



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

能量产生、转换、 储存、节能与耦联

**Energy: Production, Conversion,
Storage, Conservation, and Coupling**

[美]雅萨尔·德米雷尔 (Yaşar Demirel) 著
闫怀志 等译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

能量产生、转换、 储存、节能与耦联

[美] 雅萨尔·德米雷尔 (Yaşar Demirel) 著

国怀志 等译



机械工业出版社

本书是能源领域的综合性图书, 全书按照能量平衡和热力学的内在联系这条主线, 以循序渐进、图文并茂的方式, 全面、系统地阐述了能量产生、转换、储存、节能与耦联的诸多方面。其中, 重点介绍了能源类型、机械能和电能、内能与焓、能量平衡、能量产生、能量转换、能量储存、节能和生物系统的能量耦联等问题。全书还结合各章重点内容, 给出了130道全解例题。

本书可用作能源类专业本科生、研究生课程和相关培训的教材, 也可作为能源发电、动力工程、工程热物理、电力工程、可再生能源以及相关行业的工程人员、研究人员和管理人员的参考资料。

Translation from English language edition:

Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling
By Yaşar Demirel.

Copyright © 2012 Springer London Springer London is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2013-4244 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

能量产生、转换、储存、节能与耦联 / (美) 德米雷尔 (Demirel, Y.) 著; 闫怀志等译. -北京: 机械工业出版社, 2015. 6

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling

ISBN 978-7-111-50132-9

I. ①能… II. ①德…②闫… III. ①能-研究 IV. ①O31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 091939 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 顾 谦 责任编辑: 顾 谦

责任校对: 张 征 封面设计: 马精明

责任印制: 李 洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2015 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 23.5 印张 · 453 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-50132-9

定价: 89.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

译者序

毫无疑问，我们当下正处于信息时代的信息社会。信息社会是指脱离工业化社会以后，信息将起主要作用的社会，其典型特征是信息技术和信息产业在经济和社会发展中的作用日益加强。因此有人认为，只有在从事大规模物质生产的农业社会和工业社会中，物质和能量才是主要的资源；而在信息社会中，信息成为比物质和能量更为重要的资源。因此，在某种意义上，能量的作用有被逐渐弱化的趋势，进而其地位也日益遭到人们不应有的忽视。

实际上，现代科学认为，物质、能量和信息作为客观世界的三个基本要素，无论是从哲学还是从系统科学的角度来看，这三者之间的关系都非常紧密。世界万事万物都处于不断的发展运动之中，而能量是物质运动转换的测度（简称“能”），用以表征物理系统做功的本领。物质的运动形式不同，能量的形式也随之不同，它们可以通过一定的方式互相转换。物质是信息的源泉，任何信息运动的过程都离不开物质的运动过程。信息又与能量密不可分，信息的获取和传递离不开能量，能量的产生与转换也离不开信息。而且，信息、物质、能量三者之间可以相互转化。信息虽然既不是物质也不是能量，但在一定条件下，信息可以转化成物质和能量。因此，从这个意义上说，能量在任何社会都是不容忽视、不可或缺的基本资源，在目前的工业4.0时代，也不例外。

在气候变暖、环境恶化和自然资源枯竭的危机不断加剧的今天，能源相关问题的重要性，无论是对于全球还是对于我国这样的发展中大国来说都是不言而喻的。寻求环境友好、可持续发展的能源解决方案一直是科学界和工程界不懈追求的目标之一。从物理学意义上讲，能源的能量平衡是与热力学本质上联系在一起的。讨论能量问题，自然离不开其产生、转换、储存、节能与耦联等一系列问题。

然而，目前国内外就上述问题系统、全面地专门著述的图书尚不多见。由国际知名的能源工程专家、美国内布拉斯加大学林肯分校（University of Nebraska Lincoln）教授 Yaşar Demirel 博士撰写并由全球著名科技出版商德国施普林格（Springer）集团出版的《Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling》一书，是本领域难得的一本综合性专著。本书可用作能源类专业本科生、研究生课程和相关培训的教材，也可作为能源发电、动力工程、工程热物理、电力工程、可再生能源以及相关行业的工程人员、研究人员和管理人员的参考资料。以“为中华崛起传播智慧”为使命的机械工业出版社适时引进了本

IV 能量产生、转换、储存、节能与耦联

书的中文版权，并邀请我担纲本书主译，作为同样以传播知识为使命的科教工作者，我很愉快地接受了邀请。我们有理由相信，本书中译本的出版，必将有力地推动我国能源相关领域的教学和科研水平的提升。

