.4	选择性吸收涂层和表面	(79)
1、	选择性吸收的原理	(79)
2、	制备选择性吸收涂层的方法	(79)
3、	几种选择性吸收涂层的制作工艺	(80)
§ 3.5	绝热材料	(88)
1、	对绝热材料的性能要求	(88)
2、	常用的绝热材料	(89)

第四章 聚光式太阳能集热器的性能试验

§ 4.1	聚光式太阳能集热器性能试验方法讨论	(90)
1、	总 则	(90)
2、	定 义	(90)
3、	聚光式太阳能集热器瞬时效率测定	(92)
4、	聚光式集热器焦面能量密度的测定	(93)
5、	试验报告	(95)
6、	符号及单位(略)	(95)
§ 4.2	聚光式集热器焦区辐射强度测量计的简介	(95)
1、	康铜圆箔热辐射测量计的工作原理	(96)
2、	康铜圆箔热辐射测量计的理论分析	(96)
3、	康铜圆箔辐射计的制作	(98)
4、	圆箔辐射计理论性能与标定性能的比较	(99)
§ 4.3	抛物盘镜太阳灶热性能的测定	(100)
1、	抛物盘镜太阳灶的能量平衡方程及热效率定义	(100)
2、	以瞬时法为主的太阳灶效率试验与分析	(101)
3、	以焦区法为主的太阳灶效率试验与分析	(103)
参 考 文 献		(106)

绪 论

聚光式太阳能集热器是太阳能利用装置之一。早在三千多年以前，我国古代科学家和国外不少研究者，对太阳能的聚光利用有过许许多多的发明创造和技术改进，为太阳能利用装置的发展和提高作出了杰出的贡献。

据史籍记载，早在我国西周时代，即公元前十一世纪，距今三千多年以前，我们的祖先已经掌握了“阳燧取火”的技术。所谓“阳燧”就是一种金属的凹面镜，它能会聚阳光点燃艾绒之类而取火种。据说当时人们随身总是带着“木燧”和“阳燧”两件东西。“木燧”即为钻木取火的工具，“阳燧”就是利用阳光取火的金属凹面镜。这给当时人们的生活和生产活动，带来很多方便之处。因此，“阳燧”是利用太阳能最早和最杰出的一项发明，（见图1）在世界科学史上占有重要的地位。



图1 唐代阳燧文物

到公元前五世纪，《墨经》的作者墨翟和他的学生们，就对凹面镜的光学原理，进行了深入的研究。发现当物体放在球心之内，得到的是正立的象，距离球心近的象大，距离球心远的象小；当物体在球心之外时，得到倒立的象，距球心近的象大，远的象小；当物体在球心处，象和物重合。他还把焦点和球心作了区分，把焦点名之为“中燧”。这说明了我国古代人民不仅很早就掌握了利用凹面镜会聚阳光取得火种的技巧，而且在理论上也早就有所总结。

在国外，有一个最早的传说，在公元前二百十四年，希腊著名科学家阿基米德（Archimedes）利用许多磨亮的金属盾牌，会聚阳光烧毁了攻击西西里岛东部西拉修斯（Syracuse）港的一支罗马舰队。可惜的是无法考证是否真有其事。1973年希腊科学家伊奥尼斯·萨克斯（Ioannis Sakkas）为了证实这个传说，在希腊海军的帮助下，在皮拉斯（Piraeus）城使用七十面镜子，每面镜子的面积约为 $2 \cdot 3$ 平方米，果真把一艘45米长的木船烧着了。

公元936~946年，即距今一千多年前我国晋代，虽然当时玻璃透镜还没有传入我国，但我国古代人民却通过一种特殊的方法，认识到了凸透镜能够聚焦的现象，这在晋代张华著的《博物志》一书中，曾有清楚的记载：“削冰命圆，举以向日，以艾承其影，则得火”。众所周知，冰见到了热会溶化，但是我们的祖先却把它制成凸透镜，用来会聚阳光取得火种，这真是太阳能利用史上的一项巧夺天工的发明创造。而在欧洲，直到公元1774年法国的爱·拉伏齐尔（A·Lavoisier）在巴黎才开始作了二块透镜会聚阳光使金属熔化的表演。

从上面所举的一些历史资料中，可以说明利用太阳能的技术古已有之，我国古代在这方

面的一些卓越的发明创造是不容忽视的。同时可见古代的太阳能利用还没有明确的目的性，并没有意识到太阳能可以作为地面上的一种能源和动力来加以利用。直至公元1615年世界上出现了第一台太阳能驱动的发动机以后，太阳能利用的发展才进入了一个新的历史时期。

所以在漫长的历史长河中，太阳能可以作为地面上的一种能源和动力，而被科学家和工程师们所承认，还只有三百多年的历史。在这三百多年中，虽然出现了许许多多的科学家，发明了许多利用太阳能的新技术，但是如果我们把它的发展过程按照技术上取得比较重要的关键性的突破，来划分为几个阶段，通过每一阶段中的一些典型的聚光式太阳能集热器装置介绍，就不难看出它的发展特点和发展规律。

1、第一阶段（自1615~1900年）：其中比较重要的人和事有：

1615年，也就是著名的1620年英国移民乘“五月花”号船在美国普利木斯海礁(Plymouth Rock) 登陆前不久，有个法国工程师所罗门·德·考克斯(Solomon de caux 1576—1626年)他是世界上第一个把太阳能转换为机械能的成功者，他的发明是一台利用太阳能的热量来加热空气使其膨胀抽水的机器。

1774年，法国的爱·拉伏齐尔在巴黎作了用二块透镜聚集阳光使金属熔化的表演。这就是今天高温太阳炉最初的雏形。

1854~1874年奥地利的西·柯特纳(C·Cüntner)在拉巴赫(Laibach)城第一次用反射镜聚集阳光使锅炉产生蒸汽转动了一台太阳能发动机。他将一排排狭长的镜子斜放在地面上，每面镜子可绕其长轴转动，各排镜子之间相互连接起来使之能同步地跟踪太阳而转动，将光线反射到镜子上方的一根长吸热管上。他发现系统内每18.6平方米的镜面所产生的蒸汽足以发出一马力功率。

