



能源与环境出版工程  
(第二期)

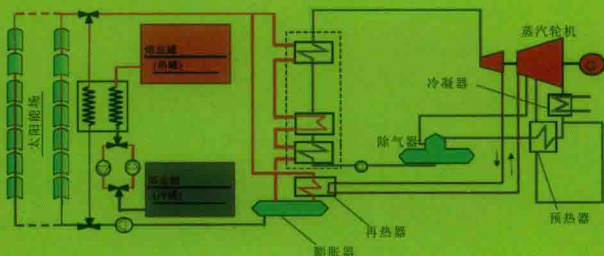
总主编 翁史烈

“十三五”国家重点图书出版规划项目  
上海市文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”资助项目

# 太阳能热利用原理与技术

Principles and Technologies of  
Solar Thermal Energy Utilization

代彦军 葛天舒 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



能源与环境出版工程  
(第二期)

总主编 翁史烈

“十三五”国家重点图书出版规划项目  
上海市文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”资助项目

# 太阳能热利用原理与技术

Principles and Technologies of  
Solar Thermal Energy Utilization

代彦军 葛天舒 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书内容主要涉及三大部分：一是太阳能热利用基础，重点介绍与太阳能热利用相关的太阳辐射、热力学和传热学知识；二是太阳能转变为热能的核心部件——集热器，包括热水器、空气集热器和用于中高温过程的聚焦集热器；三是太阳能热利用系统及利用方法，包括热水系统、采暖系统、空调系统、工农业供热系统、热发电等，并结合应用案例进行解析。本书旨在使读者能够掌握太阳能热利用原理和可行的方法、装置，并运用相关知识进行初步太阳能热利用系统设计。

本书可作为太阳能工程专业本科生、研究生的教材，也可供相关专业的研究人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

太阳能热利用原理与技术 / 代彦军, 葛天舒编著.

—上海: 上海交通大学出版社, 2018

(能源与环境出版工程)

ISBN 978 - 7 - 313 - 18631 - 7

I. ①太… II. ①代… ②葛… III. ①太阳能热利用  
IV. ①TK519

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 329295 号

## 太阳能热利用原理与技术

编 著: 代彦军 葛天舒

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 苏州市越洋印刷有限公司

开 本: 710 mm × 1000 mm 1/16

字 数: 470 千字

版 次: 2018 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978 - 7 - 313 - 18631 - 7/TK

定 价: 178.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021 - 64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 25.25

印 次: 2018 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512 - 68180638

# 能源与环境出版工程 丛书学术指导委员会

## 主任

杜祥琬(中国工程院原副院长、中国工程院院士)

## 委员(以姓氏笔画为序)

苏万华(天津大学教授、中国工程院院士)

岑可法(浙江大学教授、中国工程院院士)

郑平(上海交通大学教授、中国科学院院士)

饶芳权(上海交通大学教授、中国工程院院士)

闻雪友(中国船舶工业集团公司 703 研究所研究员、中国工程院院士)

秦裕琨(哈尔滨工业大学教授、中国工程院院士)

倪维斗(清华大学原副校长、教授、中国工程院院士)

徐建中(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

陶文铨(西安交通大学教授、中国科学院院士)

蔡睿贤(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

# 能源与环境出版工程 丛书编委会

## 总主编

翁史烈(上海交通大学原校长、教授、中国工程院院士)

## 执行总主编

黄震(上海交通大学副校长、教授)

## 编委(以姓氏笔画为序)

马重芳(北京工业大学环境与能源工程学院院长、教授)

马紫峰(上海交通大学电化学与能源技术研究所教授)

王如竹(上海交通大学制冷与低温工程研究所所长、教授)

王辅臣(华东理工大学资源与环境工程学院教授)

何雅玲(西安交通大学教授、中国科学院院士)

沈文忠(上海交通大学凝聚态物理研究所副所长、教授)

张希良(清华大学能源环境经济研究所所长、教授)

骆仲泐(浙江大学能源工程学系系主任、教授)

