国际电气工程先进技术译丛

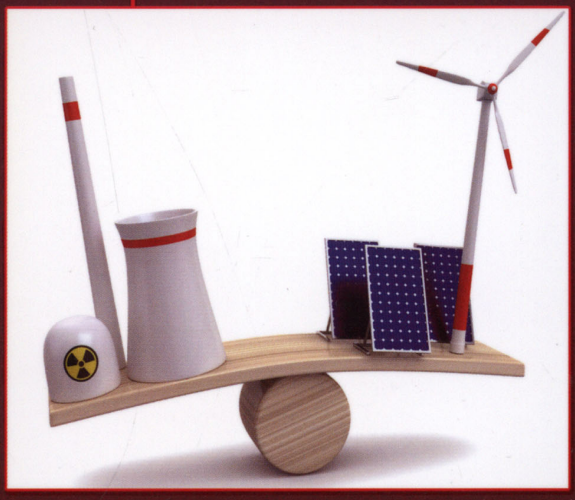
Springer

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

本书特色

了解能源在各个处理过程中的可持续利用是科学和工程研究的一个组成部分，这要依靠对能源系统知识的良好掌握。虽然许多教育和科研机构目前都已经提供了能源相关的学位项目，但是一直缺乏一本跨越工程和科学领域应用的综合性教材，来介绍和阐释可持续的能源系统。本书每章都包含一系列支撑数据和热力学图表，同时，附录还为读者提供了包括蒸汽表在内的所有必要的数据。本书在阐述以下主题之前，还对能量的基本物理量、性质、形式、来源和平衡进行了清晰的介绍：

- 在重要的物理、化学和生物过程中的能量生产和转换；
- 节能及其对可持续发展的影响；
- 各种形式的能量储存；
- 生命系统中的能量耦联和生物能学。



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
闫怀志 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。从物理学意义上来讲，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

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、秦暕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的，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

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 …… 66

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

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

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。

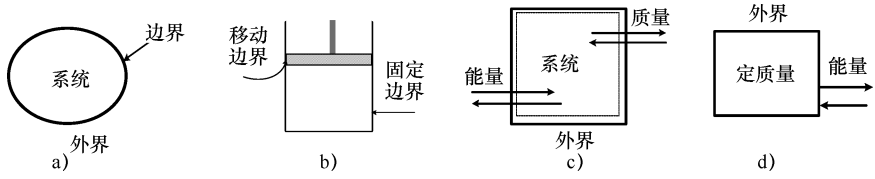


图 1.1　a）边界将系统与其外界分开；b）一个带有移动边界和固定边界的闭口系统；c）一个带有控制体积的开口系统，一个开口系统能够与其外界交换质量和能量；d）一个闭口系统并不与其外界进行物质交换，但能够进行能量交换

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㊀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（°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 3.6×10^6J，而 1Btu 则大致相当于 1055J。坎德拉（cd）为一个黑体在 1atm㊁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。

㊀ 1 英尺（ft）= 0.3048m。——译者注

㊁ 1atm = 101.325kPa。——译者注

表 1.1　基本物理量及其单位

物　理　量	物理量符号	单位名称和符号
长度	l	米（m），英尺（ft）
质量	m	千克（kg），磅（lb）
时间	t	秒（s）
电流	I	安（A）
温度	T	开（K），兰肯（°R）
发光强度	I	坎（cd）

表 1.2　质量与长度单位及其定义

单　　位	符　　号	单 位 换 算
千克	kg	1000g = 2. 204lb = 32. 17oz
盎司	oz	28. 35g = 6. 25 × 10^{-2}lb
磅	lb	0. 453kg = 453g = 16oz
长吨，英制吨	ton	2240lb = 1016. 046kg
短吨，美制吨	sh ton	2000lb = 907. 184kg
吨	t	1000kg
埃	Å	1 × 10^{-10}m = 0. 1nm
英尺	ft	1/3yd = 0. 3048m = 12in
英寸	in	1/36yd = 1/12ft = 0. 0254m
微米	μm	1 × 10^{-6}m
英里	mile	5280ft = 1760yd = 1609. 344m
码	yd	0. 9144m = 3ft = 36in

基本物理量可以用于导出其他物理量和变量，这些量称为导出单位，比如面积、体积、密度、压强、力、速度、加速度、能量以及功率等。例如，速度为长度/时间：l/t，加速度为 l/t^2，力为 ml/t^2。表 1.3 为根据基本物理量导出的一些变量，而表 1.4 为使用国际单位很小和很大量级的前缀。

表 1.3　一些导出度量物理量和变量

物　理　量	物理量符号	单 位 符 号
面积	A	m^2，ft^2
体积	V	m^3，ft^3
密度	ρ	kg/m^3，lb/ft^3
压强	P	帕（Pa），psi