1872年在智利的拉斯沙利纳斯(Las Salinas)城建立了面积约为4682平方米的太阳能蒸馏装置，在1910年夏季约可生产20080公升的淡水。

法国的爱·莫查特(A·Mouchot)在1860~1878年用一个锥形反射器(锥角为45°)进行了太阳能转换研究

(见图2)。

1866年他在巴黎展出他的第一台太阳能发动机，引起了拿破仑三世和法兰西政府的重视，以后他在法国政府的支持下，又建造了二台太阳能发动机，并由法国政府指定两个委员会进行试验。

委员会的最终结论是

该装置在经济上太昂贵了。

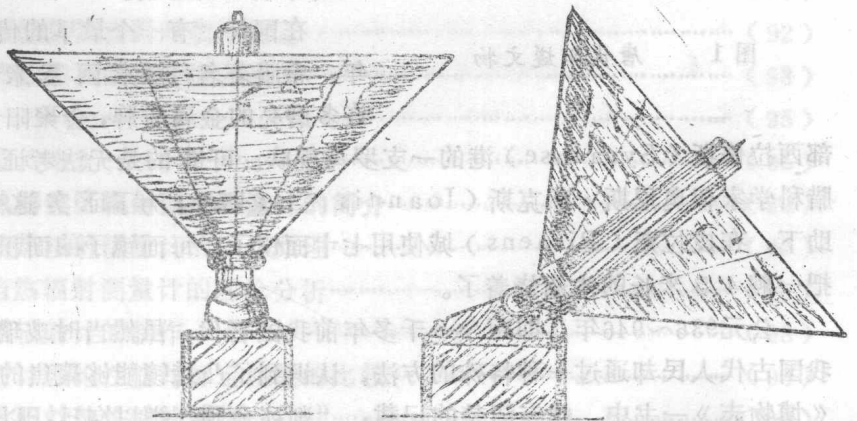


图2 1878年由爱·莫查特制造的锥形反射器(太阳能锅炉)

1878年在巴黎世界博览会上，法国著名科学家爱·皮福瑞(A·Pifre)展出一台太阳能印刷机而轰动世界。他用的是抛物面反射镜将阳光聚集到蒸汽锅炉上，产生的蒸汽驱动一

台蒸汽机带动的印刷机工作。(见图3)

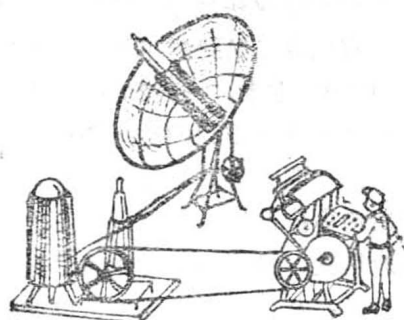


图3 太阳能蒸汽机(1878年蒸汽机, 巴黎)

几乎在莫特查和皮福瑞研究的同时,一位移居美国的著名工程师瑞典人约翰·埃里克生(John

Ericasson)化费了二十多年的时间致力于研究太阳能机械动力系统,在1872~1875年间,先后共建造了七台太阳能发动机。1883年他建造了一台很大的“太阳摩托”。并在纽约进行了示范表演。它是由3.3米长,4.8米宽的抛物槽形反射镜组成,焦线上放一根直径为166毫米的吸热管,手动跟踪太阳。在夏季试验时,蒸汽压力可达每平方厘米2.45公斤,可驱动一台120转/分,1.6马力的往复发动机。

乌·亚当斯(W·Adams)从1876年到1878年在印度孟买用许多小块的平面镜拼成一个直径为12米的近似球面镜进行了试验。据说该装置可持续产生2.1公斤/厘米²的蒸汽,可连续20天运转一台2.5马力的水泵。

此外还有一些发明家和他们所作的试验,就不再一一介绍了。从1615年到1900年以前的第一阶段中,我们可以看出:

(1)已经初步成功地把太阳能转换为机械能了,但是功率均不大,一般只在1/2马力的到3马力左右。

(2)太阳能采集装置几乎全部是聚光式的。并且由抛物盘镜发展到抛物槽镜。跟踪装置均采用手动型式。

(3)发动机使用的工质主要是水蒸汽。

(4)由于太阳能动力装置的功率比较小,造价非常高,实用价值不大,所以研究和试验还仅仅停留在小规模、个别的阶段,基础理论的研究还完全谈不上。

2、第二阶段(自1900年—1920年):

在这一阶段中,首先应提到的是:1901年爱·伊尼斯(A·Eneas)在美国加利福尼亚州帕萨迪纳“鸵鸟”农场建造了一个很出名的太阳能装置。聚光器是一个顶部直径约为10米,底部直径为4.5米的截头圆锥,由1778块小平面镜拼成一近似的圆锥面。产生蒸汽压力为10.5公斤/厘米²,用来驱动一台往复式凝汽发动机,由皮带传动一台离心泵,峰值功率约为10马力,抽水量可达5300公升/分,提升3.6米的水头。整个聚光器和锅炉一齐安装在一台赤道仪的轴上,用钟表机构自动地跟踪太阳(见图4)

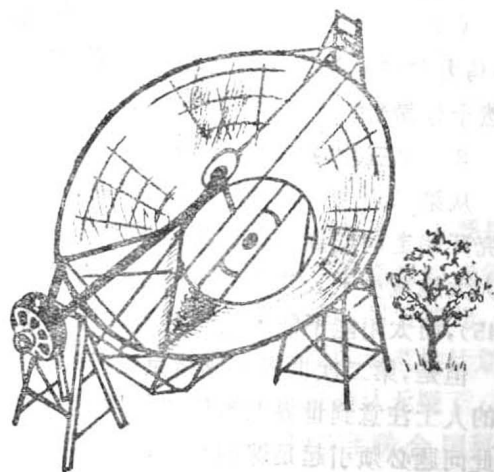


图4 太阳能蒸汽机(1901年美国加州帕萨迪纳“鸵鸟”农场造)