项璠(东南大学能源与环境学院教授)

贾金平(上海交通大学环境科学与工程学院教授)

徐明厚(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室主任、教授)

盛宏至(中国科学院力学研究所研究员)

章俊良(上海交通大学燃料电池研究所所长、教授)

程旭(上海交通大学核科学与工程学院院长、教授)

# 总 序

能源是经济社会发展的基础,同时也是影响经济社会发展的主要因素。为了满足经济社会发展的需要,进入 21 世纪以来,短短十余年间(2002—2017 年),全世界一次能源总消费从 96 亿吨油当量增加到 135 亿吨油当量,能源资源供需矛盾和生态环境恶化问题日益突显,世界能源版图也发生了重大变化。

在此期间,改革开放政策的实施极大地解放了我国的社会生产力,我国国内生产总值从 10 万亿元人民币猛增到 82 万亿元人民币,一跃成为仅次于美国的世界第二大经济体,经济社会发展取得了举世瞩目的成绩!

为了支持经济社会的高速发展,我国能源生产和消费也有惊人的进步和变化,此期间全世界一次能源的消费增量 38.3 亿吨油当量中竟有 51.3% 发生在中国! 经济发展面临着能源供应和环境保护的双重巨大压力。

目前,为了人类社会的可持续发展,世界能源发展已进入新一轮战略调整期,发达国家和新兴国家纷纷制定能源发展战略。战略重点在于:提高化石能源开采和利用率;大力开发可再生能源;最大限度地减少有害物质和温室气体排放,从而实现能源生产和消费的高效、低碳、清洁发展。对高速发展中的我国而言,能源问题的求解直接关系到现代化建设进程,能源已成为中国可持续发展的关键! 因此,我们更有必要以加快转变能源发展方式为主线,以增强自主创新能力为着力点,深化能源体制改革、完善能源市场、加强能源科技的研发,努力建设绿色、低碳、高效、安全的能源大系统。

在国家重视和政策激励之下,我国能源领域的新概念、新技术、新成果不断涌现;上海交通大学出版社出版的江泽民学长的著作《中国能源问题研究》(2008 年)更是从战略的高度为我国指出了能源可持续发展的健康发展之

路。为了“对接国家能源可持续发展战略,构建适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台”,我们策划、组织编写了这套“能源与环境出版工程”丛书,其目的在于:

一是系统总结几十年来机械动力中能源利用和环境保护的新技术新成果;

二是引进、翻译一些关于“能源与环境”研究领域前沿的书籍,为我国能源与环境领域的技术攻关提供智力参考;

三是优化能源与环境专业教材,为高水平技术人员的培养提供一套系统、全面的教科书或教学参考书,满足人才培养对教材的迫切需求;

四是构建一个适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台。

该学术丛书以能源和环境的关系为主线,重点围绕机械过程中的能源转换和利用过程以及这些过程中产生的环境污染治理问题,主要涵盖能源与动力、生物质能、燃料电池、太阳能、风能、智能电网、能源材料、能源经济、大气污染与气候变化等专业方向,汇集能源与环境领域的关键性技术和成果,注重理论与实践的结合,注重经典性与前瞻性的结合。图书分为译著、专著、教材和工具书等几个模块,其内容包括能源与环境领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也包括能源与环境工程一线的理论和实践。如钟芳源等撰写的《燃气轮机设计》是经典性与前瞻性相统一的工程力作;黄震等撰写的《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》和王如竹等撰写的《绿色建筑能源系统》是依托国家重大科研项目的新成果新技术。

为确保这套“能源与环境”丛书具有高品质和重大的社会价值,出版社邀请了杜祥琬院士、黄震教授、王如竹教授等专家,组建了学术指导委员会和编委会,并召开了多次编撰研讨会,商谈丛书框架,精选书目,落实作者。

该学术丛书在策划之初,就受到了国际科技出版集团 Springer 和国际学术出版集团 John Wiley & Sons 的关注,与我们签订了合作出版框架协议。经过严格的同行评审,截至 2018 年初,丛书中已有 9 本输出至 Springer,1 本输出至 John Wiley & Sons。这些著作的成功输出体现了图书较高的学术水平和良好的品质。