本书以能量平衡和热力学的内在联系为主线，采用循序渐进、图文并茂的方式，分10章全面、系统地阐述了在重要的物理、化学和生物过程中的能量产生、转换、储存、节能和耦联等诸多问题。全书首先介绍了能量的基本术语、性质、形式、来源和平衡等若干基本概念，随后逐章重点阐述了能源类型、机械能和电能、内能与焓、能量平衡、能量产生、能量转换、能量储存、节能和生物系统中的能量耦联等问题。全书每章都包含一系列支撑数据和热力学图表，并提供了130道全解例题和642道习题。最后还在附录部分提供了包括蒸汽表在内的所有必要的的数据，方便读者使用。需要说明的是，为了便于读者查询数据，原书附录全部以电子版形式放在机械工业出版社官网 www.cmpbook.com 上，搜索本书，在本书页面中单击“相关下载”即可下载，书中则不再出现附录。

本书由闫怀志担任主译，在翻译过程中，牟启希、卢道英、闫振民、黄凯、顾帆、姚峰、成亮、赵茂祥、郝鹏飞、王冬、王维、李娟、宋杰、张小坤、杜智聪、高能、冯金生、秦暎和夏映辉等人分别参与了资料调研、图表绘制、文字校对和名词审核等部分工作，在此一并致谢！

在本书的选题策划和编辑出版过程中，本人得到了机械工业出版社顾谦编辑的充分信任、大力支持和热情帮助，他的敬业态度和专业水准给译者留下了深刻印象。最后，本人要衷心感谢父母给予我的无限包容和作出的无私奉献，感谢小女给予我的热切期盼和带给我的无尽慰藉，感谢朋友们给予我的热情鼓励和真诚帮助。有了他们的理解和支持，本人才能以平和的内心，心无旁骛地做好自己想做的事。

由于本书内容丰富，涉及专业领域众多，加之时间仓促和水平所限，翻译难免有不妥之处，还请广大读者批评指正。

闫怀志

bityhz001@sina.com

2015年初春于北京中关村

原书前言

本书是旨在满足能源领域综合性需求的首次尝试。能源及其对日常生活影响的重要性不容置否，因此现在很多教育机构都会开设能源方面的主修或者辅修课程。本书是为背景各异而且有兴趣学习更多的能源知识并攻读该方向学位的学生准备的。虽然，本书是通过能量平衡与热力学自然地联系在一起，但它涵盖了涉及速率和传输过程的系统中有关能源的许多问题。

本书以由浅入深的方式循序渐进地分章介绍了有关能源的五大方面，主要内容涉及能量产生、转换、储存、节能与耦联等方面。在讨论这些内容之前，本书首先在第1章给出了绪论和基本概念；在第2章讨论了一次能源和二次能源类型；第3章论述了机械能和电能；第4章讨论了内能、焓、反应热、传热；而第5章则讨论了能量平衡；第6章论述了主要是通过循环过程的能量生产；第7章以热效率为重点讨论了能量转换问题；第8章讨论了包括通过显热、潜热实现储热在内的储能技术；第9章论述了节能；第10章则是简述了生物系统中的能量耦联问题。全书各章共给出了130道全解例题，各章后总共列出了642道习题。这些例题和习题为读者提供了一个深入了解能量概念和各方面知识的机会。

我要感谢帮助我准备、撰写以及改进本书的所有人。我要特别感谢 Brad Hailey 和 Nghi Nguyen 在准备图表、检查问题以及反复审读文字方面给我的帮助。显而易见，本书将会得益于学生和同事的建议而使得重印本不断成熟与完善。我特别期盼本书的使用者与我联系，为未来可能的再版提供宝贵的修订建议和意见。

林肯，内布拉斯加州
Yaşar Demirel
ydemirel2 @unl. edu

缩 略 语

- ATP 三磷酸腺苷
- ADP 二磷酸腺苷
- ASHRAE 美国供暖、制冷和空调工程师协会
- AUFE 年度燃料利用效率
- CAES 压缩空气储能
- COP 性能系数
- DOE 美国能源部
- EER 能量效率比
- EIA 能量信息管理
- EPA 美国环境保护署
- ETB 工程工具箱
- HP 热泵
- HVAC 暖通空调
- NREL 美国国家可再生能源实验室
- PCM 相变材料
- SEER 季节性能量效率比