其次需要提出的是1906年到第一次世界大战期间，佛·舒曼（F·Shuman）所作的工作，他采用平板集热器建造了一系列太阳能动力装置，但在平板集热器上，他不但吸取了前人已有的成就，而且从理论上进行总结并有所创新。1911年他在宾夕法尼亚州的塔科尼城建造了一套规模巨大的动力装置，该装置用22个箱子上、下方带有侧翼反射镜的平板集热器连成一排，每13排组成一行，左右各一行，每行总的采光面积为960平方米，一条200毫米直径的蒸汽管道由中间通过，将蒸汽输送给发动机。所有的集热器都是东西向排列的并可调整倾角以适应太阳赤纬角的变化。根据1911年8月的试验。该系统的抽水能力为11400公升/分，提水高度为10米，输出的峰值功率相当于24马力，日平均输出功率接近16马力。可以看出在这套装置中，他作了几方面的改进，1、采用盖有双层玻璃的热盒，减少热损失加强了保温的作用；2、采用上下以 120° 角度展开的反射镜来增加辐射通量；3、采用了倾角可以调整的按装方法。

此外在1913年他和英国人西·博伊斯（C·V·Boys）教授合作，承担东方太阳能动力有限公司的一项工作。在埃及开罗以南的米迪城（Meadi），建造了一个由抛物槽镜组成的太阳能动力灌溉系统从尼罗河中汲取灌溉水。（见图5）五个抛物槽形聚光器，每个长为62.5米。宽为4米。总的采光面积为1280平方米，聚光度 $4 \cdot 6$ ，吸热器总的峰值效率为40.7%，装置可产生73个制动马力。但由于第一次世界大战以及液体、气体燃料开发新时期的出现，该系统在经济上不能和其它灌溉系统相竞争而废弃。但必须指出的是博伊斯教授对抛物槽形聚光器的结构提出了二项重要的改革性建议：这就是1、吸热管外面加上一个玻璃套管，以减少热损失；2、抛物槽镜采取南北放置，东西向单轴跟踪。

由此我们可以看到第二阶段具有如下的一些特点：

（1）已经从聚光式集热器发展到装有反射镜的平板式集热器；

（2）开始采用双循环低沸点工质的动力装置系统，这是技术上的一项重大成就；

（3）装置的规模不断扩大，功率也逐渐发展到100马力左右，并且具有比较明确的实用目的，但成本仍然十分昂贵。

3、第三阶段

从第二阶段以后。即从1920到1945年左右。太阳能的研究开始走向低潮。在这20多年中，研究的人数和项目也大大地减少了。其原因可能是因为矿物燃料的大量开发和第二次世界大战的发生（1935—1945），而太阳能不能解决当时对能源的急需问题。因此使太阳能研究的热潮逐渐平息下去。

但是，第二次世界大战结束以后的二十年内，也就是从1945—1965年期间，已有一些有远见的人士注意到世界上液体和气体燃料的资源正在迅速衰竭，因此在各种场合呼吁有关方面对此问题必须引起足够的重视，其中比较重要的是1953年美国的佩利（Paley）为总统的材料委员会主席编写的一份重要报告发表以后，促使1954年成立了应用太阳能协会（AASE），并在1955年11月初举行了二个会议，一个会议是在塔斯康（Tuscon）城举行为期二天的有关太阳能基础科学的学术交流；另一个会议是在菲尼克斯举行应用太阳能的世界会议，同时

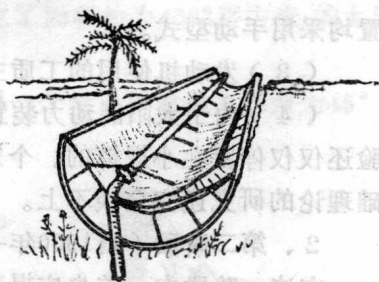


图5 太阳能蒸汽机（1913年于开罗的米迪城）

还举办了太阳能展览会,大约有3万名代表参加,共有37个国家派代表参加了会议和展览会。

在第三阶段中,还应提到的是在1936年美国的西·阿博特(C·Abbot)在华盛顿举行的国际动力会议展览会上展出一台1/2马力的太阳能蒸汽机,它由太阳能转换为机械能的总效率已达15.5%。1939年他研制成一套太阳能炊事装置,用抛物槽镜加热吸热管内流动的油,使其达到318℃,然后经过一个热交换器加热一个烘炉再循环到吸热管。这套装置具有这样一些特点:1、用油作为工质;2、热交换器不仅有传热的功能,而且还有蓄能的作用。

1950年苏联为了向亚美尼亚加盟共和国的阿尔拉特山谷供电,设计了一个塔式热电站,用装在轨道上可移动的定日镜跟踪太阳,电站原设计一年可发电 2.5×10^6 千瓦时,但实际上只建造了一个小型的试验装置。

1952年法国国家科学研究中心(CNRS)的太阳能实验室,在比利牛斯山东部的蒙特罗易丝(Montlouis)地方建造了第一座50瓩的太阳炉,为以后建造功率更大的太阳炉建立了可靠的试验基地。

1960年美国的伊·法勃(E·Farber)用平板集热器在佛罗里达州建造了世界上第一套氨——水吸收式空调系统,致冷能力为5冷吨,

1961年梯·菲尼尔斯斯坦(T·Finelstein)成功地运转了一台具有石英窗的斯特林循环发动机。

1965~1968年意大利的格·佛朗西亚(C·Francia)教授在热那亚先后建立了三套塔式太阳能热试验装置,其最后一套装置使用了271面圆形定日镜,每面镜子的直径为780毫米,跟踪机构采用他所设计的运动学机械装置,每排镜子由一个钟表机构来控制,每小时可产生150个大气压550℃的蒸汽150公斤。

