

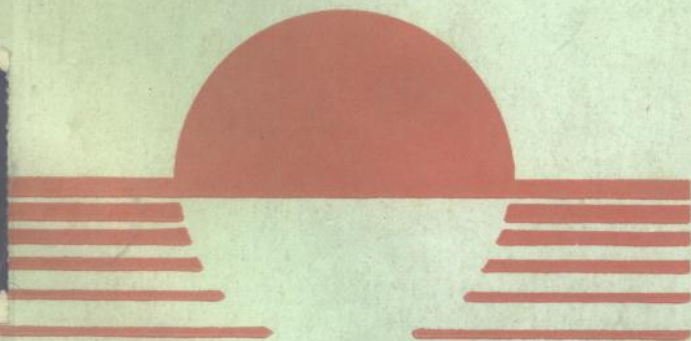
太阳能热利用原理与计算机模拟

高等学校教材

太阳能热利用原理 与计算机模拟

张鹤飞 主编

西北



西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书系统地论述了太阳能热利用的基本原理,并介绍了我国近年来在热利用方面的进展。

首先介绍了国内外太阳能利用的发展趋势;讨论太阳辐射的性质和计算方法,汇总有关太阳能利用中的传热知识;重点分析平板型和聚集型集热器的原理和性能,介绍热储存原理及热水系统、热动力与热发电、制冷空调和供暖、海水淡化等太阳能热利用的实用系统。最后介绍了太阳能系统性能的计算机模拟。

本书可作为大专院校有关专业的本科及研究生教材,可供太阳能热利用、能源工程、动力机械、环境保护、建筑和农业等科技部门的科研、工程技术人员参考。

2R66/27 16

高 等 学 校 教 材

太阳能热利用原理与计算机模拟

主 编 张鹤飞
责任编辑 王 璐
责任校对 樊 力

西北工业大学出版社出版
(西安市友谊西路 127 号)
陕西省新华书店发行
西北工业大学出版社印刷厂印装
ISBN 7-5812-0245-8/TK·1(课)

开本 787×1092 毫米 1/16 16.75 印张 410 千字
1990 年 3 月第 1 版 1990 年 3 月第 1 次印刷
印数: 1—2000 册 定价: 3.35 元

前 言

太阳能是一种巨大而无污染的可再生能源。伴随人类的出现,开始了利用太阳能的漫长过程,直接利用低密度的太阳能只是近代的事。究其原因,它和科技发展的综合水平有紧密的关系。太阳能利用有光热、光电、光化学等多种形式。本书主要阐述热利用的基本原理,着重论述太阳能系统的热性能分析和设计计算方法。

全书共有十一章,内容可分为三部分。第一章至第六章为基础理论,第七章至第十章为实用部分,第十一章自成体系,可看成全书的总结。基础部分包括绪论、太阳辐射性质及计算方法、太阳能利用中所需的传热知识,第四、五两章用许多篇幅讨论平板型和聚集型集热器的原理及性能,为设计打好基础,这是全书的重点,此外还涉及太阳能热储存原理。实用部分有太阳能热水系统、热动力与热发电、制冷、空调、供暖和海水淡化等内容。实用部分力求反映我国在太阳能热利用方面的进展。对太阳能系统性能的计算机模拟国内外发展很快,为此我们编写了第十一章。

目前,许多国家已在大学里开设太阳能利用课程。本书适用于高等工业学校高年级学生选修及作为研究生的太阳能热利用教材。张鹤飞担任本书的主编,第三、五、六章由俞金娣编写,第八章由赵承龙编写,其余由张鹤飞完成。在第九章中有关国内制冷研究情况的举例,摘录自岑幻霞的文章^[35]。还引用了拉凡教授1985年在西北工业大学讲学的内容,也涉及笔者多年来的心得体会和研究成果。全书由西安交通大学陈丹之教授负责审稿。