“能源与环境出版工程”从 2013 年底开始陆续出版,并受到业界广泛关注,取得了良好的社会效益。从 2014 年起,丛书已连续 5 年入选了上海市

文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”项目。还有些图书获得国家重大项目支持,如《现代燃气轮机装置》《除湿剂超声波再生技术》(英文版)、《痕量金属的环境行为》(英文版)等。另外,在图书获奖方面,也取得了一定成绩,如《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》获“第四届中国大学出版社优秀学术专著二等奖”;《除湿剂超声波再生技术》(英文版)获中国出版协会颁发的“2014年度输出优秀图书奖”。2016年初,“能源与环境出版工程”(第二期)入选了“十三五”国家重点图书出版规划项目。

希望这套书的出版能够有益于能源与环境领域里人才的培养,有益于能源与环境领域的技术创新,为我国能源与环境的科研成果提供一个展示的平台,引领国内外前沿学术交流和创新并推动平台的国际化发展!

肖史西

2018年9月

# 前 言

纵观全球,能源和环境问题仍然是人类所面临的巨大挑战,传统化石能源会在不久的将来耗尽已经成为不争辩的事实,如何发展利用清洁的可再生能源是必然的选择。在众多可再生能源中,太阳能因其清洁、分布广的显著优势获得最多的关注。目前太阳能利用技术主要分为两类,一类是基于太阳能电池的太阳能光伏技术,另一类是基于太阳能集热器的太阳能热利用技术。截至2015年,全球太阳能集热器的安装容量已达435 GW,比起2000年的50 GW,提升了近9倍,其中我国的太阳能集热器安装量占全球太阳能安装总量的70%。同时我国也是集热器的制造大国,随着能源问题的日益严重,太阳能热利用领域在未来仍有很大机会保持持续增加。近几年很多高校已经开设了可再生能源专业,很多地区也已经把太阳能热利用的发展和利用纳入规划,甚至一些区域还设立了太阳能热利用的创业种子基金,鼓励相关企业和从业人员进行创新实践。为结合上述发展趋势,编者所在的上海交通大学团队近20年来持续围绕太阳能热利用技术进行了积极的探索和研究,将其中的基本原理与相关技术发展编辑为此书。

本书从最初太阳能资源的来源,太阳能辐射说起(第2章),随后介绍各种太阳能热能的收集方式(第3章),再从太阳能热能的各种利用方式进行阐述,包括供暖、空调、热发电、海水淡化等(第4~10章),最后还介绍了太阳能热利用系统的模拟软件(第11章)。总体来说,希望本书既能让读者学习太阳能热利用的相关原理,也能使得读者掌握相关技术的进展。本书可供相关学科的老师、学生、研究人员进行参考。

由于作者水平有限,书中存在的不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	001
1.1 可再生能源与太阳能 .....	002
1.2 太阳能利用现状和发展 .....	004
1.2.1 太阳能利用历史 .....	004
1.2.2 近年来太阳能利用的发展 .....	005
1.3 习题 .....	007
参考文献 .....	007
第 2 章 太阳能资源 .....	009
2.1 太阳能资源与太阳辐射 .....	009
2.2 太阳能辐射的基础和特点 .....	011
2.2.1 大气层外的太阳辐射 .....	011
2.2.2 到达地表的太阳直射辐射 .....	013
2.2.3 散射辐射 .....	016
2.2.4 太阳的总辐射 .....	018
2.3 太阳能辐射量的测量 .....	018
2.3.1 几种常用的太阳辐射仪 .....	018
2.3.2 日照时数测量 .....	020
2.4 太阳能资源分布特点 .....	021
2.4.1 全球太阳能资源分布 .....	021
2.4.2 中国太阳能资源分布 .....	023
2.5 习题 .....	024
参考文献 .....	024