（续）

物　理　量	物理量符号	单 位 符 号
速度	v	m/s，ft/s
加速度	a	m/s^2，ft/s^2
体积流量	Q	m^3/s，ft^3/s
质量流量	m	kg/s，lb/s
质量通量	m	kg/m^2s，lb/ft^2s
力	F	牛（N），kg m/s^2
能量	E	焦（J），Btu（1055.05J）
功率	P	瓦（W），（W = J/s），Btu/s
能量通量	E	J/m^2s，Btu/ft^2s
电势差	ψ	伏（V）
电阻	R	欧（X）
电荷	C	库（C）
频率	f	赫（Hz）
电通量	e	C/m^2

表 1.4　国际单位制的词头

词　　头	词 头 符 号	所表示的因数	示　　例
拍［它］	P	10^{15}	拍米，$Pm = 10^{15}m$
太［拉］	T	10^{12}	太字节，$TB = 10^{12}B$
吉［咖］	G	10^9	吉焦，$GJ = 10^9J$
兆	M	10^6	兆瓦，$MW = 10^6W$
千	k	10^3	千焦，$kJ = 10^3J$
百	h	10^2	百米，$hm = 10^2m$
十	da	10^1	十升，$daL = 10^1L$
分	d	10^{-1}	分升，$dL = 10^{-1}L$
厘	c	10^{-2}	厘米，$cm = 10^{-2}m$
毫	m	10^{-3}	毫克，$mg = 10^{-3}g$
微	μ	10^{-6}	微伏，$\mu V = 10^{-6}V$
纳	n	10^{-9}	纳米，$nm = 10^{-9}m$
皮	p	10^{-12}	皮米，$pm = 10^{-12}m$
飞	f	10^{-15}	飞米，$fm = 10^{-15}m$

1.4　数量与分数的度量

常用的数量度量为质量 m、摩尔数 n 与总体积 V。两个常用的分数为质量分

数和摩尔分数。

- 摩尔数 n 为一种物质的质量 m 与其分子量 MW 之比，计算式如下：

$$n = \frac{m}{MW} \tag{1.1}$$

- 质量分数为混合物或溶液中某种物质的质量与混合物或溶液中所有物质的总质量之比。一种物质 i 的质量分数 w_i 计算式如下：

$$w_i = \frac{m_i}{m_{total}} \tag{1.2}$$

- 摩尔分数 x 为一种混合物或溶液中的某种物质 i 的摩尔数与混合物或溶液中总摩尔数之比。一种物质 i 的摩尔分数 x_i 计算式如下：

$$x_i = \frac{n_i}{n_{total}} \tag{1.3}$$

例如，假设空气中氮气的摩尔分数为 79%，氧气的摩尔分数为 21%，那么，氮气与氧气的质量分数分别为 76.83% 和 23.17%。其中，氮气的分子量为 28.2g/gmol，而氧气的分子量则为 32g/gmol。

1.5　力

根据牛顿第二定律，力 F 被定义为质量 m 与加速度 a 之积，可以表示为

$$F = ma \tag{1.4}$$

力的国际单位制单位为牛顿，其定义为（1kg）（m/s^2）。1N 力作用于 1kg 的质量上可以实现的加速度为 $1m/s^2$。

在英制工程系统中，力的单位为磅力（1bf），它能够将 1lb 的质量加速至 $32.174ft/s^2$。为了实现单位的一致性，1lbf 可以表示为

$$F = \frac{1}{g_c}ma = \frac{1}{g_c}\text{lb } 32.174\ \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \tag{1.5}$$

式中　g_c——比例常数：

$$g_c = 32.174\ \frac{\text{lb ft}}{\text{1bf s}^2}$$

磅力和磅质量是不同的数量概念。如果一个方程同时包含磅力和磅质量，对于方程来说，有必要使用比例常数来得到正确的量纲。

重量为地球引力作用于一个物体上的力，可以用牛或磅力来表示。由于重力加速度为 $g = 9.8m/s^2$，采用国际单位制的重量可以估算为

$$F = mg \tag{1.6}$$

在英制工程系统中，重量可以表示为

$$F = m\frac{g}{g_c} \tag{1.7}$$

因为在不同的海拔重力不同，重量是海拔的函数。因此，质量相同的一个物体，其重量将随海拔的不同而不同。

1.6　温度

温度是一个表征常见的冷、热概念的物理性质。感觉更热的东西通常其温度也较高。热量从温度较高的物体流向温度较低的物体。如果两个物体之间没有发生净热流动，那么它们具有相同的温度。统计物理将物体描述为大量颗粒的一种集合，并将温度定义为物质中微粒每个自由度的平均能量的一种度量。对于固体来说，这种能量主要体现在它的原子振动上。在理想的单原子气体中，能量体现为导致微粒位置变化的平移运动；对于分子气体来说，振动和旋转运动也提供了热力学自由度。

