

〔沙特阿拉伯〕

A. A. M. 赛义夫 编

太阳能工程

科学出版社

7533/12

太 阳 能 工 程

〔沙特阿拉伯〕 A. A. M. 赛义夫 编

徐任学 刘鉴民 等 译

王补宣 校

科 学 出 版 社

1 9 8 4

内 容 简 介

本书是由沙特阿拉伯、意大利、美国、澳大利亚、英国、土耳其、日本、加拿大等八个国家从事太阳能研究的18位专家撰写而成的。

全书共21章，前九章为基础部分，包括太阳辐射，太阳能利用中的光学和传热问题，后十二章则分述各方面的应用，如太阳池、光发电、太阳房取暖、太阳炉、测量等。

本书可供从事太阳能研究的科技工作者、高等院校有关专业的师生阅读参考。

Edited by A. A. M. SAYIGH
Solar Energy Engineering
Academic Press, 1977

太 阳 能 工 程

〔沙特阿拉伯〕A. A. M. 赛义夫 编

徐任学 刘鉴民 等 译

王朴宣 校

责任编辑 范铁夫 宋义荣

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年2月第 一 版	开本, 850×1168 1/32
1984年2月第一次印刷	印张, 16 3/8
印数: 0001—4,500	字数, 423,000

统一书号, 15031·547

本社书号, 3391·15—9

定价: 3.00 元

72.9
3

译者前言

能源是人类社会活动的物质基础。

人类所利用的能源，大都是由太阳能直接或间接转换而来的。除去我们每天可直接感受到的太阳辐射能之外，海洋中的低温差热能、水力、风力、波浪，生物质能以及目前赖以维持人类生存的常规能源，如煤、石油、天然气等，归根结底都来之于太阳能。由此可见，太阳能对人类生活具有十分重要的意义。

人类对太阳能的利用，并非始于今天，而是自古有之。例如种植，房屋采光、采暖，风能利用，取火等，它们的利用历史可以追溯到几千年。但人类直接取之用于现代生活，作为新能源而进行有目的的开发，则是近二十年来的事，特别是1973年发生世界性的石油危机之后。

太阳能巨大而清洁，人人都能分享，这是它的优点，但太阳能稀薄且间歇，受自然条件影响，通常称之为低品位能量。因此，为人类大规模开发利用带来很多技术上的困难。如何将低品位的太阳能转换为高品位的能量（如聚焦的光能），是个收集问题；如何解决太阳能本身的间歇性，属贮存问题；如何更有效地利用已经收集的能量，属转换问题。所有这些，不仅意味着要解决一系列技术问题，更重要的是要研究采用何种有效的技术途径，以便使太阳能利用的经济指标达到可以和常规能源的经济指标相比较，成为太阳能利用能否实际应用的关键。

本书共二十一章，分由沙特阿拉伯、意大利、美国、澳大利亚、英国、土耳其、日本、加拿大等八个国家从事太阳能研究的十八位专家撰写而成。基本上代表了太阳能利用研究的各个方面的发展水平。每篇文章都对该方面的发展历史、现状、主要技术问题与分析，作了较为清晰的论述。因此，我们把它译出，献给

我国从事太阳能研究的同行们，相信会有所裨益。

本书内容简洁，条理清楚，并不涉及很深的数学基础知识，而着重基本概念的描述，是从事太阳能研究的科技工作者应读的参考书。

参加本书翻译的有徐任学（第一、二、四、二十章）、王德录（第三章）、郭廷玮（第五章）、刘鉴民（第六、八章）、李安定（第七章）、林德芳（第九、十章）、董增仁（第十一章）、常振炎（第十二、十四章）、金家骅（第十三章）、倪受元（第十五、二十一章）、夏平畴（第十六、十七、十八章）和周荣琮（第十九章）。全书由徐任学、刘鉴民作了整理和统一，廖少葆副研究员审阅了初稿，最后由王补宣教授校订。