限于编者水平,书中缺点和错误在所难免,衷心欢迎读者批评指正。

编 者

1989年2月

主 要 符 号 表

A	面积, m^2	l	长度
A_c	集热器面积, m^2	m	质量, kg; 大气质量
A_s	采光面积, m^2	$\dot{m}$	质量流率, kg/s
A_r	吸收器面积, m^2	n	折射率; 一天中出太阳的小时数
C	聚光比 (集中比)	N	覆盖层数; 昼长; 蛇形管短阵微分方程的阶数
C_p	定压比热容, kJ/(kgK)	p	压力 (压强), Pa
C_1, C_2	普朗克第一和第二常数	Q	热流量, W; 热量, J
C_b	结合处导热系数	q	热流密度 (热通量), W/m^2
D	直径, m	r	半径, m; 汽化潜热, kJ/kg
E	辐射能力, W/m^2	r_d	一小时内的散射辐射与全天散射辐射之比
F	控制函数	r_t	一小时内的总辐射与全天总辐射之比
F'	集热器效率因子	R	斜平面上的总辐射与测量平面 (通常为水平面) 上总辐射量之比
F''	集热器流动因子	$\bar{R}$	R 的月平均值
F_R	集热器热迁移因子	R_b	斜平面上的直射辐射与测量平面 (通常为水平面) 上直射辐射之比
$F_{R,i}$	集热器—换热器修正因子	$\bar{R}_b$	R_b 的月平均值
F_{i-j}	由 i 面发射到达 j 面的形状因子	R_d	斜平面上的散射辐射与测量平面 (通常为水平面) 上散射辐射之比
$\mathcal{F}$	太阳能年保证率	S	单位面积上吸收的太阳能, J/m^2
f	太阳能月保证率	T	温度, K
G	辐射能的通量密度 (辐照度), W/m^2	U	传热系数, $W/(m^2K)$
g	重力常数	v	比容, m^3/kg
H	一天内照射在单位面积上的辐射能, J/m^2	W	管子间距, m
I_{so}	太阳常数, W/m^2	α	吸收率
h	换热系数, (W/m^2K); 普朗克常数	β	倾斜角
K	消光系数	γ	表面方位角; 连接厚度
$K_{\tau\alpha}$	入射角修正系数	γ_s	太阳方位角
K_T	日晴空指数	δ	赤纬角; 厚度, m
$\bar{K}_T$	月平均晴空指数	δ_{ij}	delta 函数: 当 $i=j$ 时 $\delta_{ij}=1$ 当 $i \neq j$ 时 $\delta_{ij}=0$
k	导热系数, $W/(mK)$; 玻耳茨曼常数		
k_T	小时晴空指数		
L	径度; 长度; 距离; 损失; 负荷		

ε	发射率	ν	运动粘度, m^2/s
η	效率	ρ	密度, kg/m^3 ; 反射率
θ	入射角	σ	斯蒂芬玻耳茨曼常数
θ_c	CPC 接受半角	τ	透射率; 时间, s
λ	波长, μm	ϕ	纬度
λ_c	选择性表面的临界波长	ω	时角; 立体角
μ	动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$	ω_s	日落 (或日出) 时角

脚标

a	空气; 环境; 吸收; 采集; 年	n	法向; 中午
b	黑体; 直射; 连接 (焊接)	o	总的; 出口; 大气层外
c	集热器; 临界; 覆盖; 修正	p	板
d	扩散; 全天	r	辐射; 反射; 吸收器
e	有效; 当量; 边界	s	储存; 日落; 光谱; 散射
f	肋; 流体; 燃料	T	倾斜
g	玻璃; 地面; 盖板	t	顶部
i	入射; 进口; 内部	u	有用
l	损失	w	风
m	运动; 平均; 最大	z	天顶

目 录

主要符号表	1
第一章 绪论	1
§ 1.1 能源和太阳能	1
§ 1.2 太阳能的性质	3
§ 1.3 太阳能利用展望	3
§ 1.4 本课程的内容与特点	7
第二章 太阳辐射	8
§ 2.1 太阳和地球	8
§ 2.2 太阳常数和辐射光谱	11
§ 2.3 与太阳辐射有关的名词和符号	13
§ 2.4 集热面上太阳入射角的计算	15
§ 2.5 地球大气层外水平面上的太阳辐射	20
§ 2.6 大气层对太阳辐射的影响	22
§ 2.7 太阳辐射量的计算	29
§ 2.8 水平面与倾斜面上辐射量的比较	36
§ 2.9 集热器的最佳方位	39
第三章 与太阳能有关的传热问题	42
§ 3.1 导热	42
§ 3.2 对流换热	45
§ 3.3 辐射换热	57
§ 3.4 传热系数	71
第四章 太阳能平板集热器	73
§ 4.1 平板集热器综述	73
§ 4.2 集热器面盖的性能	75
§ 4.3 选择性涂层	81
§ 4.4 集热器总传热系数	87
§ 4.5 平板集热器性能	92
§ 4.6 空气集热器	107
§ 4.7 带蛇形管吸热板的集热器性能	110

第五章 聚集体太阳能集热器	121
§ 5.1 引言	121
§ 5.2 理论太阳影象	123
§ 5.3 聚集体集热器的聚光比	124
§ 5.4 复合抛物面聚集体集热器	132
§ 5.5 菲涅尔折射式集热器	139
§ 5.6 聚集体集热器的热性能	143
第六章 太阳能的热储存	147
§ 6.1 显热储存	148
§ 6.2 相变储热	156
§ 6.3 化学储热	159
第七章 太阳能热水系统	161
§ 7.1 太阳能热水器的种类	161
§ 7.2 集热器串装后的性能计算	163
§ 7.3 强迫循环太阳能热水器	165
§ 7.4 自然循环太阳能热水器	168
§ 7.5 直流式太阳能热水器	169
§ 7.6 太阳能热水器的温控装置	172
§ 7.7 太阳能暖房设计概况	174
§ 7.8 热水器设计注意事项	177
第八章 太阳能热动力与热发电	180
§ 8.1 太阳能热动力系统原理	180
§ 8.2 太阳能热机	182
§ 8.3 太阳能热发电	188
第九章 太阳能制冷	193
§ 9.1 制冷负荷	193
§ 9.2 被动式太阳能制冷	196
§ 9.3 太阳能蒸汽喷射式制冷机	197
§ 9.4 吸收式制冷原理	198
§ 9.5 吸收式制冷机举例	202
§ 9.6 干燥去湿制冷系统	205
第十章 太阳能海水淡化	210
§ 10.1 常规太阳能蒸馏原理	210

