



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
教育部高等学校能源动力类专业教育教学改革重点项目
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

能源转换与管理技术

Technology of
Energy Conversion and Management

姚 晔 主编 王如竹 主审



非外借



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

教育部高等学校能源动力类专业教育教学改革重点项目

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

能源转换与管理技术

Technology of
Energy Conversion and Management



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

内容提要

本书是教育部高等学校能源动力类专业教育教学改革项目(重点类)资助图书。本书主要内容涉及能源转换与利用的基本原理、分析方法以及各种能源转换技术和相关转换设备,包括机电能量转换,热机能量转换,化热化电能量转换,光热光电能量转换和热电能量转换等;同时还介绍了能量存储和传输的基本方法和技术、能量管理基本理论、能源系统模型和分析方法以及能源管理网络化技术等。

本书体系新颖、知识全面、内容丰富、实用性强,可作为高等学校热能与动力工程专业和新能源工程专业教材,也可供从事节能工作和能源管理的工程技术人员及设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

能源转换与管理技术 / 姚晔主编. —上海: 上海交通大学出版社, 2018
ISBN 978-7-313-18172-5

I. ①能… II. ①姚… III. ①能源-转换②能源管理
IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 235977 号

能源转换与管理技术

主 编: 姚 晔	主 审: 王如竹
出版发行: 上海交通大学出版社	地 址: 上海市番禺路 951 号
邮政编码: 200030	电 话: 021-64071208
出 版 人: 谈 毅	经 销: 全国新华书店
印 制: 上海万卷印刷有限公司	印 张: 30
开 本: 710 mm×1000 mm 1/16	印 次: 2018 年 1 月第 1 次印刷
字 数: 563 千字	
版 次: 2018 年 1 月第 1 版	
书 号: ISBN 978-7-313-18172-5/TK	
定 价: 88.00 元	

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: 021-56928277

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(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室主任、教授)

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)

顾 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,短短十年间(2002—2012 年),全世界一次能源总消费从 96 亿吨油当量增加到 125 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。

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 52 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 28.8 亿吨油当量中竟有 57.7% 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,规划能源新技术的研发和应用。

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、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和技术成果,也包括能源与环境工程一线的理论 and 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,Springer 首批购买了《低铂燃料电池技术》(*Low Platinum Fuel Cell Technologies*),《生物质水热氧化法生产高附加值化工产品》(*Hydrothermal Conversion of Biomass into Chemicals*)和《燃煤烟气汞排放控制》(*Coal Fired Flue Gas Mercury Emission Controls*)三本书的英文版权,John Wiley & Sons 购买了《除湿剂超声波再生技术》(*Ultrasonic Technology for Desiccant Regeneration*)的英文版权。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。

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!

翁史烈

2013年8月

序

“能源转换与管理”目前是上海交通大学机械与动力工程学院热动方向的专业主干课程,授课对象是大学三年级本科生。该课程目前所选的参考用书内容和知识点均比较片面,不能满足“能源转换与管理”这门课程的教学大纲要求,为此,作者根据多年的教学素材积累,编写了《能源转换与管理技术》一书,其内容主要涉及各种能源转换技术和相关转换设备,如机电能量转换、热机能量转换、化热能量转换、化电能量转换、光热转换、光电能量转换和热电能量转换等;同时还介绍了能量存储和传输的基本方法与技术、能量管理基本理论、能源系统模型和分析方法以及能源利用管理网络化技术等。该书所阐述的能源转换技术知识点以传热学、热力学、电化学、电磁学、电机学、化学、物理等为理论基础,是理论知识的实际应用,可提高学生理论联系实际能力并提高读者学以致用能力。该书还结合全国大学生节能减排科技竞赛作品进行能源转换技术与能源管理技术知识点分析,通过大学生优秀作品点评,不仅能让读者轻松掌握各种能源转换技术原理,而且有助于读者掌握知识创新方法,提高读者创新和实践能力。

《能源转换与管理技术》一书涉及知识面广泛,内容丰富,涵盖热能工程、核工程、叶轮机械工程、制冷与低温工程等多个专业方向的知识,有助于开阅读者专业知识和视野,了解能源与动力工程不同专业方向的当前研究热点,促进读者创新思维培养。在此,我特别推荐该书为热能与动力工程专业、新能源专业的教学教材,并推荐给从事节能工作和能源管理的工程技术人员及设计人员,作为他们专业知识充电的重要参考用书。

王如竹

长江学者

教育部高等学校能源动力类专业

教学指导委员会副主任

2017年7月于上海

前 言

本书主要阐述了能源转换与利用的基本原理、分析方法以及各种能源转换技术和相关转换设备,包括机电能量转换、热机能量转换、化热化电能量转换、光热光电能量转换、热电能量转换;同时还介绍了能量存储和传输的基本方法和技术,能量管理基本理论、能源系统模型和分析方法以及能源管理网络化技术等。本书最后给出课程学习考核的基本形式,并展示与本课程内容相关的一些优秀的大学生创新实践作品。