目 录

译者序

原书前言

缩略语

第 1 章 绪论：基本定义	1
1.1 系统	1
1.2 物理性质与变量	2
1.3 量纲与单位	2
1.4 数量与分数的度量	4
1.5 力	5
1.6 温度	6
1.7 压强	7
1.8 体积	10
1.9 状态	12
1.9.1 热力学平衡状态	12
1.9.2 理想气体状态方程	12
1.9.3 饱和液态与饱和汽态	13
1.9.4 蒸汽表	13
1.9.5 饱和液-汽混合物	16
1.9.6 分压强与饱和压强	17
1.10 过程	18
习题	19
参考文献	24
第 2 章 能量与能源类型	25
2.1 能量	25
2.2 能源类型	26
2.2.1 一次能源	26
2.2.2 二次能源	28
2.3 不可再生能源	28
2.3.1 煤	28
2.3.2 石油（原油）	29

VIII 能量产生、转换、储存、节能与耦联

2.3.3 石油馏分	30
2.3.4 天然气	32
2.3.5 核能	33
2.4 燃料的热值	34
2.4.1 能量密度	36
2.5 可再生能源	40
2.5.1 水能	41
2.5.2 太阳能	42
2.5.3 生物质与生物质能	44
2.5.4 风能	51
2.5.5 地热能	52
2.5.6 海洋能	53
2.5.7 可再生能源贡献的预测	53
2.6 氢	53
2.7 电能	54
2.8 磁能	56
2.9 化学能	56
2.10 能量与全球变暖	57
2.11 应对全球变暖问题	59
习题	61
参考文献	64

第3章 机械能与电能

3.1 机械能	66
3.2 动能	66
3.3 势能	68
3.4 压力能	69
3.4.1 压头	70
3.5 表面能	72
3.6 声能	72
3.7 机械功	72
3.7.1 功率	73
3.7.2 边界功	74
3.7.3 等熵过程功	76
3.7.4 多变过程功	77
3.7.5 轴功	78
3.7.6 弹簧功	79
3.8 电能	80

3.8.1 电势能	80
3.8.2 电能的估算	81
3.8.3 电功率	81
3.8.4 电容	82
3.9 其他形式的功	83
习题	83
参考文献	88
第4章 内能与焓	89
4.1 内能	89
4.2 焓	91
4.3 热量	95
4.3.1 显热	96
4.3.2 潜热	97
4.3.3 发生相变的加热过程	98
4.3.4 反应热	101
4.3.5 标准燃烧热	104
4.4 温度对反应热的影响	105
4.5 标准焓变	107
4.6 绝热火焰温度	108
4.7 来自燃烧过程的空气污染	109
4.8 混合热	110
4.9 使用量热计进行热量测量	111
4.10 焓湿图	113
4.11 热传递	115
4.12 熵	118
4.13 火用	119
4.14 流体流动功	120
习题	121
参考文献	128
第5章 能量平衡	129
5.1 平衡方程	129
5.2 质量平衡	130
5.3 能量平衡	131
5.3.1 非稳态流动系统	132
5.3.2 稳态流动系统	132
5.4 熵平衡	134

X 能量产生、转换、储存、节能与耦联

5.5	火用平衡	135
5.6	流体流动过程	137
5.6.1	汽轮机、压缩机与泵	137
5.6.2	喷管和扩散器	139
5.6.3	混合室	140
5.6.4	节流阀	141
5.6.5	热交换器	143
5.6.6	管道和风道流动	145
5.7	循环过程中的能量平衡	145
	习题	146
	参考文献	152
第6章	能量生产	153
6.1	能量生产简介	153
6.2	电力生产	153
6.3	能量传输	156
6.3.1	分布式能源	157
6.4	热机循环发电	157
6.4.1	卡诺循环	160
6.4.2	朗肯循环	161
6.4.3	布雷顿循环	164
6.4.4	斯特林热机	165
6.4.5	混合加热循环	165
6.5	蒸汽发电厂的发电改进	165
6.5.1	改进冷凝器和锅炉的工作条件	166
6.5.2	再热蒸汽	166
6.5.3	能量再生	168
6.5.4	再热-回热朗肯循环	170
6.6	地热发电站	171
6.7	热电联产	173
6.8	核电站	176
6.9	水电站	177
6.10	风电场	178
6.11	太阳能发电站	180
6.12	氢气生产	182
6.13	燃料电池	183
6.13.1	直接甲醇燃料电池	185
6.13.2	微生物燃料电池	185