§ 10.2 利用潜热淡化海水的原理	213
第十一章 太阳能系统性能的计算机模拟	221
§ 11.1 部件模型	221
§ 11.2 集热器加热交换器的修正因子	222
§ 11.3 集热器考虑管路损失的修正因子	224
§ 11.4 系统控制	225
§ 11.5 气象数据与负荷	227
§ 11.6 系统模型	228
§ 11.7 模拟结果	230
§ 11.8 TRNSYS 程序的概念和设计特点	232
§ 11.9 TRNSYS 程序的算例	237
附 录	242
附录 1 公式 (2-33) 中用到的气候常数	242
附录 2 单位换算关系	243
附录 3 某些材料的物性	246
参考文献	253

第一章 绪 论

§ 1.1 能源和太阳能

日常生活和社会生产都离不开能源。人们通过直接或间接利用某些自然资源得到能。因而,把具有某种形式能量的自然资源以及由它加工或转换得到的产品统称为能源。前者叫自然能源或一次能源,如矿物燃料,植物燃料,太阳能,水能,风能,海洋能,地热能 and 潮汐能等。后者叫人工能源或二次能源,如电能,蒸汽,煤气,焦炭,各种石油制品和可燃的化工产品等^[1]。通常又把可再生的自然能源称为新能源,其范围包括太阳能,生物质能,风能,地热能和海洋能等。矿物燃料(煤,石油,天然气等)又称为常规能源。

值得注意,几乎所有的自然能源,从广义的角度看都来自太阳能。由大气、陆地、海洋、生物等所接受的太阳能是各种自然能源的源泉。矿物燃料是古生物长期沉积在地下形成的,它来源于远古的太阳能。水的蒸发和凝结,风、雨、冰、雪等自然现象的动力也是太阳,因而水能、风能归根到底都来自太阳能。生物质能是通过光合、光化作用转化太阳辐射能取得的。由于太阳和月球对地球上海水的吸引作用产生潮汐能。

能源的生产和消耗与整个国民经济以及人民生活水平有着紧密的关系。西方国家衡量生活水平的主要标志是国民生产总值。图 1-1 给出美国 1909—1973 年间,人均年国民生产总值和人均年能耗量的变化趋势^[2]。不难看出,两条曲线的变化趋势很一致,在大量能耗基础上建立起美国国民生产总值的高水平。美国人口只占世界总人口的 6%,矿物燃料储量占世界的 20%,而消耗的矿物燃料却占世界总消耗的 35%。严格控制人口增长率和大力发展能源工业是提高国民经济和人民生活水平必须采取的重要措施。

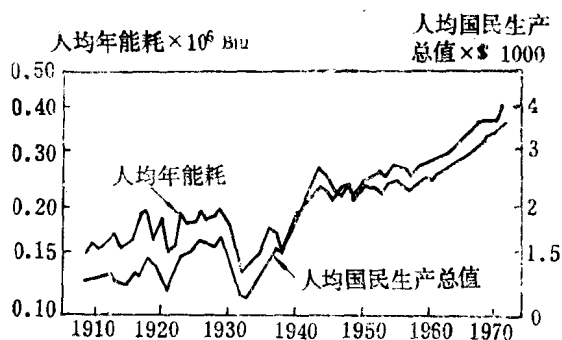


图 1-1 国民生产总值和能源消耗关系曲线

现代社会的五大自然能源来自煤、石油、天然气、水力和原子能。图 1-2 是我国和美国能源类型和使用部门的划分图。

石油、天然气是美国的主要能源(71.9%)。我国则主要用煤(70.3%)，这种趋势还将长期持续下去。我国工业部门消耗的能源最多(69.4%)，而美国按使用部门划分的能耗有逐渐接近的趋向，也就是工业部门能耗减少，民用、商业建筑、交通运输上的能耗逐渐增加。该图反映两国在能源生产和消费结构上的差别。

美国的能源结构在一百多年内发生了很大的变化^[3]。1850 年所消耗能源的 90% 来自木

材，煤只占10%；1910年所消耗能源的80%是煤；到了1970年石油和天然气的消耗超过75%，这一年美国石油、天然气和木材的产量都已接近峰值。应当指出，石油、天然气不仅是高级燃料，更是化工产品的重要原料，它们的大量开采和利用使世界经济得到迅猛发展。从上面的简单回顾可以看出，主要能源从一种转到另一种在美国约需60年时间，可以预料60年左右石油就会枯竭（按最新发现的储量估计石油可继续开采80年）；煤按现有开采率估计也只能维持一百多年。常规能源从18世纪工业采煤算起，最多能供人类使用四五百年，这和人类历史相比只是短暂的一瞬间。矿物燃料耗尽后怎么办的问题严肃地摆在各国科学家面前。1973年阿拉伯石油禁运使油价猛涨四倍，能源危机像风暴一样席卷整个西方世界，促进人们认真探讨长远的能源战略。提高能源利用率，节省常规能源，大力发展核能（包括核聚变）和新能源是比较一致的看法。