<b>第 3 章 太阳能集热器</b> .....	025
3.1 太阳能集热器工作原理 .....	025
3.2 太阳能集热器分类 .....	025
3.3 非跟踪式太阳能集热器 .....	027
3.3.1 平板型集热器 .....	027
3.3.2 真空管集热器 .....	031
3.3.3 空气集热器 .....	036
3.3.4 复合抛物面集热器 .....	039
3.4 跟踪式太阳能集热器 .....	041
3.4.1 槽式太阳能集热器 .....	042
3.4.2 菲涅尔式太阳能集热器 .....	053
3.4.3 塔式太阳能集热器 .....	067
3.4.4 碟式太阳能集热器 .....	074
3.5 集热器集热性能理论分析和实验测量 .....	077
3.5.1 平板型集热器 .....	077
3.5.2 真空管集热器 .....	085
3.5.3 复合抛物面聚光集热器 .....	087
3.5.4 聚焦式集热器 .....	089
3.6 习题 .....	091
参考文献 .....	092
<b>第 4 章 太阳能热水系统</b> .....	093
4.1 太阳能热水系统工作原理 .....	093
4.2 太阳能热水系统分类 .....	093
4.2.1 太阳能热水系统介绍 .....	093
4.2.2 太阳能热水系统的分类方式 .....	093
4.3 太阳能热水系统的设计选型 .....	097
4.3.1 太阳能热水系统与建筑适用性 .....	098
4.3.2 热水负荷计算 .....	100
4.3.3 太阳能集热器设计选型 .....	103

4.3.4 贮热水箱与供热水箱的设计选型 .....	110
4.3.5 辅助热源的设计选型 .....	111
4.3.6 控制系统的设计选型 .....	114
4.3.7 系统保温 .....	115
4.3.8 系统防冻 .....	118
4.3.9 系统防雷 .....	119
4.3.10 太阳能热水系统计量 .....	121
4.3.11 管道及循环泵设计 .....	121
4.4 太阳能热水系统评价 .....	124
4.4.1 热性能 .....	124
4.4.2 安全性 .....	125
4.4.3 耐久性 .....	126
4.4.4 太阳能保证率 .....	127
4.4.5 经济效益 .....	127
4.4.6 环境效益 .....	133
4.5 太阳能热水系统的发展现状及典型案例 .....	135
4.5.1 发展现状 .....	135
4.5.2 典型案例 .....	136
4.6 习题 .....	139
参考文献 .....	139
<b>第5章 太阳能采暖 .....</b>	<b>140</b>
5.1 太阳能采暖系统工作原理 .....	140
5.2 太阳能采暖系统分类 .....	144
5.2.1 被动式太阳能采暖系统 .....	145
5.2.2 主动式太阳能采暖系统 .....	152
5.2.3 根据供暖规模分类 .....	158
5.3 被动式太阳房性能评价指标 .....	159
5.4 被动式太阳房设计参数 .....	162
5.5 被动式太阳房采暖设计 .....	168

5.6	太阳能采暖系统的发展现状 .....	182
5.7	习题 .....	183
	参考文献 .....	183
<b>第6章</b>	<b>太阳能空调 .....</b>	<b>184</b>
6.1	太阳能空调系统工作原理 .....	184
6.1.1	太阳能吸收式空调系统 .....	184
6.1.2	太阳能吸附式空调系统 .....	186
6.1.3	太阳能驱动的除湿空调系统 .....	189
6.1.4	太阳能驱动的蒸气喷射制冷原理 .....	192
6.1.5	太阳能半导体制冷原理 .....	193
6.2	太阳能空调系统特点及分类 .....	194
6.2.1	太阳能空调系统的特点 .....	194
6.2.2	吸收式制冷空调系统特点及分类 .....	195
6.2.3	吸附式制冷空调系统特点及分类 .....	196
6.2.4	太阳能驱动的除湿空调系统的特点及分类 .....	198
6.3	太阳能空调系统评价及设计 .....	202
6.3.1	制冷性能系数 .....	202
6.3.2	除湿量与潜热负荷 .....	203
6.3.3	集热器选择与热量冷量匹配 .....	203
6.3.4	太阳能空调方案选择 .....	205
6.4	太阳能空调系统典型案例 .....	213
6.4.1	基于中温槽式集热器的太阳能单效吸收式空调系统 .....	213
6.4.2	基于黑腔槽式集热器的双效溴化锂吸收式制冷机 .....	215
6.4.3	基于线性菲涅尔集热器的太阳能单/双效吸收式空调系统 .....	218
6.4.4	基于中温线菲集热器的1.N效吸收式空调系统 .....	224
6.4.5	带储热的太阳能氨-水吸收式空调系统 .....	229
6.4.6	基于真空管集热器的太阳能吸附空调与地源热泵空调复合系统 .....	230
6.4.7	采用除湿换热器的连续型除湿空调系统 .....	236
6.4.8	采用除湿换热器的回热型全新风除湿空调系统 .....	239