本书共分10章。第1章是能源概述,在介绍有关能源基本概念的基础上,使读者认识能源对人类生活的重要性,并了解人类利用能源的历史和未来。第2章是能量转换的基本理论,重点介绍能量的质量分析方法——焓分析法,详细叙述了不同条件下焓损失的计算方法及其影响因素,并介绍了实际热工设备的焓平衡、焓效率的分析方法。第3章主要介绍了电磁式、电场式和电(磁)致伸缩式机电能量转换基本理论和相关装置。第4章主要介绍了不同形式热机发展史以及它们的工作原理和结构,包括蒸汽轮机、内燃机、燃气轮机和斯特林机。第5章主要介绍化学能基本表现形式、典型化热反应——燃烧与燃烧技术以及电化学电池和燃料电池工作原理。第6章主要介绍太阳能辐射本质、光热和光电能量转换基本理论及相关设备与材料。第7章主要介绍热电技术发展历史、热电能量转换基本原理、典型温差电材料和温差发电装置结构及其应用。第8章主要介绍热能、电能和机械能存储基本原理和方法以及电能、原油和天然气传输相关技术。第9章主要阐述能源管理在节能工作中的重要地位和其所包含的基本内容,介绍企业节能基本概念和计算方法、热能利用方案的技术经济比较原则和基本方法、能源系统分析模型以及弹性系数法和部门分析法两种能源预测技术。第10

章主要介绍互联网能量管理系统基本框架和关键技术,并重点论述了家庭分布式能量管理系统和智能建筑能量管理系统的方案设计及相关网络技术。最后,本书还提出了课程设计目标与任务,精选了一些与本课程内容相关的优秀课程设计作品案例,并做出相应点评。

能源与动力工程专业的学生通过本课程的学习,可掌握各种能源转换的基本原理,了解能源与动力工程不同专业方向(包括热能工程、核工程、叶轮机械工程、制冷与低温工程等)的当前研究热点,开阔学生专业知识和视野。通过对各种能源转换技术的全面论述,可让学生对热力学第一定律和热力学第二定律本质有深入的了解和认识,并具备一定的分析研究和解决热能利用中具体问题的能力。通过课程设计,有助于提高学生创新和实践能力,培养他们的理论联系实际、把知识用于生活并服务社会的创新思维理念。

本书获教育部高等学校能源动力类专业教育教学改革项目(重点类)的资助,上海交通大学制冷与低温工程研究所王如竹教授、吴静怡教授等认真地审阅了本书。另外,华中科技大学的陈焕新教授、东华大学的亢燕铭教授和钟珂教授、东南大学的肖睿教授以及清华大学的石文星教授等也对本书的编写提出了许多宝贵的意见和建议。编者的研究生孙艺臻、祖坎、李伟、陈炯德、戴力以及上海交通大学2016年“能源转换与管理”教学班(001-(2015-2016-2)PO327)的所有本科生做了相关资料收集与文字录入工作,在此一并向他们表示衷心的感谢!

本书体系新颖、知识面广、内容丰富、实用性强,可作为热能与动力工程专业和新能源专业的教材,对从事节能工作和能源管理的工程技术人员及设计人员也有参考价值。

由于编者的水平有限,书中存在的错漏之处,恳请广大读者和专家批评指正。

编 者

2017年6月

字符意义

A	面积, m^2
A_n	不可用能或“炕”, J
B	导体所在的磁通密度, Wb/m^2
c_p	定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_o	真空中光速, $c_o = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$
C	电容, F
C_r	斯特藩-玻耳兹曼常数, $C_r = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
C_{Plank}	普朗克常数, $C_{\text{Plank}} = 6.624 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
d	蒸汽量, kg; 直径, m
e	感应电动势, V
E	能量, J; 电场强度, N/C
E_x	可用能或“烟”, J
e_x	单位质量“烟”, J/kg
E_k	动能, J
E_p	弹性势能, J
E_s	表面能, J
E_r	单位面积辐射功率或辐射密度, W/m^2
E_g	一个光子的能量, J
f	频率, Hz; 费用、总投资
F	电磁力, N
G	自由能, J; 流量, kg/s
ΔG	自由能差, J
g	重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$
h	比焓, J/kg; 高度, m
H	总焓, J
I	烟损失, J; 辐射力, W/rad^3