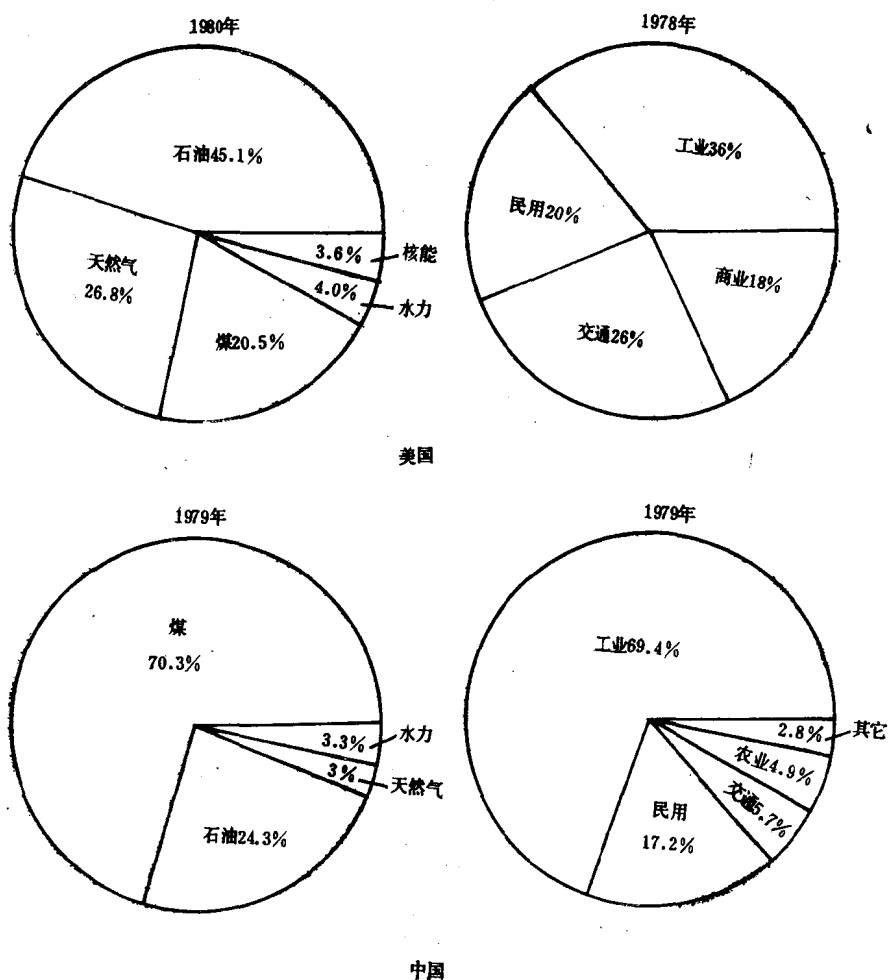


图 1-2 能源划分图

高性能的电气产品能耗只相当于老产品的一半。假如把美国所有冰箱都换成现在生产的高效节电产品，节省的能量相当于15个大规模原子能发电厂发电量的总和。加强房屋围护的绝热性能，减小门窗的空气渗透量，用于采暖的热量可减少一半左右。从图1-2中能源消费

结构来看,用于民用和商业建筑采暖及空调的能量占总能耗的比例很大,美国为38%,中国为20%(民用+其它),这部分能量原则上可由太阳能来替代。工农业用能其中一半左右只要求低温热水,也可用太阳能。尽管两国消费结构差别很大,但是太阳能的潜在替代率几乎相同(56%左右)。太阳能的开发利用和节能是同义语,是一个问题的两个方面。毫无疑问,太阳能必然会在未来能源中占有重要的地位。

§ 1.2 太阳能的性质

世界上最丰富的永久能源是太阳能。地球截取的太阳辐射能通量为 $1.7 \times 10^{14} \text{ kW}$,比核能、地热和引力能储量总和还要大5000多倍。其中约30%被反射回宇宙空间;47%转变为热,以长波辐射形式再次返回空间;约23%是蒸发、凝结的动力,风和波浪的动能,植物通过光合作用吸收的能量不到太阳能的0.5%。地球每年接受的太阳能总量为 $1 \times 10^{18} \text{ kWh}$ 。这相当于 5×10^{14} 桶原油,是探明原油储量的近千倍,是世界年耗总能量的一万余倍。

太阳的能量是如此巨大,正如通常所说的“取之不尽、用之不竭”,但是太阳辐射能的通量密度较低,大气层外为 1353 W/m^2 。太阳光通过大气层时会进一步衰减,还受到天气、昼夜以及空气污染等因素的影响。因而,太阳能又呈间歇性质,时高时低,时有时无。能通量密度低要求太阳能利用装置有较大的集热面积;为了克服太阳能供热的间歇性,系统中必须加有储热装置,这些都使太阳能利用系统的初投资变得昂贵。由于生活和部分工业用能只要求供应低温热水,采用太阳能很容易做到热能能级的合理匹配,从而取得最佳效益。综上所述,太阳能利用具有以下明显的特点:

- (1)总能量很大,但能通量密度较低;
- (2)是可再生的能源,但又具有间歇性;
- (3)无污染的清洁能源;
- (4)太阳能本身是免费的,有效利用它的初投资较高;
- (5)太阳能热利用较容易实现热能能级的合理匹配,从而做到热尽其用。