限于译者水平，不妥或错误之处，在所难免，恳请广大读者指正。

序 言

在常规能源逐渐减少，人口逐渐增多，技术迅速进步的这样一个世界里，不久的将来，现有的能量转换系统，不可避免地会发生巨大的变革。无疑，将会利用一些新的能源。这里，我看，太阳能会起重要作用。十年来，研究和发展工作已加速到这种程度，有可能在本世纪末，太阳能将成为较重要的动力源。这可能是很有利的，因为，从总体来说，太阳能不会污染环境，而且在有大量需求的地区（发展中国家）是很丰富的。

我们希望，这本书将有助于推进这个领域中的研究工作，并提高现有的知识水平。

在这里，我愿意向所有撰稿人，向所有给我鼓励和忠告的朋友们和同事们，表示谢意；特别向帮助我打字和绘图的利雅得大学工学院的职员们表示感谢。

一般资料

符 号 表

A	面积, 方位角	h	开口区域, 时角, 普朗克常数
B	宽度		
c	光速, 比热, (湿围)	h, h_c, h'_c	对流传热系数
C	热容量, 亮度, 聚光系数, 衰减系数或消光厚度	h_{Fg}	汽化潜热
C_p	定压比热	H	总日照, 长度
COP	压缩式致冷机的性能系数	H_c	临界辐射强度
d	直径, 日数	H_d	直接太阳辐射强度
d_b	水力直径 ($4A/C = \text{面积/湿围}$)	H_e	水压头
D	全天实际日照时数与12小时之比, 蜂窝直径, 网格尺寸, 直径, 集热器效率	H_f	漫辐射
D'	全天实际日照时数与昼长之比	H_0	大气层外的太阳辐射
E	单位时间内发射的能量	i	内部, 偏转角
E_n	受主能级	$I(x)$	深度 x 处的光子强度
E_d	施主能级	J	净电流
E_f	费米能	J_L	光电流
E_g	能量间隙	J_0	饱和电流
f	表面热导, 摩擦系数	k	导热系数, 晶格参数, 玻耳兹曼常数
$f_{c.}$	有效吸收率, 穿透系数	K	系数
F	肋的有效系数, 焦距	K_m	动量扩散系数
F'	集热器有效系数	K_n	热扩散系数
F_R	集热器散热系数	L, l	长度, 蜂窝高度, 负荷系数
g	重力加速度, 玻璃	m	空气质量, 质量
G	空气的质量速度	$\dot{m}$	质量流率
G_c	投资费	n, N	数, 天底, 折射系数
G_r	格拉肖夫数	Nu	努塞尔特数
G_z	格里茨数	P	平板, 压力
		Pa	帕斯卡 = 牛顿/米 ²
		P_c	电站投资费, 美元/千瓦

$$\left(= \frac{1}{P} \right)$$

P_0	功率	v_m	平均空气速度
P_0	大气中水蒸气分压	V	速度向量, 电压
Pr	普朗特数	W	质量流率, 致冷机输入功
q	单位面积传热率	WBT	湿球温度
q_u	有效收集热	X	辐射平衡集光度
Q_h	给发动机或发生器的热量	z	天顶
Q_1	致冷机冷却效力	Z	昼长平均时数
Q_2	致冷机排热	Z_0	表面粗糙度
r	半径, 入射角	α	热扩散率, 焦点收角, 集热器吸收率, 角
R, RH	相对湿度(%), 每安培总固定收费率	β	高度, 膨胀系数, 角
Ra	瑞利数	δ	赤纬角, 角
Re	雷诺数	ϵ	发射率
R_s	内阻	η	效率
S	湖面积, 日照时数	λ	比波长, 纬度系数
St	斯坦登数	λ_s	净蒸发率
STR	系统热比(=冷却效力/入射太阳能)	μ	动力粘度
t	时间, 顶	μ_B	体积粘度
T	绝对温度	μ_w	壁粘度
T_a	环境温度	ρ	密度
T_b	集热器表面达到的最终平衡温度	σ	斯蒂芬-玻耳兹曼常数
T_c	盖板温度或吸收器温度	τ	集热器盖板穿透系数, 切应力
T_g	发生器温度	ν	运动粘度
T_h	发动机热源温度	ϕ	纬度, 倾角, 粘性损失
T_1	冷区温度或蒸发器温度	ω	日落时角
T_2	热区温度或排热温度	Ω	西贝克系数
TR	致冷机热比(=冷却效力/热输入)	注脚	
u, v, w	x, y, z 方向的分速度	L, l	总距离的总值
U	集热器总损失系数	m	平均值
U_m	平均速度	n	在 n 方向, 在第 n 步
U_L, U_0, U_r	空气流, 从空气流通过透明盖板到外部空气流的总传热系数和底部热损失系数	0	表面值
		r	参考值
		ss	稳态
		x	x 距离处之值