第三阶段中归纳起来,大致有下列一些特点:

(1)注意了基础理论和基础材料方面的研究,并且初步取得一些成绩,出现了如光谱选择性涂层、硅光电池等一些新技术;

(2)平板集热器有很大的发展。而且技术上也比较成熟了;

(3)开始进行平板集热器应用太阳能空调系统的研究。建造一批实验性的太阳房;

(4)开展了一些难度更高的项目的预先性研究,如斯特林循环发动机、高温塔式热试验装置等。

4、第四阶段

第三阶段结束一直到七十年代初,太阳能的研究又似乎处于停滞不前的状态。主要是因为这时太阳能利用技术刚处于成长阶段,不很成熟,并且成本昂贵不能与常规燃料相竞争,因此没有受到绝大多数科学家和公司的重视,被认为是没有经济价值的缘故。尽管如此,当时美国的能源发展研究局仍提出了在不同纬度的四个学校,建立太阳能采暖的示范性计划;太阳能致冷和空调的应用在一些国家中得到发展;太阳能发电的可能性已被确认无疑了。法国的佩尔匹克纳(Perpignan)大学首先开办了太阳能利用的专业课程。1972年联合国科教文组织还组织了研究班。讨论了太阳能利用的国际间协作的研究项目。

这个低潮一直持续到七十年代初。也就是1973年以后,由于资本主义世界能源危机和环境污染问题的日趋尖锐。加上各个领域内新兴学科的技术迅猛发展,从而使太阳能利用技术

过去碰到的一些难题，大部分得到了解决，成本也有所下降，于是第三次太阳能的热潮又应运而起。这次热潮无论在规模上，或是在人们的重视程度上，都是史无前例的。

目前世界上已有一百多个国家在开展太阳能的研究。1979年5月28日—6月1日。在美国佐治亚州的亚特兰大市，举行国际太阳能协会的第二十五次年会，共有七十多个国家、二千多名科学家技术人员和经济专家参加。在这次会议上，美国能源部的代表在会上说，太阳能是一种多样的，人人都受益的能源。他还推测，各种形式的太阳能（包括直接阳光、风能、海洋能、生物能）“在二十年后将是美国和世界的能源”。

美国现有的家庭使用太阳能热水器甚为普遍。连白宫也装上了太阳能热水器。现在已有太阳能空调房5000户。

美国在发展太阳能利用技术的研究计划中重点是太阳能发电。因此制定了一个名为“太阳能动力系统和部件研究”的计划，其目标是预计要在九十年代初建成一个10万瓩的太阳能热电站。为此先在新墨西哥州的桑地亚实验室建立世界上最大的5000瓩热功率试验装置，该装置已于1977年初的初步试验中输出功率为1700瓩并于1978年底开始建造一个10000瓩的电站，将于1980年底或81年初投入运行，然后根据此电站的运行经验来确定10万瓩太阳能电站的最后方案。

法国的国家科学研究中心于1970年在比利牛斯山的奥台罗地方又建成了一座1000瓩的太阳炉。用来试验金属或耐火材料的高温性能或制备新型高温材料的，但经过改装以后，成为世界上最早的一座发电64瓩的太阳能热发电装置，已于1976年底并网运行。

日本国内燃料资源缺乏。绝大部分燃料由国外进口，从1972~1977年单单化在购买石油的款额已高达17000亿日元。因而对发展太阳能技术十分重视。1974年制定了一个“阳光计划”。1975年日立制作所在东京附近建造了一台1瓩的聚光型太阳能热试验装置，采用的是抛物槽形镜集热器。目前正在建造1000瓩的混合型发电装置，是用抛物槽镜集热器将定日镜反射来的阳光收集起来。此外三菱重工于1975年在广岛也建造了一套热功率为10瓩的塔式试验装置。目前也正在建造1000瓩级塔式发电装置。

此外，澳大利亚、加拿大以及亚非拉地区也有许多国家都在积极进行太阳能利用的研究。

从第四阶段中，国外发展的情况来看，可以看出具有下列一些特点：

（1）太阳能利用技术正在壮大，有些技术已显示出具有一定的经济性，如热水器，小功率的低温热发电装置及太阳能水泵等，已成为产品化生产，向第三世界输出；

（2）太阳能利用技术的研究已不再象以前那样由个人或某一单位单独进行，而是发展到地区或国家之间的相互合作了；

（3）太阳能利用技术的研究内容日益深入，项目也日益扩大。对于一些难度较大的项目，如塔式热发电、光电池新工艺新材料、光化学、蓄能、海洋温差发电、空间发电等都在不同程度上进行着研究，取得成果后经过中间性示范试验，再进行商业性试验，因此发展是比较稳固的。

5、我国近年来太阳能利用的发展概况：

解放以前，我国因长期处于半封建半殖民地制度的统治之下，致使我国的科学技术长期处于停顿不前的状态，因此太阳能利用技术也和其它科学技术一样，根本不受重视，得不到应有的发展。

解放后在毛主席和周总理的亲切关怀下，太阳能利用技术也得到了新生而逐步发展。1975年于河南省安阳县召开了全国第一次太阳能利用的经验交流会，但当时的水平还很低，交流集中在太阳灶、箱式太阳灶、热水器等简单装置的制造及使用方面的一些经验。但是这次交流大会对我国太阳能利用技术的加速发展，却起了极为重要的促进作用。经过四年的努力，1979年9月在陕西省西安市召开了全国第二次太阳能利用的经验交流会，同时举办了太阳能利用的展览，并成立了全国太阳能学会，制订了我国今后的研究规划。来自全国各省、市、自治区的几千名同志和上万名陕西省、西安市的干部群众参观了展览，进一步宣传和传播了太阳能的科学知识。展览会中许多展品显示了我国太阳能利用已经深入到工业、农业、生活、医学等各个领域。例如：我国甘肃省临潭县上寨大队，自一九七六年以来普及了太阳灶。全队每年可节省柴草五十万斤，节约三千七百个劳动日和近千个畜力，腾出人手搞副业，全队二百八十户八个月收入两万元。