§ 1.3 太阳能利用展望

一、历史的回顾

据史料记载,早在西周时代(公元前11世纪)我们的祖先就已经掌握了“阳燧取火”的技术。“阳燧”实际上是一种金属凹面镜。这是最早利用太阳能的历史记录,也是一项杰出的发明,在世界科学史上占有重要的地位^[4]。

第一个大规模应用太阳能的人,是希腊著名科学家阿基米德。公元前212年,他用许多小的平面镜将阳光聚集起来烧毁了攻击西西里岛西拉修斯港的罗马舰队。1973年希腊科学家伊奥尼斯·萨克斯用实验验证了这种说法。

公元1世纪罗马发明了玻璃,这是对人类生活和利用太阳能有深远影响的发明^[5]。2世纪罗马法律规定公民享有使用阳光的权力。由此可以判断,用阳光取暖在当时就很普遍。对太阳进行认真的研究,应该从17世纪意大利著名科学家伽利略算起。不久,有人用太阳能

熔化钻石,18 世纪初发明了用太阳能驱动的发动机。20 世纪初智利建立了太阳能蒸馏水厂,埃及成功地运行了灌溉用的太阳能水泵。

1920—1930 年,美国加州地区开始用太阳能集热器为用户供应热水。类似的装置也可用于房屋取暖,1938 年美国麻省理工学院建成了第一座用太阳能采暖的建筑。从这以后到1960 年,世界上建成 20 座试验性建筑,由它们得到的实测数据,为今天的太阳房设计奠定了良好基础。

空间时代给太阳能开发利用带来了新的活力。太阳能电池为卫星、宇宙飞船供电的成功,使科学家大胆提出许多利用太阳能的新方案。如建立大型地面太阳能热电厂。有人还建议在空间建造太阳能电站,以微波形式发射到地面,再在地面将微波转换为电能,以及用阳光产生的微小压力作为星际飞行器的动力等。有些设想已经实现,有些由于规模太大,投资太高尚未能实现。但是在探索新方案过程中产生的一些技术,已成功地应用在许多方面。

1973 年爆发的能源危机,促使美国政府着手组织有关节能和寻找替代能源的宏伟计划,这是有史以来,对太阳能利用和研究的最大促进。1975—1985 年 10 年间,美国政府在太阳能研究计划上化了 60 亿美元,40 亿用于开发研究,20 亿用于减税。太阳能利用已由实验阶段走向千家万户。这一时期的显著特点是:

(1) 国家重视。把太阳能的开发利用放在战略地位上考虑,试图用新能源作为部分替代能源,对太阳能、风能、地热和海洋能的利用寄予巨大希望。1978 年卡特总统宣布,到 2000 年美国总能源的 20% 将由太阳来提供。与此相适应,许多著名的国家实验室和大学都承担了重要课题。以国家级太阳能研究所为中心,成立了中部、东北部和西部的太阳能情报网络,并在每个州都设有专管太阳能的机构。

(2) 在新能源的各个领域全面开展了研究,涉及的范围有^[6]:

太阳能空间加热和空调(被动和主动系统);

太阳能热发电;

太阳能光发电;

太阳能制冷;

海洋热能发电;

波浪和潮汐发电;

风力发电;

生物质能;

地热能;

残余物的高温分解(气化)。

(3) 已形成有一定竞争能力的太阳能行业,建立起一批技术先进、规模较大有示范推广意义的系统。

到 1984 年,已有热水器 80 万套,约有 100 万户装有被动式太阳能利用装置。1982—1985 年三年间仅在加州就有 8000 个商业用风机投入使用,总发电量为 600MW。生物质能约占总能耗的 5%,其中 1/3 来自木材。再生能源已能提供全美总能源需求的 10%。

新墨西哥州桑迪亚国家实验室首先建成 5000kW 定日镜——塔式热发电厂。在此基础上,加州 Barstow 城建成功率为 10000kW 的发电站。它由 1800 面定日镜组成,要求能为 6000 户供电,实际使用能满足 7000 户家庭的需要。

NASA 建成 2000kW 的风力发电厂。

丹佛公共学院建成大型太阳能热泵供暖系统, 房屋建筑面积为 27870m^2 , 平板集热器面积为 3344m^2 [7]。

明尼苏达州 Control Data 公司厂房面积为 24340m^2 , 屋顶安装 2312m^2 抛物槽型集热器, 为整个建筑空调提供热源。试验表明, 除保证全年热水供应外, 还能满足冬天取暖负荷的 60%, 夏天空调负荷的 30%, 比达到同样要求的常规建筑节能 $3/4$ [8]。

1984 年太阳能光电池的定单是 18.5MW。

夏威夷群岛是用再生能源的典型。电力中的 10% 来自风力发电, 40% 是利用甘蔗渣得到的。各种新能源都得到了广泛的利用。

二、我国近年来太阳能利用的发展

我国能源从总体上说相当丰富, 水力资源理论储量居世界第一, 煤炭居世界第三, 石油居第八, 天然气为第十六位, 还有许多资源尚待进一步探明。我国是 10 亿人口的大国, 按人口平均资源又相当不足, 尽管国家把发展能源放在优先的地位, 由于耗资巨大, 基础较差, 我国能源供应的紧张状态将会延续相当长的时间。只有充分认识这一点, 才会更加珍惜和有效地利用常规能源。也正是由于这一点, 近几年来我国新能源的开发利用取得较大进展 [9]。