单 位

公 制 单 位

量	单位	单位符号	量	单位	单位符号
长度	米	m	电阻	欧姆	$\Omega = V/A$
质量	千克	kg	电荷	库伦	$C = AS$
时间	秒	s	电容	法拉	$F = AS/V$
电流	安培	A	电场强度	—	V/m
热力学温度	凯尔文度	K	电通量密度	—	C/m^2
发光强度	坎德拉(烛光)	Cd	磁通量	韦伯	$Wb = Vs$
力	牛顿	$N = kg/s^2$	电感	亨利	$H = Vs/A$
功, 能或热	焦耳	$J = Nm$	磁场强度	—	A/m
功率	瓦特	$W = J/s$	平面角	弧度	rad
电位	伏特	$V = W/A$	立体角	立体弧度	sr

国际制词冠

词冠名称	法文名称	国际代号	中文代号	因 数
艾可萨	exa	E	艾	10^{18}
拍 它	peta	P	拍	10^{16}
太 拉	tera	T	太	10^{12}
吉 咖	giga	G	吉	10^9
兆	mega	M	兆	10^6
千	kilo	k	千	10^3
百	hecto	h	百	10^2
十	deca	D	十	10
分	deci	d	分	10^{-1}
厘	centi	c	厘	10^{-2}
毫	milli	m	毫	10^{-3}
微	micro	μ	微	10^{-6}
纳 诺	nano	n	纳	10^{-9}
皮 可	pico	p	皮	10^{-12}
飞姆托	femto	f	飞	10^{-16}
阿 托	atto	a	阿	10^{-18}

英制和其他单位

量	单位	单位符号	力量	单位	单位符号
长度	英寸	in		吨力	tonf
	英尺	ft		达因	dyn
	埃	Å	温度	摄氏度	°C
	微米	μm		华氏度	°F
容量	加仑	gal		兰金度	°R
	美制加仑	US gal	功, 能, 热	英热(单位)	Btu
质量	磅	lb		卡	cal
	克	g		电子伏	eV
	吨	t	功率	马力	hp
力	磅达	pd	时间	小时	h
	磅力	lbf			

单位转换

长度, 面积和体积

1 英寸 = 25.44 毫米	1 美制加仑 = 0.1337 英尺 ³
1 英尺 = 0.3048 米	= 3785 厘米 ³
1 英里 = 5280 英尺	1 英寸 ³ = 16.39 厘米 ³
= 1.609344 千米	1 英尺 ³ = 0.02832 米 ³
1 微米 = 10 ⁻⁶ 米	1 品脱 = 568.261 厘米 ³
= 39.37 微英寸	1 英尺/分 = 0.00508 米/秒
1 埃 = 10 ⁻¹⁰ 米	1 千米/小时 = 0.277778 米/秒
1 英尺 ² = 0.09290304 米 ²	1 英尺 ³ /磅 = 0.062428 米 ³ /千克
1 英寸 ² = 0.00064516 米 ²	1 英尺 ³ /分 = 0.471947 公升/秒
1 英亩 = 4046.86 米 ²	1 英尺 ³ /分·英尺 ² = 5.08000 公升/秒·米 ²
1 英里 ² = 2.58999 千米 ²	1 英里/小时 = 1.467 英尺/秒
1 公亩 = 10 ⁴ 米 ²	= 1.609 千米/小时
1 加仑 = 0.1605 英尺 ³	1 节(海里/小时) = 1.689 英尺/秒
= 4546 厘米 ³	= 1.853 千米/小时