甘肃省永靖县是我国严重的缺煤少柴地区之一，当地群众迫切希望利用太阳能来弥补不足。一九八〇年在省、地、县委领导的重视下，生产了三千台太阳灶投入试用，很快受到群众的欢迎，所以为了使该县三万五千户居民，每户能得到一台2平方米的太阳灶，目前已办起了一座日产三百台太阳灶的工场，以实行全县太阳灶化。

总的说来，我国太阳能利用的研究和推广近年来发展非常迅速，已初步形成了一支技术队伍，正在太阳灶、热水器、太阳房、太阳能光电池、太阳能制冷、制氢等各个领域内进行着不同深度的研究。在开展理论研究的同时，注意结合我国具体情况，进行推广应用，并已取得一些可喜的成绩。这是今后积极而广泛利用太阳能的一个良好开端。

古今中外太阳能利用的发展史说明，人类对太阳能的利用与研究有着悠久的历史。在这漫长的岁月中，太阳能利用技术经历了萌芽、成长的过程而发展至今日的水平。这一发展的过程是几经曲折逐步发展的过程，远的且不说，就拿世界上出现第一台将太阳能转换成机械能的装置以来，也已有三百多年的历史，这中间就出现过三起二落的现象。但每次高潮的出现并不是一个简单的重复过程，而是达到一个新的发展时期。

在历史发展的各个时期中。太阳能利用装置开始时规模比较小，技术比较简单粗糙，逐步发展到规模较大，技术比较复杂先进的阶段，然后再经过一个新的循环，又达到了一个新的高度。这就是从简单到复杂再到简单的过程，也是一个从量变到质变的过程。是完全符合事物发展的客观规律的。这证明太阳能利用是有发展前途的，虽然目前仍有一些人从经济性的角度对太阳能利用持以否定态度，但从子孙万代的长远利益来考虑，人类利用太阳能的途径是必由之路，历史的发展，也正在逐步显示出太阳能利用的优越性和实用可能性，因此开展太阳能利用的研究是刻不容缓的。

但是在开展太阳能的研究时，必须结合我国的国情，制订一套规划和方针，充分发挥各级领导、科技人员和广大群众的积极性，加速发展我国的太阳能利用工作，为实现四个现代化而做出贡献。

本书共分四章，第一章是概括和综合有关太阳辐射能方面的数据及其应用方法；第二章是对各种聚光式太阳能集热器的机理分析以及运用光学、传热学和工程热力学的原理对各种聚光式集热器的设计和效率的提高进行研究；第三章是介绍各种聚光式集热器的有关材料及其性能等方面的特点；第四章是研究和探讨聚光式集热器的性能测试方法等问题。

本书大部分内容是作者近几年来研究成果的总结，也有部分是作者在历年教学中所编写的讲义，所以一定还存在许多不足之处和难免的错误。但是，我们认为，我国太阳能利用近几年来迅速发展的趋向，不少太阳能利用的专业人员和业余爱好者，迫切需要有关太阳能利用方面的专业基础理论和具体的设计方法等方面的参考书，可是为数甚少。因此，我们本着抛砖引玉的目的，编著此书，以供有关技术人员参考。

第一章 太阳辐射能入射数据及其应用

任何一种物质，除了在绝对温度0K（-273℃）外，都有其分子运动，在分子运动过程中，就会产生以电磁波的方式向四周放射能量，这种能量的放射称为辐射能。

太阳是一个由氢、氦以及少量的碳和其它元素组成的气体球。

它的平均密度是 $1,400\text{kgm}^{-3}$ （相对地球是 $5,500\text{kgm}^{-3}$ ），其中间达 $76,000\text{kgm}^{-3}$ 。它的半径是 $7,000,000\text{km}$ （地球的半径是 $6,400\text{km}$ ）。

太阳的质量占太阳系的总质量的99.85%，是地球质量的33,000倍。

太阳的年龄据估计约为6,000百万年，它可能还要持续这些年才结束。

所以，太阳是一个巨大的炽热的球体，这一热体主要以电磁波辐射的方式（另外还有粒子辐射）射向四周，包括射向地球。在和地面接触的时候，电磁波又重新转变为热能，即为太阳能。

按爱因斯坦（Albet Einstein）的公式： $E = mc^2$

其中： $E =$ 能量

$M =$ 质量

$C =$ 光速（ $300,000\text{kmS}^{-1}$ ）

所以在太阳的中心，核反应作用产生：氢转化成为氦时，每秒可释放四百万吨质能。

在反应中，4个氢→1氦+转换成质量的1/141的能量。

这相当于 $2\text{cal cm}^{-2}\text{min}^{-1}$ 。

再按麦克斯韦尔—波尔茨曼（Maxwell—Boltzman）黑体辐射定律可知，太阳辐射能： $E = \sigma T^4$

其中：

$$\sigma = 4.9 \times 10^{-8} \text{kcal} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} = 5.67 \times 10^{-8} \cdot \text{w} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

$T =$ 绝对温度K（ $K = 273^\circ\text{C} + t^\circ\text{C}$ ）

因为E是太阳氢—氦反应的结果而知道的，则可计算T：

$$T = 5,762\text{K}$$

太阳辐射能传播的速度相当于光速为 $300,000\text{kmS}^{-1}$ 太阳辐射能向外的传播如同光波一样，不必经过任何物质媒介，太阳一刻不停地向四周空间发射出极为巨大的能量，总计为 3.8×10^{23} 尔格/秒。地球上截获的能量仅仅是太阳所发出的全部能量的二十万万分之一，相当于每年输送给地球一百亿亿度电力。

太阳辐射能到达地球上主要转变为热能。所以，太阳辐射能是地球上热能的源泉。地接受来自太阳的能量是 1.68×10^{24} 卡/年（ 5.445×10^{24} 焦耳/年），或为 1.5125×10^{13} 瓩·小时/年，地球上也有从宇宙空间其它星体辐射来的热量，但这些热量与太阳辐射能相比微乎其