太阳能集热器是太阳能热利用中最基本的部件, 技术上成熟, 应用范围相当宽广。据初步统计全国已有 100万 m^2 热水器在运行, 北京地区约有 20万 m^2 , 部队装备约 12万 m^2 。全国已有 100 多个生产厂家, 北京太阳能研究所从加拿大引进铜铝复合太阳能集热器生产线, 年产能力为 15万 m^2 。按每米²集热器每年节约标准煤 200kg 计算, 全国集热器的年节煤能力为 20 万 t 标准煤。

太阳灶是利用太阳辐射能进行炊事活动的一种装置。由于结构紧凑, 工艺简单, 造价低廉, 使用方便等优点, 在能源紧缺的农村很受欢迎。据不完全统计, 1986 年全国太阳灶拥有量为 10.3 万台, 数量上已居世界领先地位 [10]。

被动式太阳房是通过合理的建筑设计, 使建筑物本身具有集热器、储热器和散热器的综合特性, 从而部分满足冬暖夏凉的要求。北京地区典型实测数据表明, 没有辅助热源情况下, 采暖季太阳房室内平均温度为 $9\text{—}12^\circ\text{C}$ 左右, 夏季比普通房屋降温 1°C 多, 节能率在 60% 以上, 投资比普通建筑增加 15—25%。据初步统计全国已有太阳房 350 幢左右, 总建筑面积约 12万 m^2 。

利用太阳能干燥工农业产品是容易取得经济效益的项目, 选择价值较高的商品作为干燥对象, 经济效益更加明显。在干燥木材、药材、干果、橡胶和混凝土养护等许多方面都已取得成果。太阳能制冷、动力机等方面, 仍属于小型、试验性质, 基本上处于实验室阶段。

太阳电池是我国太阳能利用中开发较早、技术要求较高的项目, 也是技术上军转民的典型例子。太阳电池是利用半导体材料将太阳光直接转换成电的器件。我国于 1958 年开始研制供人造卫星使用的硅太阳电池, 1971 年 3 月正式用于我国发射的第二颗卫星, 经过 8 年空间运行的考验, 证明太阳电池系统性能良好。直至 1979 年 6 月卫星坠毁时电池仍正常工作, 地面还能收到机载发射机的信息 [11]。缺电的边远地区是推广应用太阳电池的广阔天地。据初步统计, 在铁路信号、航标、农牧设备、广播、电视、通讯、家用电器、计算器、照明

和仪器、仪表等行业已开发的产品不下于 100 种。1985 年在新疆阜康县已建成我国第一座太阳能实验电站,其发电能力为 5000W。云南半导体厂从加拿大 TPK 国际太阳能系统公司引进年产 500kW 的单晶硅太阳能电池生产线。哈尔滨从美国克罗拉公司引进大面积非晶硅太阳能电池生产线,芯片面积有 $304 \times 304\text{mm}$ 和 $304 \times 912\text{mm}$ 两种,年产能力为 1000kW。技术引进使我国太阳能电池生产的数量、质量都有明显的提高,但影响进一步推广使用的关键问题仍然是价格过高。

生物质能在再生能源中占重要地位。吸收太阳能的生物通过光合作用形成的物质叫生物质,它所具有的能量叫生物质能。生物质包括的范围很广,如农业和林业产物及其衍生物,甚至包括城市及工业垃圾等。生物质能利用方法有直接燃烧、热化学(热解、气化)、发酵、沼气化等 4 种。据统计 1983 年我国能使用的小沼气池约有 500 万个,数量上已居世界领先地位,提供的能量相当于每年节省 80 万吨标准煤。近年来,在城镇及农牧场沼气应用方面取得较大进展,利用工业废物和人畜粪便建立的大、中型沼气工程已有 1000 多处。陕西惠安化工厂、上海金山酒厂、南阳酒糟厂等利用工业废料建成大型沼气池。金山酒厂采用新培育的高温厌氧菌种,将酒糟废液在 64°C 下高温发酵,三级处理,滞留期四天,生产操作全部自动控制。沼气可供该县城关 1.2 万户居民生活用气。南阳厂扩建工程年产气可达 1200万 m^3 ,沼气可供南阳市 50% 人口使用。稻壳气化发电,木材气化以及城市垃圾的利用都已取得可喜的成果^[12]。

风能也是一种变相的太阳能,在风力资源丰富的地区应很好地利用。我国南方沿海一带,古代就用风车车水。1959 年江苏仍有 20 万台传统风车,1962 年减少至 13 万台,遗憾的是至今已寥寥无几。用风驱动的帆船更是我国的传统技术。我国 10m 高度处的风能总储量约为 $1.6 \times 10^{12}\text{W}$,但地域差别十分明显。东南沿海及其岛屿是我国风能资源最丰富的区域,全年出现有效风速($3\text{—}20\text{m/s}$)高达 6000—8000h,有效风能密度大都在 200W/m 以上。目前,我国已推广应用百瓦级的小型风力发电机 15000 多台,其中内蒙有 13000 多台,占全国总数的 90%。全国已有几十家风力机制造厂,由于风能是一种随机能源,风机的输出一般呈不稳定状态。要有效利用风能必须将变速、恒频、发电设备、蓄电池以及并网技术进行综合配套研究。研制出性能稳定、寿命长、成本低的风力发电机组仍是推广应用的关键^[13]。