质量, 密度, 压力和力

1 磅 = 0.4536 千克

1 斯 = 32.17 磅
= 14.59 千克

1 吨 = 2240 磅
= 1016 千克
= 1.016 公吨

1 英两 = 28.3495 克

1 磅/英寸³ = 27.68 克/厘米³

1 磅/英尺³ = 16.02 千克/米³

1 斯/英尺³ = 515.4 千克/米³

1 磅力 = 4.44822 牛顿

1 千克力 = 9.80665 牛顿

1 磅力/英尺
= 14.5939 牛顿/米

1 达因/厘米 = 1 毫牛顿/米

1 巴 = 10⁵ 帕斯卡 = 33.9 英尺水

(1 帕斯卡 = 1 牛顿/米²)
= 14.5 磅力/英寸²

1 磅/英寸² = 6.89476 千帕斯卡

1 毫米水 = 9.80665 帕斯卡

1 英寸水 = 249.089 帕斯卡

1 毫米汞 = 133.322 帕斯卡
= 1 托

1 工程大气压

= 1 千克力/厘米²

= 98.0665 千帕斯卡

1 大气压 = 101.325 千帕斯卡

= 14.70 磅力/英寸²

1 达因 = 10⁻⁵ 牛顿

能量和功率

1 千瓦时 = 3.6 兆焦耳

1 英热单位
= 1.05506 千焦耳
= 252 卡
= 778.2 英尺·磅力

1 热量单位
= 105.506 兆焦耳

1 英热单位/磅
= 2.326 千焦耳/千克

1 英热单位/磅·°F
= 4.1868 千焦耳/千克·°C

1 千卡 = 4.1868 千焦耳

1 英尺·磅 = 1.356 焦耳

1 马力时 = 2.685 兆焦耳

1 卡/秒 = 4.187 瓦

1 英热单位/英尺²

= 0.271 卡/厘米²

1 千卡/时 = 1.163 瓦

1 马力 = 0.745700 千瓦

1 吨致冷 = 3.51685 千瓦

1 英热单位/时·英尺²·°F
= 5.67826 瓦/厘米²·°C

1 克·卡/厘米²·时
= 11.63 瓦/米²

1 卡/厘米²·秒·°C
= 7380 英热单位/英尺²·时·°F

1 兰勒 (ly) = 1 卡/厘米²
= 3.69 英热单位/英尺²

1 兰勒/分
= 0.06978 瓦/厘米²

其他有用的转换

1 泊(克/厘米·秒)	1 公吨原油 = 0.984 英吨
= 0.1 千克/米·秒	= 1.102 美吨
= 0.1 牛顿·秒/米 ²	= 7.33 桶
1 磅/英尺·时	= 1.16 米 ³
= 0.4134 克/米·秒	= 256 英制加仑
1 斯/英尺·秒	= 308 美制加仑
= 1 磅力·秒/英尺 ²	1 吨油 ^a = 41 × 10 ⁶ 英热单位
= 478.8 泊	= 1.5 吨煤
1 英热单位/英尺·时·°R	= 4.9 吨褐煤
= 1.731 焦耳/米·秒·K	= 3.3 吨泥煤
1 卡/厘米·秒·K	= 1163 米 ³ 天然气
= 418.7 焦耳/米·秒·K	(1 英尺 ³ = 1000 英热单位)
1 英尺·烛 = 1 流明/英尺 ²	= 2500 米 ³ 城市煤气
1 流明 = 烛光/立体弧度	(1 英尺 ³ = 470 英热单位)
1 勒克斯 = 1 流明/米 ²	= 12000 千瓦时电
1 英尺·烛 = 10.7639 勒克斯	