微，根据兰格里 (Langley) 估算，地球上由一切星体所供给的热量每分钟内不到0.00001卡，仅占太阳辐射能的一亿分之一，故这部分热量实际可以不计，另外从地球内部传送到地球表面的热量，一年总共不过54卡/厘米²，也只有太阳辐射到地球上热量的二万分之一。

因此，太阳能是丰富的，免费的，用之不尽的。但是它很稀疏地分布在广阔的地球表面上，而且在到达地面时又变化无常，所以在研究太阳能热转换时，首先要研究大气上层太阳辐射能的分布，然后研究在浑浊媒质的大气中所发生的变化，而后再研究地面的辐射情况，从而全面利用太阳能的定量数据加以理论计算和实测的修正。

1.1 太阳常数和太阳辐射光谱的能量

太阳常数，是指日地在平均距离时，大气上界在1分钟内垂直投射于1平方厘米面积上的热通量（以卡为单位），称为常数I₀。根据美国最新测量资料得出，太阳常数值为1,353W m⁻²，1.940cal·cm⁻²·S⁻¹，1,159.9kcal·m⁻²·hr⁻¹，或429Btuhr⁻¹ft⁻² [1]。

决定太阳常数的数值有很重要的意义，因为当我们知道太阳辐射在大气中减弱规律时，便能够根据已知的太阳常数值计算出地面上太阳辐射通量值。

图1.1是大气层外界太阳辐射量的标准曲线，在该标准曲线中不同波长的辐射量差异很大。当太阳辐射在尚未进入地球大气层之前，能量较集中的波段主要是在0.15μ—4μ [2] 之间。它占太阳辐射总能量的99%。

我们知道，电磁波的构成是由短波向长波依次排列为宇宙线，γ射线，X光，紫外光，可见光，无线电波，电波。

电磁波的能量E=hν（h—普朗克常数，ν—电磁波频率），由此可见，电磁波的波长越短，能量越大，波长长，能量小。

太阳光线研究的范围主要是：紫外线，可见光和红外线。

对于太阳辐射全波段积分则可得到太阳常数。另一个方法是根据黑体辐射函数来计算太阳总辐射 (D_λ)。即：

$$D_{\lambda} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda}$$

上述两种计算比较如下：

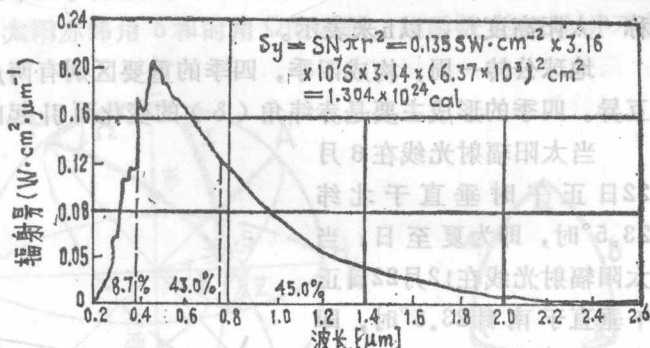
波 长	太阳辐射函数	黑体辐射函数
0~0.38μ	7 %	8.5 %
0.38~0.78μ	47.29%	45.31%
0.78~∞	45.71%	46.1 %

上述数据表明，用黑体辐射函数来研究太阳辐射是可行的。

由于在太阳辐射光谱中不同波长的辐射能力差异很大, 其中最强的能量是位于波长0.475附近。因而反映在太阳辐射的热效应上也各不相同。

太阳辐射一般可认为是0.3~3μ的射线, 它是直射分量和散射分量之和。

图1·2是假设没有大气的情况下, 太阳辐射能到达地球表面的入射量的分布情况, 由此可见, 太阳的入射量是随着太阳的高度变化而变化的。



S_y 为一年内太阳射到地球上的全部能量

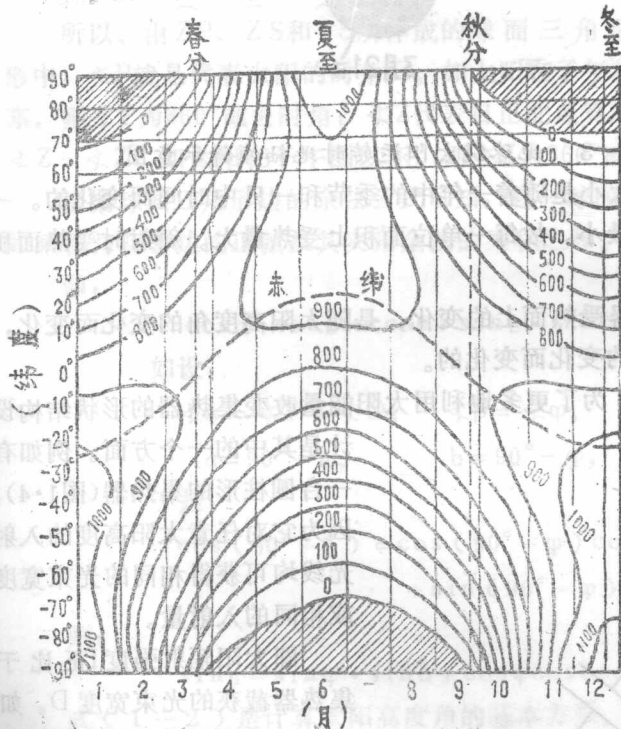
图1·1 地球大气层外界的太阳辐射量NASA / ASTM标准曲线

1·2 太阳高度角和太阳方位角

太阳高度角是太阳辐射测量和太阳能利用研究中不可缺少的基本参量。

众所周知, 地球的自转和公转形成地球上昼夜的变化和四季的变化。

假若先不考虑地球的公转, 那末地球24小时自转一周, 形成昼夜, 地球由西向东自转, 以北半球某一纬度(φ)来说, 太阳东升西落, 太阳辐射光与地面之间随着时



←图1·2 大气层外界入射量的纬度和月份的分布(根据Smithsonian Meteorological Tables 1966)