利用太阳能另一可能的形式是海洋温差发电。这是一种古老的设想,从海洋表面的温水和 500—900m 下的低温海水间提取能量。系统效率为 3—5%。它能带动以氨作介质的朗肯循环发动机为近海地区供电,也可用它在平台上生产很耗能的铝等。波浪拥有巨大的能量,但迄今为止还没有能很好利用波浪能的发电机组。潮汐发电站已在一些地区运行。法国 Brittany 潮汐电站有 12 套 240MW 的机组一直在运行发电。我国从 1958 年就开始潮汐电站的试验,先后建成十几个小型电站,其中江夏电站稍大为 3000kW。有些电站注意了对建站形成海涂的综合开发利用,取得了较好的经济效益。

上面简要介绍了我国太阳能开发利用的情况,其中包括太阳能热利用和光电利用,以及由太阳能演变得到的自然能源的利用情况,前者是太阳能的直接利用,后者指广义太阳能的开发利用。

近几年来,由于国际石油价格的下跌,西方世界掀起的利用太阳能的热潮出现明显回降的趋势。我国不仅没有受到这种萧条景象的波及,太阳能的利用在“六五”期间反而有了较大进展。仅用太阳能热水器推广应用量为例,每年以 14—32% 的速度递增。全国从事太阳

能研究的科研单位包括大学已发展到 138 个, 生产厂 100 多家, 几乎所有的省、市、自治区都已开展太阳能利用的工作。一些大学开设了太阳能利用课程, 以太阳能利用为题的毕业设计或研究生论文也为数不少。可以预料, 在我国能源长期紧缺的形势推动下, 太阳能利用的前景是美好的, 特别在广大农村更会以较快速度发展。

§ 1.4 本课程的内容与特点

直接利用太阳能的形式有光热、光电、光化学三种, 本课程仅涉及太阳能的热利用。将太阳辐射能直接转化为热能, 以满足人们需要的学科称为太阳能热利用工程。它是能源科学的一个组成部分, 是热能工程的一个分支。着重研究利用热媒介(水、空气或其它介质)在集热器中将太阳辐射能转化为热能, 用它作为热源通过储热装置或转换设备输送到热用户的工程技术。热用户可以是供热水、供暖、制冷、空调、干燥、海水淡化、动力、发电等多种用途。

全书共有十一章, 内容可分为三部分。第一至六章为基础理论, 第七至十章为实用部分, 最后一章有关太阳能系统性能的计算机模拟, 内容相对独立。第一章绪论介绍太阳能利用的发展情况; 第二章从地球和太阳相对运动出发, 分析太阳辐射性质, 得到的公式可用来确定当地的太阳能资源; 第三章把太阳能热利用中所需的传热知识简要地汇总在一起, 对已掌握这部分内容的读者就不必细讲, 供复习查用。集热器是一种特殊的换热装置, 是太阳能热利用的核心部件。第四、五两章用许多篇幅讨论平板和聚光型集热器的原理和性能, 为系统设计打好基础, 这是全书的重点; 第六章介绍太阳能热储存原理; 第七至十章包括热水系统、热动力装置、制冷、空调、海水淡化等实用的太阳能系统的装置和性能等内容。太阳能系统性能的计算机模拟国内外近年来发展很快, 为此我们编写了第十一章。

不难看出, 本课程涉及许多门学科。与气象、天文、物理、化学、机械、建筑、材料、经济和计算机科学都有紧密联系。工程热力学、传热学和流体力学等课是本课程的先修课。

万物生长包括人类本身都离不开太阳, 因而太阳能的利用是伴随人类同时出现的。它是一种最古老的能源。它的开发利用长期处于不自觉状态, 直接利用低密度的太阳能只是近代的事。一个重要原因是有效利用它必须在多学科的综合技术上有所进展。某些太阳能产品质量不高, 也与缺乏掌握这种综合技术的设计人员有关。学科的综合性、强调理论分析、设计计算和实际应用是本课程的显明特点。

第二章 太 阳 辐 射

设计利用太阳能的装置时,首先必须搞清到达集热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)。这与太阳辐射的性质和大气气候条件紧密有关。太阳辐射的性质取决于太阳结构和特性,气候条件则由地球和太阳之间的时间、空间关系所决定。因此,本章从介绍太阳以及它和地球间的关系着手,然后讨论地球大气层外、内的辐射性质,太阳入射角和太阳辐射量的计算等内容。

§ 2.1 太 阳 和 地 球

一、太阳

太阳直径为 $1.39 \times 10^6 \text{ km}$, 是一个主要由氢和氦组成的炽热气体火球, 质量为 $2.2 \times 10^{27} \text{ t}$ (比地球重 332000 倍), 体积比地球大 130 万倍, 平均密度约为地球的 $1/4$, 离地球的平均距离为 $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ 。