^a 在现代发电站中每吨油生产电约4000千瓦时

某些材料的一般特性

	密度 (千克/米 ³)	导热系数 (瓦/米·°C)
空气, 在20°C和标准压力下	1.204	0.0260
泡沫聚乙烯, 在10°C时	16.0	0.0346
泡沫聚氨酯, 硬质	24.0	0.0245
矿物质, 煤层附近的页岩, 在-2°C时	32.0	0.0346
泡沫聚氯乙烯, 硬质, 在21°C时	60.0	0.0360
泡沫硬橡胶, 在10°C时	64.0	0.0303
软木板, 干燥的, 在18°C时	144.0	0.0418
石棉水泥板, 在30°C时	150.0	0.319
松木纤维板, 在24°C时	256.0	0.0519
松木, 15%湿分	570.0	0.138
橡木, 14%湿分	770.0	0.160
干灰泥、灰泥板, 在23°C时	881.0	0.170
冰, 在-1°C时	918.0	2.26

水, 在4°C时	1000.0	0.596 ^a
典型建筑混凝土	2400.0	1.73
标准玻璃	2515.0	1.05
铝	2675.0	47.6
钢	7850.0	211
铜	8795.0	385

比热(千焦耳/千克·°C)		汽化热(千焦耳/千克)	
水, 在20°C和标准压力下	4.19	水在20°C时	2454.0
冰, 在-21°C到-1°C时	2.10	水在100°C时	2257.0
100°C和标准压力下蒸汽(C_p)	1.95	R 12在0°C饱和	151.5
20°C标准压力下空气(C_p)	1.012	R 22在0°C饱和	205.4
混凝土, 在18°C时	0.837	R 11在0°C饱和	188.9
		R 500在0°C饱和	183.0
		R 717在0°C饱和	1263.3

^a 水, 在20°C时

一 般 常 数

标准状况是指: 标准温度 T_0 为273.15K = 0°C, 标准压力 P_0 为101.325kPa (千帕斯卡)

g_0 是标准重力加速度

9.80665米/秒²

空气中的声速

在 P_0 , 20°C和50%相对湿度时344米/秒

气体常数

$R_u = 8314.4$ 焦耳/千克克分子·K 通用

$R_a = 287.045$ 焦耳/千克·K 空气

$R_v = 461.52$ 焦耳/千克·K 水蒸气

玻耳兹曼常数

1.380×10^{-23} 焦耳/K

法拉第常数

9.65×10^7 库伦/千克·克分子

普郎克常数

6.626×10^{-34} 焦耳·秒

斯蒂芬-玻耳兹曼常数

5.67×10^{-8} 焦耳/米²·秒·K⁴

标准状况下1千克分子

理想气体的体积

22.42米³

目 录

序言	ix
一般资料	xi
第一章 绪论	1
第二章 太阳和天穹	4
§ 2.1 引言	4
§ 2.2 太阳：旋转沙漠风暴中的一粒沙	5
§ 2.3 倾斜平面上直接辐射入射角的计算	22
§ 2.4 太阳：猛烈爆发中的火花	27
第三章 太阳总辐射和分光谱辐射	36
§ 3.1 引言	36
§ 3.2 地球之外的太阳能	36
§ 3.3 太阳常数	37
§ 3.4 空气质量为零条件下的太阳分光谱辐射	38
§ 3.5 随日地距离的变化	41
§ 3.6 标准值的精度	42
§ 3.7 太阳能输出的变化	44
§ 3.8 地面上太阳能的变化	45
§ 3.9 太阳能在大气中衰减	46
§ 3.10 地面上的太阳总辐射和分光谱辐射	50
§ 3.11 结论	59
第四章 根据气象资料预计可利用太阳能	60
§ 4.1 引言	60
§ 4.2 太阳总辐射的估计	61
§ 4.3 根据气象资料估计太阳总辐射	66
§ 4.4 影响太阳总辐射的一些因素	67
§ 4.5 估计太阳总辐射的通用经验公式	70
§ 4.6 直接和扩散辐射的估计	74
§ 4.7 结论	80