注: [1] 1 BTU (英国热量单位) = 1.0549×10^{10} 尔格

1 卡 = 4.184×10^7 尔格

1 卡/厘米²·分 = 0.0697 瓦/厘米²

[2] 波长的单位为微米 (micrometer) 以μ代表之: 1μ (微米)

= 10^{-4} 厘米 = 10^{-3} 毫米;

1 mμ (毫微米) = 10^{-7} 厘米 = 10^{-6} 毫米;

1 Å (埃) = 10^{-8} 厘米 = 10^{-7} 毫米;

1 μ = 1,000 mμ = 10 Å

间的变化,产生角度的变化。所以,太阳光线与地平面的交角,即称谓“太阳高度角”或简称“太阳高度”,以 h 来表示。

地球公转一周,构成四季,四季的重要区别有两点:一是温度高低不同;二是昼夜长短互异。四季的形成主要是赤纬角(δ)的变化而引起的(见图1·3)。

当太阳辐射光线在6月22日正午时垂直于北纬 23.5° 时,即为夏至日;当太阳辐射光线在12月22日正午垂直于南纬 23.5° 时,即为冬至日;当太阳辐射光线在3月21日正午时垂直于赤道 0° 时,即为春分日;当太阳辐射光线在9月23日正午时垂直赤道于 0° 时,即为秋分日。

太阳辐射的光线一年中的 δ 是在 $\pm 23.5^\circ$ 之间来回移动,在地理纬度上该二条纬线称之为南北回归线。

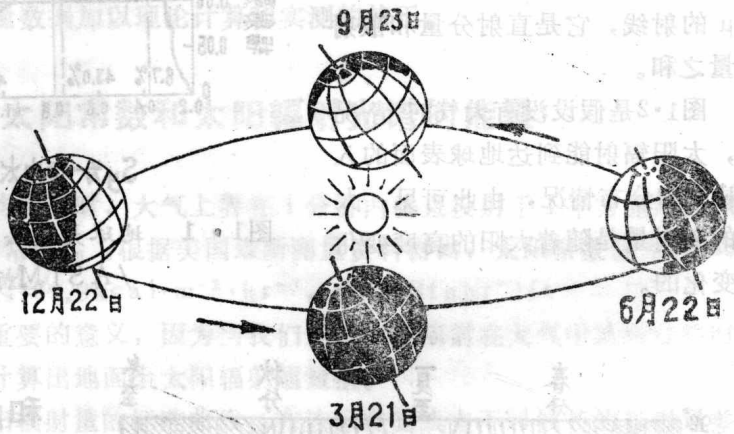


图1·3 地球绕太阳运转时地轴倾斜示意图

因此,在某一地点的太阳高度角的大小是随着一年中的季节和一日中时间而变化的。一定量的太阳辐射光束,直射时受热面积最小。故每一单位面积上受热量大。斜射时受热面积较大,则每一单位面积上受热量小。

所以,太阳辐射能到达太阳能集热器受热面上的变化,是随太阳高度角的变化而变化,而太阳高度角又随纬度、赤纬角和时角的变化而变化的。

根据太阳高度在一天中的变化规律,为了更多地利用太阳能改变集热器的形状结构设计是其中的一个方面。例如有一台圆柱形的集热器(图1·4),因为它对任意太阳高度的入射光线均可获得相同的光束宽度或相同的入射量。

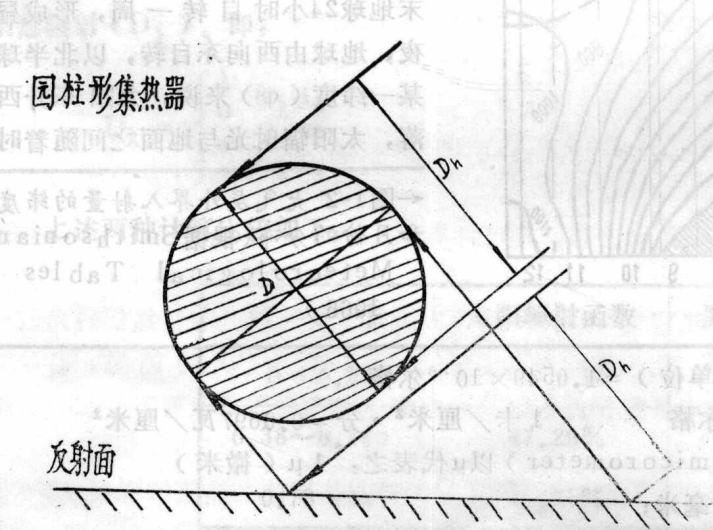


图1·4 用增加反射面来增加太阳辐射通量

设计是其中的一个方面。例如有一台圆柱形的集热器(图1·4),因为它对任意太阳高度的入射光线均可获得相同的光束宽度或相同的入射量。

即太阳辐射强度 I 正比于集热器截获的光束宽度 D 。如果,进一步在这个圆柱形集热器的下面放置一块热反射面的话,则当太阳斜射时,太阳辐射量不但无损,而且尚可增加一倍。由此可见,掌握太阳高度角的变化规律,对于设计各种太阳能集热器时,具有极为

重要的意义。

太阳高度角 h 是为地理纬度 φ 、太阳赤纬角 δ 和时角 Ω 的函数。此函数的推导并不复杂。

我们假定宇宙空间是一个无限大的天球(图1.5), O 点为天球的中心, 即观测者的位置(观测点的纬度为 φ), HH' 为地平线, AA' 为赤道线, Z 为天顶, P 为北极, S 为太阳的位置, 于是

$$\widehat{ZP} = 90^\circ - \varphi,$$

$$\widehat{ZS} = 90^\circ - h,$$

$$\widehat{PS} = 90^\circ - \delta.$$

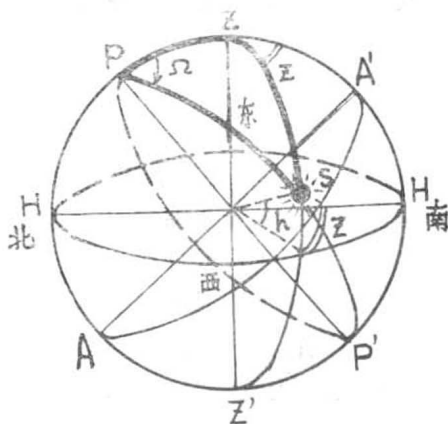
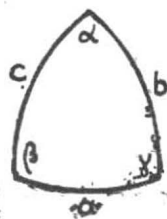