太阳内部通过核聚变把氢转变为氦, 在反应过程中, 太阳每秒钟要亏损 400 万 t 质量(每一克氢变成氦时质量亏损为 0.0072g), 根据质能互换定律 ($E = mc^2$) 可产生 $360 \times 10^{21} \text{ kW}$ 功率。这股能量以电磁波形式向空间四面八方传播, 到达地球大气层上界只占上述总功率的 20 亿分之一, 即 $180 \times 10^{12} \text{ kW}$, 考虑穿越大气层时的衰减, 最后到达地球表面的功率为 $85 \times 10^{12} \text{ kW}$ 。它相当于全世界发电量的几十万倍, 从这个意义上讲太阳提供的能量是无穷尽的。

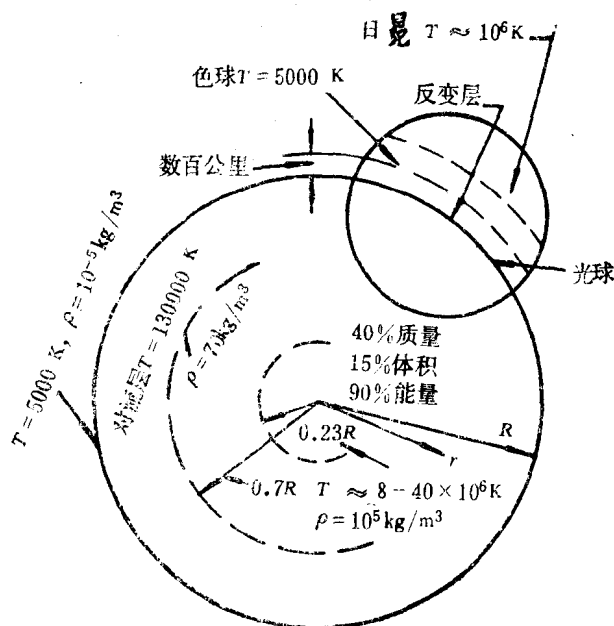


图 2-1 太阳结构

太阳结构如图 2-1 所示。太阳的半径为 R 。在 $0-0.23R$ 范围内, 温度约为 $8-40 \times 10^6 K$, 密度为水的 80—100 倍, 该部分的质量占太阳质量的 40%, 能量占太阳辐射的 90%。离中心 $0.7R$ 处, 温度下降到 130000k 左右, 密度降到 $70 kg/m^3$ 。 $0.7-1R$ 之间为对流层, 温度降至 5000K 左右, 密度为 $10^{-5} kg/m^3$ 。

对流区的外层也就是用肉眼看得见的太阳表面, 称为光球。温度约为 6000K, 密度为 $10^{-3} kg/m^3$, 厚约 500km。光球内的气体电离程度很高, 因而能吸收和发射连续的辐射光谱。光球是太阳的最大辐射源。光球表面常有黑子及光斑活动, 对太阳辐射量及电磁场有强烈的影响, 活动周期约为 11 年。

光球外数百公里厚的较冷气层称为反变层。它由极稀薄的气体组成, 并能吸收某些可见光谱的辐射。反变层外称为色球, 厚度约 $1 \times 10^4 - 1.5 \times 10^4 km$, 主要由低压氢和氦组成, 温度约 5000K, 密度为 $10^{-7} kg/m^3$ 。色球内有时会出现强烈喷射的日焰, 使太阳辐射量猛增, 有些电子流到太空形成太阳风, 在地球大气层上层产生磁暴或极光。色球外伸向太空的是银白色日冕。

由此可见, 太阳并不是某一固定温度的黑体辐射体, 而是各层发射和吸收各种波长的综合辐射结果。不过在太阳能热利用中, 可将太阳看成温度为 6000K, 波长为 $0.3-3 \mu m$ 的黑体辐射。

二、地球绕太阳的运行规律

1. 地球的公转与赤纬角

贯穿地球中心与南北极相连的线称为地轴。地球除了绕地轴自转外, 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 $147.1 \times 10^6 km$, 7 月 1 日远日点时为 $152.1 \times 10^6 km$, 相差约为 3%。地球自转轴与椭圆轨道平面(称黄道平面)的夹角为 $66^\circ 33'$, 该轴在空间的方向始终不变, 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角。赤纬角是地球绕日运行规律造成的特殊现象, 它使处于黄道平面不同位置上的地球接受到的太阳光线方向也不同, 从而形成地球四季的变化, 如图 2-2 所示。北半球夏至(6 月 22 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, 赤纬角都为零, 地球南北半球日夜相等。每天的赤纬角可由下式计算:

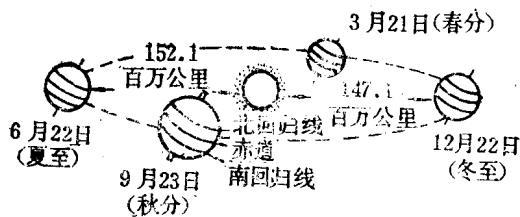


图 2-2 地球绕太阳运行图

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

式中 n 是所求日期在一年中的日子数, 也可借助表 2-1 查出。