6.5 被动式太阳能制冷 .....	243
6.5.1 太阳能强化自然通风被动式制冷 .....	243
6.5.2 辐射制冷 .....	246
参考文献 .....	248
<b>第7章 太阳能热泵 .....</b>	<b>249</b>
7.1 太阳能热泵系统工作原理 .....	249
7.2 太阳能热泵系统的特点及分类 .....	250
7.3 太阳能热泵系统评价及设计 .....	253
7.4 太阳能热泵系统典型案例 .....	256
7.5 习题 .....	261
参考文献 .....	261
<b>第8章 太阳能热发电 .....</b>	<b>262</b>
8.1 太阳能热发电系统工作原理 .....	262
8.2 太阳能热发电系统的分类 .....	263
8.2.1 槽式太阳能热发电 .....	265
8.2.2 塔式太阳能热发电 .....	269
8.2.3 碟式太阳能热发电 .....	275
8.2.4 线性菲涅尔太阳能热发电 .....	279
8.2.5 太阳能热气流发电 .....	282
8.2.6 低温太阳能热发电 .....	284
8.2.7 基于热电材料的太阳能温差发电 .....	285
8.3 太阳能热发电系统设计及评价 .....	289
8.3.1 太阳能热动力发电系统的能量平衡原理 .....	289
8.3.2 电站系统循环效率 .....	291
8.3.3 太阳能热发电系统的太阳能依存率 .....	292
8.4 太阳能热发电系统的发展现状及典型案例 .....	293
8.4.1 槽式太阳能热发电系统的发展现状及典型案例 .....	293
8.4.2 塔式太阳能热发电系统的发展现状及典型案例 .....	297

8.4.3	碟式太阳能热发电系统的发展现状及典型案例 .....	302
8.4.4	线性菲涅尔式太阳能热发电系统的发展现状及典型案例 .....	307
8.4.5	太阳能热气流发电系统的发展现状及典型案例 .....	312
8.5	习题 .....	315
	参考文献 .....	316
<b>第9章</b>	<b>太阳能储存</b> .....	<b>319</b>
9.1	太阳能储存方式 .....	319
9.1.1	显热储存 .....	319
9.1.2	潜热储存 .....	321
9.1.3	化学能储存 .....	322
9.1.4	电能储存 .....	323
9.2	太阳能光化学转化途径和方法 .....	323
9.2.1	光电化学分解水制氢 .....	324
9.2.2	光催化分解水制氢 .....	324
9.2.3	热分解水制氢 .....	325
9.2.4	太阳能发电电解水制氢 .....	325
9.2.5	光生物化学分解水制氢 .....	325
9.3	储能环节在太阳能系统中的应用及必要性 .....	326
9.3.1	太阳能中温工业用热储存 .....	326
9.3.2	太阳能高温发电用热储存 .....	327
9.4	太阳能昼夜、季节性能量蓄存系统特性 .....	329
9.4.1	系统介绍及原理 .....	329
9.4.2	蓄热系统昼夜、季节特性 .....	330
9.5	习题 .....	331
	参考文献 .....	332
<b>第10章</b>	<b>太阳能海水淡化</b> .....	<b>333</b>
10.1	太阳能海水淡化基本原理 .....	333
10.2	太阳能海水淡化系统类型 .....	337