图 1.5 (1) 天球



(2) 球面三角形

所以, 由 $\widehat{ZP}$ 、 $\widehat{ZS}$ 和 $\widehat{PS}$ 所作成的球面三角形 PZS 就是所谓的天文三角形。在此三角形中, $\angle P$ 就是代表太阳的时角 Ω , 如太阳在子午圈以西, 则 $\angle P = \angle P$, 如太阳在子午圈以东, 则 $\angle P$ 为 360° 减去时角; $\angle Z$ 代表自正北点算起的太阳方位角, 如太阳在子午圈以西, 则 $\angle Z = \angle Z$, 如太阳在子午圈以东, 则 $\angle Z$ 为 360° 减去方位角。

根据球面三角形边的余弦公式可知: 在一球面三角形中, 一边的余弦等于两邻边的余弦的乘积与两邻边的正弦及其夹角余弦的乘积之和。

即:

$$\cos a = \cos b \cdot \cos c + \sin b \cdot \sin c \cdot \cos \alpha \quad (1-1)$$

如设:

$$\angle \alpha = \angle P = \angle \Omega; \quad \angle \beta = \angle \varphi, \quad \angle \gamma = \angle Z$$

$$a = 90^\circ - h, \quad b = 90^\circ - \varphi, \quad c = 90^\circ - \delta$$

于是:

$$\begin{aligned} \cos(90^\circ - h) &= \cos(90^\circ - \varphi) \cos(90^\circ - \delta) \\ &\quad + \sin(90^\circ - \varphi) \sin(90^\circ - \delta) \cos \Omega \end{aligned}$$

则:

$$\sin h = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \Omega \quad (1-2)$$

式(1-2)是计算太阳高度角的基本方程, 其中太阳高度 h 是由该地的纬度 φ , 太阳赤纬角 δ 和时角 Ω 规定的。

此外, 根据球面三角形的正弦公式和第一个含五元素的公式可推算出求太阳方位角 $\angle Z$ 的公式, 即:

$$\sin Z = \frac{\cos \delta \cdot \sin \Omega}{\cos h} \quad (1-3)$$

$$\cos Z = \frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cdot \cos \Omega}{\cos h} \quad (1-4)$$

在式(1-2)(1-3)(1-4)中, h 是太阳高度角, φ 是地理纬度, Ω 是时角, 它以正南为 0° , 每小时为 15° , 用角度表示时间, δ 是日赤纬, 它在一年中除二分、二至日外, 其它时间均在变化。其变化值, 一般情况下可查当年天文年历, 也可采用下列近似的公式加以计算的:

$$\delta = (23 + \frac{27}{60})^\circ \sin(\frac{360d}{365.25}) \quad (1-5)$$

其中 d 表示由春分日(北半球)数起到第 d 日的天数。

时间角度 Ω 的变化, 是指在赤道上从子午圈与时圈(经天球两极的大圈)间的弧, 自子午圈向西(顺时针)量之(自0时至24时, 或自 0° 至 360°), 这称为真太阳时, 在需要精确的计算时还必须加上对于地方时或平太阳时的订正。一般情况下, 在真正午时(当地12点整) $\Omega = 0^\circ$, 从事太阳能研究工作者, 一致约定把时角上午取负值, 下午取正值, 每小时相当地球自转 15° , 所以假如在没有大气层时, 最大的太阳辐射发生在 $\Omega = 0^\circ$ 和 $\varphi = \delta$ 时, 这时 $h = 90^\circ$, 则

$$\sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta = \cos(\varphi - \delta) = 1$$

显然, 最小的太阳辐射发生在 $h = 0^\circ$ (太阳处在地平线处)则:

$$\sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\Omega = 0$$

即,

$$\cos\Omega_0 = -\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta \quad (1-6)$$

在春秋二分(时 $\delta = 0$), 则式(1-2)为:

$$\sin h = \cos\varphi \cdot \cos\Omega$$

所以在春秋分时, 太阳高度(h)只随纬度与时间而变化, 如果在中午时, 时角 $\Omega = 0$, 则:

$$\sin h = \cos\varphi$$

所以纬度愈高, 则中午太阳高度 h 愈小。在春秋分以外的正午时, 则:

$$\sin h = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta = \cos(\varphi - \delta)$$

但是, 在研究工作者实际应用时, 往往使用的不是真太阳时, 而是用当地的时间, 这主要是由于你所居住的地方之经度与当地标准时间所依据的经度数之间有所差别。

如, 中国北京时间是根据东经 120° 所定, 而兰州与其差就较大, 于是就出现了时差, 要修正得到当地的太阳时间可按下面方法计算。

即: 当地太阳时间 = 修正后标准时间 + 时差

$$\text{修正后的标准时间} = \text{当地标准时间(手表时间)} \pm \frac{4 \text{ 分钟}}{\text{度}}$$

$$\times | \text{当地经度} - \text{当地标准时间根据的经度} |$$

上式中时差修正需要查图或查表。

在计算太阳高度角和太阳方位角时, 可根据 φ 和 δ , 把 $\sin\varphi \cdot \sin\delta$ 与 $\cos\varphi \cdot \cos\delta$ 制成表, 然后籍助此表可用计算尺很迅速地计算出来。此外, 还可以藉助计算图表或作图方法算之, 不过其精度较低。