6.14 生物质与生物能源生产	186
6.14.1 生物乙醇生产	187
6.14.2 生物柴油与绿色柴油生产	188
6.14.3 来自生活垃圾的能源	189
6.15 其他发电方式	189
6.16 平准化能源成本	190
6.17 热力成本	191
6.18 生态成本	192
6.18.1 生态规划	192
6.18.2 燃煤发电厂	193
6.18.3 核电站	193
习题	193
参考文献	197
第7章 能量转换	199
7.1 能量转换简介	199
7.2 系列能量转换	201
7.3 燃料的化学能转换成热能	201
7.3.1 燃料的热值	201
7.4 能量转换的热效率	203
7.5 理想流体流动的能量转换	204
7.6 损失功	207
7.7 机械转换的效率	209
7.8 通过热机实现的热能转换	212
7.8.1 空气标准假设	215
7.8.2 理想气体的等熵过程	215
7.8.3 通过发电机转换的机械能	216
7.8.4 卡诺热机效率	217
7.8.5 内可逆热机效率	219
7.8.6 朗肯热机效率	219
7.8.7 布雷顿热机效率	223
7.8.8 奥托热机效率	229
7.8.9 狄塞尔热机效率	234
7.8.10 埃里克森热机和斯特灵热机的效率	237
7.8.11 阿特金森热机效率	238
7.9 热机的效率改进	239
7.10 水电	239
7.11 风电	241

XII 能量产生、转换、储存、节能与耦联

7.12 地热发电	242
7.13 海洋热能转换	242
7.14 热电效应	243
7.15 热泵和制冷机的效率	243
7.15.1 热泵	244
7.15.2 制冷机	246
7.16 燃料电池的效率	249
7.17 生物系统中的能量转换	250
7.17.1 通过氧化磷酸化实现的能量转换	251
7.17.2 来自光合作用的能量	251
7.17.3 代谢	251
7.17.4 生物燃料	251
7.17.5 将生物质转化为生物燃料	252
习题	253
参考文献	262
第8章 能量储存	264
8.1 能量储存与调节	264
8.1.1 水	264
8.1.2 氢气	265
8.2 能量储存的类型	265
8.3 热能储存	266
8.3.1 太阳能储存	268
8.3.2 显热储存	269
8.3.3 使用相变材料储存潜热	270
8.3.4 蓄冰储能	274
8.3.5 熔盐技术	274
8.3.6 季节性热能储存	274
8.3.7 用于温室供暖的季节性太阳能热能储存	275
8.3.8 地下热能储存系统	278
8.3.9 地下含水层热能储存	279
8.3.10 地埋管热能储存	280
8.4 电能储存	280
8.4.1 水电能储存	282
8.4.2 电池中的电能储存	282
8.4.3 用于电动小汽车的可充电电池	284
8.5 化学能储存	285
8.5.1 生物能源	285

8.5.2 生物燃料储能	286
8.5.3 伏特电池中的能量储存	287
8.6 机械能储存	288
8.6.1 压缩空气储能	288
8.6.2 飞轮储能	290
8.6.3 液压蓄能器	290
8.6.4 弹簧	291
习题	291
参考文献	294
第9章 节能	296
9.1 节能与回收	296
9.2 工业过程中的节能	296
9.2.1 发电过程中的节能	297
9.2.2 压缩做功和膨胀做功中的节能	306
9.2.3 使用高效率电动机实现节能	310
9.3 家庭供暖和降温的节能	311
9.3.1 使用化石燃料为家庭供暖	312
9.3.2 使用电阻的家庭供暖	313
9.3.3 使用太阳能系统的家庭供暖	313
9.4 能量效率标准	315
9.4.1 空调的效率	317
9.4.2 最大可能的冷却效率	318
9.4.3 燃料效率	320
9.4.4 车辆的燃料效率	323
9.4.5 汽车行驶的节能	325
9.4.6 再生制动	326
9.5 电力配送和智能电网中的节能	326
9.5.1 待机功率	327
9.5.2 照明中的节能	327
9.5.3 能源采集	328
9.6 节能和可持续性	328
9.7 火用节约和火用	329
9.8 使用夹点分析实现公用工程的能量回收	329
9.8.1 组合曲线	330
习题	334
参考文献	342

第 10 章 能量耦联	344
10.1 能量耦联与吉布斯自由能	344
10.2 生命系统中的能量耦联	345
10.3 生物能量学	345
10.3.1 线粒体	346
10.3.2 电子传递链与 ATP 合成	347
10.3.3 主动转运	347
10.4 能量耦联的简单分析	348
10.5 能量耦联变化	350
10.5.1 能量耦联的调节	351
10.5.2 解耦联	353
10.5.3 滑动和泄漏	353
10.6 代谢	353
10.6.1 分解代谢	353
10.6.2 合成代谢	354
10.7 生物能源	354
习题	358
参考文献	359