10.2.1 被动式太阳能蒸馏系统 .....	338
10.2.2 主动式太阳能蒸馏器 .....	346
10.3 与传统海水淡化技术相结合的太阳能海水淡化系统 .....	349
10.3.1 太阳能多级闪蒸海水淡化系统 .....	350
10.3.2 太阳能多效蒸馏海水淡化系统 .....	351
10.3.3 太阳能蒸汽压缩蒸馏海水淡化系统 .....	353
10.3.4 利用淡水与海水的分压差进行海水淡化 .....	355
10.3.5 横管降膜蒸发多效回热式太阳能海水淡化装置 .....	357
10.4 太阳能海水淡化技术的前景展望 .....	359
10.5 习题 .....	360
参考文献 .....	360
<b>第 11 章 太阳能热利用系统模拟 .....</b>	<b>362</b>
11.1 太阳能热利用系统模拟软件简介 .....	362
11.2 TRNSYS 建模分析 .....	366
11.3 TRNSYS 建模实例 .....	371
11.4 习题 .....	378
参考文献 .....	378
<b>索引 .....</b>	<b>379</b>

# 第 1 章 绪 论

人类的生存和经济社会的发展都离不开能源的使用,自 20 世纪石油危机爆发以来,传统能源的保有量不断减少,面临枯竭。同时随着社会越来越快,能源的消耗量也越来越大,化石燃料的大量燃烧使得生态环境恶化,地球逐渐变暖,污染越来越严重。根据国际能源协会(IEA)的预测<sup>[1,2]</sup>,按照人类目前的发展方式,到 2030 年全球能源消耗将增加 50%(见图 1.1);同时,温室气体的排放也将明显增加,进而产生无法逆转的全球气温升高,并由此催生一系列的环境问题。

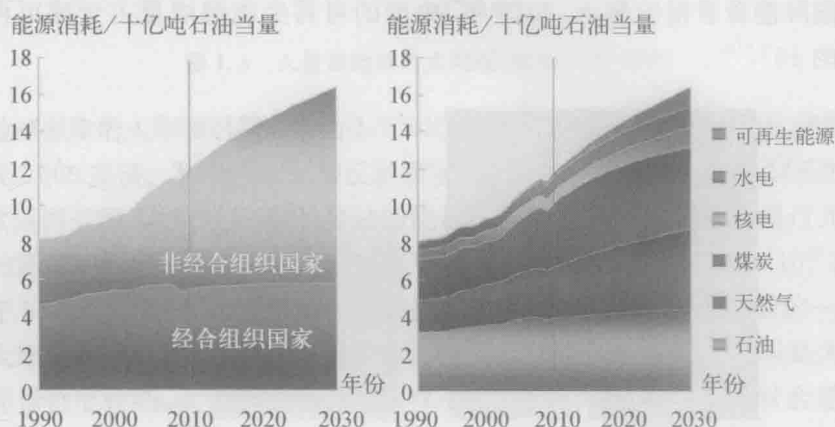


图 1.1 全球主要的国家和地区能源消耗及预测

2014 年中国能耗较上一年增长 2.6%,总量达到 42.6 亿吨标准煤,仍然是世界上最大的能源消费国,占当年世界能源消费量的 23%和世界能源消耗净增长的 61%。2014 年,常规能源中,天然气消耗增长最快,年增长率达到 8.6%,石油增加 3.3%,煤炭只增加 0.1%;其他能源中,水力发电增长最快,年增长率达到 15.7%,约占我国发电总量的 19%;我国的能源结构在持续改进,煤炭虽然还是主要能源,但是其占比降到了历史最低的 66%<sup>[3]</sup>。

常规能源的不断枯竭,导致了全球环境的恶化,因此可再生能源的发展已经成为全球的共同趋势。各个国家和地区都通过一系列刺激政策来鼓励发展可再生能