i	电流, A; 年利率
J	转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
k	弹性系数, N/m
K	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 总导热热阻, W/K; 机电耦合系数
l	长度, m
L	电感, H
m	质量, kg
M	产量
N	线圈串联匝数; 阿伏伽德罗常数($6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)
n	转速, r/s
p	压力, Pa
P	功率, W
q	单位质量热量, J/kg; 电荷量, $\text{A} \cdot \text{s}$
Q	单位时间内传热量或吸(放)热量, W; 能量, J
ΔQ	能量损耗, J
Q_m	机械品质因数
r	电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; 距离, m
R	电阻, Ω
S	总熵, J/K
s	比熵, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 或 $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
ΔS	总熵增, J/K
t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
T	绝对温度, K; 转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; 应力, N/m^2
T_0	环境温度, K
ΔT	绝对温度差, K
U	内能, J
u	电压, V
v	速度, m/s; 比容, m^3/kg
V	体积, m^3
w	单位质量做功, J/kg
W	做功, J; 能量, J
x	位移, m
Z	阻抗, Ω ; 温差电优值
α	塞贝克系数, V/K

β	汤姆孙系数, V/K
η	卡诺因子; 热效率; 烟效率
ψ	磁通量, Wb
λ	波长, m; 导热系数, W/(m · K); 能级
ρ	反射率
ζ	烟损失率; 阻力系数; 节能率; 透射率
σ	表面张力系数, N/m 或 J/m ² ; 电导率, 1/($\Omega \cdot m$)
ω	角速度, rad/s
ε	发射率; 压缩比
τ	时间, s

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 能源概述	001
1.1.1 能源分类	001
1.1.2 能源品质	003
1.1.3 能源与人类生活	005
1.1.4 人类利用能源的历史和未来	006
1.2 能量概述	008
1.2.1 能量的性质	008
1.2.2 能量的基本形式	010
1.2.3 能量的相互转换	013
1.3 本书主要内容	015
第 2 章 能量转换基础	017
2.1 热力学三定律	017
2.1.1 热力学第一定律	017
2.1.2 热力学第二定律	020
2.1.3 热力学第三定律	023
2.2 能源转换热力学分析	023
2.2.1 基于热力学第一定律的能源转换	023
2.2.2 基于热力学第二定律的能源转换	025
2.2.3 案例分析	038
第 3 章 机电能量转换	050
3.1 电磁式机电能量转换	051

3.1.1	工作原理	051
3.1.2	磁能和磁共能	054
3.1.3	单边激励的机电装置	057
3.2	电场式机电能量转换	062
3.2.1	电场能量与电场力	062
3.2.2	电场式电机中的转矩	065
3.2.3	电场式电机与磁场式电机的比较	066
3.3	电(磁)致伸缩式机电能量转换	067
3.3.1	电致伸缩	067
3.3.2	磁致伸缩	072
第4章	热机能量转换	076
4.1	热机发展历史	076
4.1.1	蒸汽轮机发展史	076
4.1.2	内燃机发展史	077
4.1.3	斯特林发动机发展史	079
4.2	蒸汽轮机	082
4.2.1	概述	082
4.2.2	蒸汽轮机结构	083
4.2.3	汽轮机工作原理	089
4.2.4	简单蒸汽动力装置	093
4.3	内燃式热机	098
4.3.1	概述	098
4.3.2	内燃机的燃料	100
4.3.3	内燃机结构及分类	103
4.3.4	内燃机工作原理	105
4.3.5	内燃机的主要性能指标	109
4.3.6	内燃机的特性	111
4.3.7	内燃机增压	113
4.4	燃气轮机	115
4.4.1	燃气涡轮(汽轮机)	115
4.4.2	燃烧室	120

4.4.3 压气机	123
4.5 斯特林发动机	127
4.5.1 斯特林发动机的基本特点	127
4.5.2 斯特林发动机的类型	128
4.5.3 斯特林发动机的问题及解决途径	130
4.5.4 斯特林发动机的理想循环	131
4.5.5 斯特林发动机循环工作过程	134
第5章 化热化电能量转换	137
5.1 化学能基本表现形式	137
5.1.1 电离能	137
5.1.2 电子亲合能	139
5.1.3 晶格能	139
5.1.4 键能	140
5.1.5 反应热	141
5.1.6 盖斯定律	143
5.2 典型化热反应——燃烧与燃烧技术	143
5.2.1 化石燃料的燃烧	143
5.2.2 燃料燃烧技术	147
5.3 化电能量转换	149
5.3.1 电化学电池	149
5.3.2 燃料电池	165
第6章 光热光电能量转换	174
6.1 太阳辐射	174
6.1.1 太阳	174
6.1.2 辐射光谱	180
6.2 光热能量转换	183
6.2.1 电磁波与热辐射	183
6.2.2 黑体与黑体辐射定律	185
6.2.3 光热能量转换设备	188