第 1 章 绪论：基本定义

1.1 系统

系统是空间中选择用于研究的一组物质或者带有边界的一个区域，如图 1.1a 所示。边界是指将系统从其外界中隔离出来的一种表面。在简单系统中，没有电、磁、重力、运动以及表面张力效应。这些效应是由于外力场而形成的，而且对于大多数工程问题来说可以忽略不计。如图 1.1b 所示，边界可以是固定的或者是移动的。系统的边界之外就构成了系统的外界。环境是指其性质在任意点均不受过程影响的那些直接外界以外的区域。控制体积是空间中的任意区域，质量和能量可以穿越其边界，如图 1.1c 所示。控制体积可以涉及与其外界相互作用的热、功以及物质流。

下面给出各种不同类型系统的简要定义：

- 开口系统是空间中的任意区域，质量和能量能够通过该区域穿越边界，如图 1.1c 所示。
- 闭口系统包括固定数量的物质，而且物质不可以通过其边界，但是能量可以以热或者功的形式穿越边界，如图 1.1d 所示。
- 独立系统与它们的外界不进行质量和能量交换。
- 绝热系统与它们的外界不进行热交换。
- 在等温条件下，系统在系统边界之内各处均具有同一温度。
- 等压系统在系统边界之内各处均具有同一压强。
- 等容系统在系统边界之内具有恒定的容积。
- 稳态系统具有独立于时间的性质，例如，系统的能量值并不随时间改变。

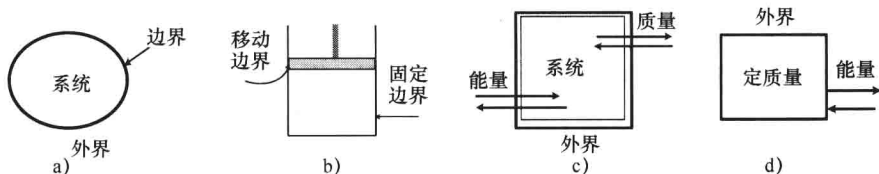


图 1.1 a) 边界将系统与其外界分开；b) 一个带有移动边界和固定边界的闭口系统；
c) 一个带有控制体积的开口系统，一个开口系统能够与其外界交换质量和能量；
d) 一个闭口系统并不与其外界进行物质交换，但能够进行能量交换

1.2 物理性质与变量

物理性质是一个系统的可观测的特征，比如温度或压强。两种常用的物理性质为状态性质与路径变量。状态性质的值取决于系统的状态，温度、压强与体积就是状态性质的实例。另一方面，路径变量的变化取决于一个系统从一种状态改变到另一种状态所采取的路径。例如，功与热均为路径变量，而且是在系统通过特定的路径实现状态改变的时候发生的。因此，在一个过程中，从状态1变化到状态2，先进行等热变化再进行等容变化与先进行等容变化再进行等热变化，这两种情况下的热变化是不同的。

- 广义物理性质，比如说体积，取决于系统的规模。如果系统包含几个部分，系统的体积为其各部分体积之和，因此广义物理性质是附加的。
- 狭义物理性质并不取决于系统的规模。狭义物理性质的一些例子是温度、压强以及密度（比体积）。

对于一个均匀系统，狭义物理性质可以通过将广义物理性质划分为系统的总数量（例如，比体积 m^3/kg 或摩尔容积 m^3/mol ）计算而得。

1.3 量纲与单位

量纲是度量（比如，质量、长度、温度与时间等）的基本概念。单位是量纲表示的方法，比如，长度采用英尺[⊖]或米作为单位。能量可以采用几种不同的单位来表示。科学和工程数量表示是基于“国际单位制”的，“国际单位制”通常缩写为SI单位制，这种单位制从1960年开始采用^[1]。表1.1为六种基本物理量：长度、质量、时间、电流、温度与发光强度。另一方面，美国工程系统单位（美制）使用英制系统单位：长度单位为英尺（ft），质量单位为磅（ lb_m ），温度单位为华氏度（ $^{\circ}\text{F}$ ）。目前，被广泛接受的能量测量单位为国际单位制单位：焦耳（J）。其他的一些能量单位有千瓦时（kWh）与英制热力单位（Btu）。1kWh精确地等于 $3.6 \times 10^6 \text{J}$ ，而1Btu则大致相当于1055J。坎德拉（cd）为一个黑体在 1atm^{\ominus} 和凝固铂温度下的表面发光强度。表1.2为不同的质量与长度单位。

⊖ 1英尺（ft）=0.3048m。——译者注

⊖ $1\text{atm} = 101.325\text{kPa}$ 。——译者注