第五章 太阳能利用中的传热问题	82
§ 5.1 引言	82
§ 5.2 传导	82
§ 5.3 对流	85
§ 5.4 有蒸汽冷凝的传热	96
§ 5.5 液体的蒸发	97
§ 5.6 热辐射	97
§ 5.7 关于换热器的几个传热问题	100
第六章 太阳能利用——液体平板集热器	103
§ 6.1 引言	103
§ 6.2 传热过程	105
§ 6.3 集热器性能的稳态模型	115
§ 6.4 常用的管板集热器的某些特性	122
§ 6.5 对今后工作有益的研究领域	133
第七章 平板集热器蜂窝结构中的对流传热效应	134
§ 7.1 引言	134
§ 7.2 蜂窝结构中传热的一般问题	135
§ 7.3 流体层的自由对流传过程的一些理论问题	138
§ 7.4 自由对流作用的实验研究	146
§ 7.5 辐射对蜂窝中对流作用的影响	148
第八章 太阳能空气加热器及其应用	151
§ 8.1 引言	151
§ 8.2 太阳能空气加热器的不同设计型式	153
§ 8.3 平板太阳能空气加热器的效率计算	157
§ 8.4 各种型式集热器的性能	162
§ 8.5 太阳能空气加热器的应用	174
第九章 聚光型集热器	180
§ 9.1 引言	180
§ 9.2 点聚焦结构——抛物面镜	180
§ 9.3 圆形菲涅尔透镜	183
§ 9.4 中心接收器	185
§ 9.5 聚光极限	187

§ 9.6	点聚焦装置	189
§ 9.7	全跟踪装置型式	191
§ 9.8	全跟踪装置的运动学	192
§ 9.9	一般定日镜	195
§ 9.10	线聚焦型式	199
§ 9.11	抛物柱面镜	199
§ 9.12	柱面光学装置	201
§ 9.13	固定反射镜线聚焦系统	205
§ 9.14	半固定反射镜系统	207
§ 9.15	固定反射镜运动吸收器系统	209
§ 9.16	反射镜的材料	211
第十章	太阳池	214
§ 10.1	引言	214
§ 10.2	形成和保持稳定的浓度梯度	216
§ 10.3	入射到池上的太阳辐射的吸收	219
§ 10.4	池中温度演变的理论分析	223
§ 10.5	从太阳池提取热量	226
§ 10.6	结论	229
第十一章	太阳炉	230
§ 11.1	引言	230
§ 11.2	太阳炉的基本原理	231
§ 11.3	理论聚光	238
§ 11.4	设计举例	243
§ 11.5	在高温研究中应用太阳炉的方法	250
§ 11.6	结论	257
第十二章	光电转换	258
§ 12.1	引言	258
§ 12.2	半导体原理	258
§ 12.3	固体的能带理论	259
§ 12.4	光学性能	263
§ 12.5	迁移特性	266
§ 12.6	光电原理	267
§ 12.7	电池制造	270

§ 12.8	采用聚光的光电系统	278
§ 12.9	结论	278
第十三章	太阳能在空间的应用	279
§ 13.1	引言	279
§ 13.2	太阳电池系统	279
§ 13.3	空间用太阳电池的制造	281
§ 13.4	未来空间电池和系统	293
§ 13.5	其他空间太阳能系统	295
第十四章	太阳能转换为电能	296
§ 14.1	引言	296
§ 14.2	直接能量转换	297
§ 14.3	通过热中间阶段的转换	302
§ 14.4	通过其他阶段的转换	308
§ 14.5	太阳能发电系统	312
§ 14.6	结论	314
第十五章	太阳能的贮存	315
§ 15.1	引言	315
§ 15.2	电的贮存	316
§ 15.3	以热的形式贮存	319
§ 15.4	以燃料的形式贮存	321
§ 15.5	以水位能的形式贮存	326
§ 15.6	结论	330
第十六章	致冷与空调	331
§ 16.1	引言	331
§ 16.2	要求	332
§ 16.3	致冷系统	338
§ 16.4	太阳能致冷	346
§ 16.5	太阳能致冷的地位	352
第十七章	住宅的太阳能采暖和致冷	355
§ 17.1	引言	355
§ 17.2	太阳能系统的类型	358
§ 17.3	系统部件	358