



能源与环境出版工程
(第二期)

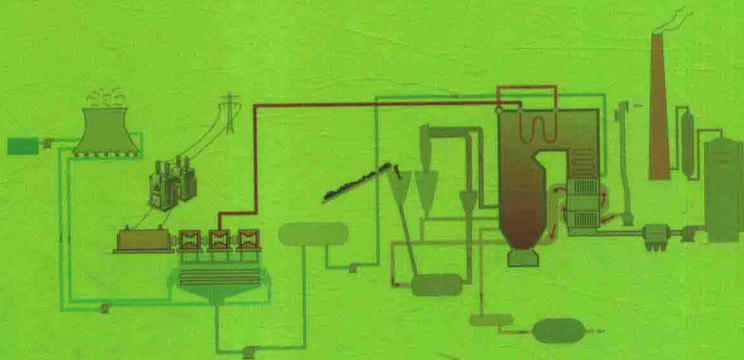
总主编 翁史烈

“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

热能动力工程

Thermal Energy and
Power Engineering

于立军 韩向新 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

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

热能动力工程

Thermal Energy and
Power Engineering

于立军 韩向新 编著



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

内容提要

本书从“理论-实践”相结合的视角,全面、系统地阐释了能源转换过程的分析评价、能源高效清洁利用、热能动力设备的设计运行、企业能源管理,以及节能环保技术开发等知识。

全书共分为7章,主要内容包括:能源转换,系统能量分析,总能系统,热能动力设备,换热设备,辅助动力设备,能源管理。

本书旨在帮助热能与动力工程专业学生、能源管理岗位业务骨干、通用耗能设备的运行人员,以及从事节能环保产业的相关人士树立科学用能的理念,系统掌握有关能源使用过程中所涉及的能源计量与统计分析方法,全面了解能源转换过程中常见设备的工作原理、系统构成和应用案例。同时,还能够对能源管理系统和电力需求侧管理等工作中可能遇到的实际问题进行分析研究。

图书在版编目(CIP)数据

热能动力工程/于立军,韩向新编著. —上海:上海交通大学出版社,2017

能源与环境出版工程

ISBN 978-7-313-16955-6

I. ①热… II. ①于…②韩… III. ①热能-动力工程-研究 IV. ①TK11

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第082263号

热能动力工程

编 著:于立军 韩向新

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:710mm×1000mm 1/16

字 数:393千字

版 次:2017年9月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-16955-6/TK

定 价:148.00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:21

印 次:2017年9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方法和技术成果,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

前 言

在当前国家积极倡导节能减排的宏观背景下,全社会都在树立生态文明理念,大力推广绿色低碳可持续发展的具体措施,因此对相关人才的需求也变得十分迫切。热能与动力工程专业的在校大学生,工作在厂矿企业及机关的能源管理岗位业务骨干、通用耗能设备的运行人员,以及从事节能环保产业的相关人士等,这些学习和工作在节能减排战线的专业人员,亟须一本涵盖动力设备的设计运行、能源转换过程的分析评价、能源高效清洁利用、企业能源管理,以及节能环保技术开发等有关内容的专业书籍。

《热能动力工程》正是满足上述要求的一本专业书籍。第1章为能源转换,对能源转换的相关概念和基础理论、朗肯循环、分布式能源技术和科学用能进行了系统的归纳和阐述;第2章为系统能量分析,详细介绍能源的计量方法、能源统计分析、系统能量平衡方法、能源流程图,以及相关企业应用实例等内容;第3章以蒸汽动力循环系统、燃气-蒸汽联合循环系统、热泵系统和有机朗肯循环系统为例,阐述了总能系统的能量分配、能量转换和转化、基本工艺流程、热经济型评价指标和发展趋势等;第4章为热能动力设备,内容包括锅炉、汽轮机、燃气轮机、内燃机的结构原理、设计运行和技术发展等;第5章为换热设备,内容概括为机械行业工业加热炉的结构、分类、常规炉型特点,干燥的基本工作原理、干燥设备分类及工艺,余热资源的来源、利用方式和设备,蒸汽蓄热器的工作原理、结构以及相关应用实例;第6章为辅助动力设备,全面系统地阐述了泵、风机、凝汽器、冷却塔的分类、基本原理、性能参数和实际运行等;第7章为能源管理,结合相应的实际案例介绍了能源管理体系的构建和主要功能、电力需求侧管理的主要手段和技术、合同能源管理的运作模式、风险控制和相关支持政策等内容。学习本书

不仅能够帮助读者树立科学用能的理念,系统掌握有关能源使用过程中所涉及的能源计量与统计分析方法,全面了解能源转换过程中常见设备的工作原理、系统构成和应用案例,同时,还能够对能源管理系统和电力需求侧管理等工作中可能遇到的实际问题进行分析研究。

本书在编写过程中充分考虑到读者的知识基础和认知能力的不同,在基础知识安排上做到有层次、有梯度,由浅入深,由易而难,步步推进,力图帮助读者系统掌握专业知识点。为了便于学习运用,本书还充分注意了内容的可读性和实用性,注重理论联系实际,以更好地满足未来实践的需要。本书不仅可以满足热能与动力工程专业学生的课程学习需求,同时还能满足当今社会相关专业人士获得实际专业知识的需求,为他们今后从事节能减排事业或能源管理工作提供必要的知识储备,也为开展与能源转换过程相关的产品开发和科学研究工作打下坚实基础,相信读者一定会从中受益。

目 录

第 1 章 能源转换	001
1.1 能源转换方式	001
1.1.1 能量转换和守恒定律	001
1.1.2 热力学第一定律	002
1.1.3 热力学第二定律	004
1.1.4 能源的分类与转换方式	008
1.2 朗肯循环	012
1.2.1 朗肯循环简介	012
1.2.2 朗肯循环过程	012
1.2.3 朗肯循环效率	013
1.2.4 再热循环	017
1.2.5 回热循环	019
1.2.6 朗肯循环应用	022
1.3 分布式能源	027
1.3.1 分布式能源概述	027
1.3.2 分布式能源技术	031
1.3.3 分布式能源发展	045
1.4 科学用能概述	052
1.4.1 能源的开发利用	052
1.4.2 能的可用性	056
1.4.3 科学用能的概念	057
参考文献	062
第 2 章 系统能量分析	063
2.1 能源计量方法	063
2.1.1 能源计量简介	063

2.1.2	能源计量的重要性	064
2.1.3	能源计量器具	065
2.1.4	能源计量方法和实例	066
2.2	能源统计分析	071
2.2.1	能源统计简介	071
2.2.2	能源统计范畴	073
2.2.3	能源统计能耗指标	075
2.3	系统能量平衡	079
2.3.1	系统能量平衡简介	079
2.3.2	系统能量平衡模式	081
2.3.3	系统能量平衡方法	082
2.3.4	系统能量平衡计算	083
2.3.5	系统能量平衡表	085
2.4	能源流程图	089
2.4.1	能源流程图的作用	089
2.4.2	绘制能源流程图的方法	092
2.4.3	应用实例	094
	参考文献	105
第3章	总能系统	107
3.1	蒸汽动力循环系统	107
3.1.1	工艺流程	107
3.1.2	热经济性评价指标	110
3.1.3	循环热效率的提高措施	112
3.1.4	原则性热力系统	116
3.2	燃气-蒸汽联合循环	117
3.2.1	工艺流程	117
3.2.2	系统结构	118
3.2.3	系统效率	122
3.2.4	整体煤气化联合循环发电系统(IGCC)	123
3.3	热泵系统	126
3.3.1	基本概念	126
3.3.2	热力学原理	131
3.3.3	应用状况与发展	132

3.4 有机朗肯循环系统	134
3.4.1 热力学原理	135
3.4.2 工作介质	137
3.4.3 有机工质膨胀机	141
3.4.4 应用与发展	143
参考文献	145
第4章 热能动力设备	147
4.1 锅炉	147
4.1.1 基本结构与工艺流程	147
4.1.2 关键技术参数与效率	156
4.1.3 污染物的形成与控制	158
4.1.4 锅炉技术发展	160
4.2 汽轮机	161
4.2.1 基本结构与分类	161
4.2.2 汽轮机的级	164
4.2.3 多级汽轮机	170
4.2.4 汽轮机发展问题	172
4.3 燃气轮机	173
4.3.1 基本结构和基本原理	173
4.3.2 技术指标	177
4.3.3 分类与应用	178
4.3.4 发展与问题	180
4.4 内燃机	181
4.4.1 基本结构与工作原理	181
4.4.2 主要性能指标与特性	187
4.4.3 污染物的形成与控制	190
参考文献	192
第5章 换热设备	193
5.1 工业加热炉	193
5.1.1 分类与结构	193
5.1.2 常规炉型	196
5.1.3 性能参数	198

5.1.4 炉型选择与发展趋势	199
5.2 工业干燥	202
5.2.1 干燥工作原理	202
5.2.2 干燥设备分类	203
5.2.3 常规干燥设备	204
5.2.4 新型干燥设备	209
5.3 余热回收	210
5.3.1 余热的来源与利用现状	211
5.3.2 余热回收方式	212
5.3.3 余热回收技术与设备	213
5.4 蒸汽蓄热器	218
5.4.1 工作原理	218
5.4.2 分类与结构	219
5.4.3 实际应用	221
参考文献	225
第6章 辅助动力设备	227
6.1 泵	227
6.1.1 泵的分类	227
6.1.2 叶片泵	229
6.1.3 叶片泵的基本性能参数	232
6.1.4 泵的运行	235
6.1.5 其他类型的泵	237
6.2 风机	240
6.2.1 风机的分类	240
6.2.2 风机的结构与工作原理	241
6.2.3 风机的性能指标	245
6.2.4 风机的运行与节能	247
6.3 凝汽器	247
6.3.1 工作原理	247
6.3.2 分类与结构	248
6.3.3 性能指标	250
6.3.4 结垢与清洗	252
6.4 冷却塔	254

6.4.1 工作原理、分类与基本结构	255
6.4.2 设计与关键参数	257
6.4.3 实际运行管理	260
参考文献	262
第7章 能源管理	263
7.1 企业能源管理	263
7.1.1 企业能源管理的目的	263
7.1.2 企业能源管理的要素	263
7.1.3 企业能源管理的特点	264
7.1.4 企业能源管理的职责	266
7.1.5 企业能源管理机构及岗位	267
7.1.6 企业能源管理体系	269
7.1.7 企业能效对标管理	270
7.1.8 企业能源管理的实际案例	272
7.2 能源管理系统	275
7.2.1 能源管理系统的演变过程	275
7.2.2 能源管理系统的主要功能	277
7.2.3 能源管理系统的构建	278
7.2.4 能源互联网	283
7.3 电力需求侧管理	285
7.3.1 电力需求侧管理概述	285
7.3.2 电力需求侧管理的主要手段	285
7.3.3 电力需求侧管理的其他手段	290
7.3.4 电力需求侧管理技术与实例	294
7.4 合同能源管理	297
7.4.1 内涵定义	297
7.4.2 主要特点	298
7.4.3 国内外发展现状	299
7.4.4 合同能源管理行为主体和要素	302
7.4.5 合同能源管理的运作模式	303
7.4.6 合同能源管理的风险及控制	304
7.4.7 未来收益权质押	305
7.4.8 有关支持政策	306

7.4.9 实际案例	307
参考文献	310
索引	312

第1章 能源转换

1.1 能源转换方式

能源是指可产生各种能量(如热能、电能、光能和机械能等)或可做功物质的统称。能源是人类活动的物质基础,能源开发和有效利用程度是生产技术和生活水平的重要标志。随着世界经济持续快速发展,能源短缺和能源供需矛盾日益突出,而人们对能源,如煤炭、石油、天然气,以及太阳能、风能等的利用过程,都离不开能源转换。因此,掌握能源转换的基本原理以及常见能源的转换方式显得尤为重要。本节首先阐述能量转换的基本原理,然后介绍常见能源的转换方式。这里需要指出,能量转换不仅有“量”的变化,还有“质”的改变。

1.1.1 能量转换和守恒定律

自然界中能量形式和运动形式是相对应的:如物体运动具有机械能,电荷运动具有电能,分子的无规则运动体现在物体的内能上等,而运动是物质的固有属性。因此,能量和物质也是相互依存的,既然物质是不能被创造和被消灭的,那么能量也就不可能被创造和被消灭。这就得到了能量转换和守恒定律,它指出:“自然界的一切物质都具有能量:能量既不能被创造,也不能被消灭,而只能从一种形式转换成另一种形式,从一个物体传递到另一个物体;在能量转换与传递过程中,能量的总量恒定不变。”

这一定律在现在看来似乎是浅显易懂、理所当然的,但是能量守恒定律的发现经历了很多不同领域的科学家们曲折艰辛的探索^[1, 2]。德国物理学家、医生迈尔(Julius Robert Mayer, 1814—1878年)在1842年发表了《论无机性质的力》的论文,表述了物理、化学过程中各种力(能)的转化和守恒的思想。迈尔是公认的历史上第一位提出能量守恒定律并计算出热功当量的人。1843年8月21日,焦耳(James Joule, 1818—1889年)在英国科学协会数理组会议上宣读了《论磁电的热效应及热的机械值》论文,强调了自然界的能是等量转换、不会消失的。焦耳用了