温度可以使用温度计来测量，温度计可以标定为如图 1.2a 所示的多种温标。常用的温标如下：

- 在摄氏温标中，水的凝点为 0°C，沸点为 100°C（在标准大气压下）。国际单位制中使用摄氏温标，且以 A. Celcius 命名。
- 在华氏温标中，水的凝点为 32°F，沸点为 212°F（在标准大气压下）。英制工程单位中使用华氏温标，且以 D. G. Fahrenheit 命名。
- 热力学温标独立于物质物理性质，被称为开尔文温标或兰氏温标。采用这种温标的温度被称为绝对温度。
- 开尔文温标为国际单位制中使用的热力学温标。开尔文温标体系中的最低温度为 −273.15°C，如图 1.2b 所示。开尔文温标与摄氏温标的换算关系为 1K = 1°C。开尔文温标以 Lord Kelvin 命名。
- 兰氏温标为英制工程单位制中使用的热力学温标。兰氏温标体系中的最低温度为 −459.67°F。兰氏温标与华氏度温标具有相同的分度间隔：1°R = 1°F。兰氏温标以 W. Rankine 命名。

表 1.5 总结了各种温标的单位、定义及其相互换算关系。

表 1.5　温标单位、定义及其换算关系

单　位	符　号	定　义	换算关系	式
摄氏度	°C	°C = K − 273.15	°C = (°F − 32)/1.8	(1.8)
华氏度	°F	°F = °R − 459.67	°F = °C × 1.8 + 32	(1.9)
兰氏度	°R	°R = °F + 459.67	°R = K × 1.8	(1.10)
热力学温度	K	K = °C + 273.15	K = °R/1.8	(1.11)

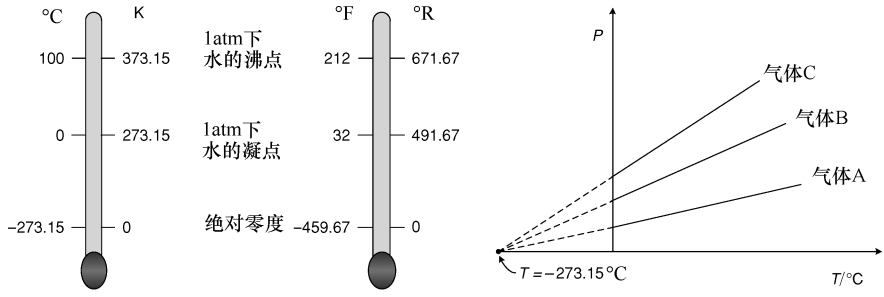


图 1.2　a）不同温标的比较；b）通过在一个定容气体温度计中使用三种不同的气体，显示压强随温度变化的所有直线，在对低压处的测量值进行外推之后将在温度轴的 −273.15°C处相交。这是不考虑气体的性质而能够得到的最低温度。因此，绝对气体温标（称为开尔文温标），可以通过将 0K 值分配给这个最低温度 −273.15°C而得到

例 1.1　温度单位换算

1）将 27°C换算为°F、K 以及°R。

2）采用 K 来表示 25°C的温度变化，采用°R 来表示 70°F的温度变化。

解：

1）$T(\mathrm{K}) = T(°\mathrm{C}) + 273.15°\mathrm{C} = 27°\mathrm{C} + 273.15°\mathrm{C} = 300.15\mathrm{K}$

$T(°\mathrm{F}) = 1.8T(°\mathrm{C}) + 32 = (1.8)(27)°\mathrm{F} + 32°\mathrm{F} = 80.6°\mathrm{F}$

$T(°\mathrm{R}) = T(°\mathrm{F}) + 460°\mathrm{F} = 80.6°\mathrm{F} + 460°\mathrm{F} = 540.6°\mathrm{R}$

2）采用 K 来表示 25°C的温度变化：ΔT（K）= ΔT（°C）= 25K，因为开尔文温标与摄氏温标是等同的。

采用°R 来表示 70°F的温度变化：ΔT（°R）= ΔT（°F）= 70°R，因为兰氏温标与华氏温标是等同的。

1.7　压强

压强 P 为作用于垂直于物体表面方向的每单位截面积上的力。压强的计算式如下：

$$P = \frac{F}{A} \tag{1.12}$$

式中，F 为力的垂直（正交）分量；A 为截面积。

国际单位制中压强的单位为帕斯卡（Pa，帕），其定义为 $1\mathrm{Pa} = 1\mathrm{N/m^2} = (1\mathrm{kg\ m/s^2})/\mathrm{m^2}$。两个常用的压强单位为：磅力/平方英寸，缩写为“psi”；大气压，缩写为“atm”。两者的关系为 1atm = 14.659psi。大气压是变量，而标准大

气压则是在一个标准重力场中的压强且等于 1atm、101.32kPa 或者是 14.69psi。压强可以通过压力计来测量。图 1.3a 所示为一个基本压力计。大气压可以通过如图 1.3b 所示的气压计来测量。图 1.3b 中汞的静态体积底部的压强为

$$P = \rho g z + P_o \tag{1.13}$$

式中，P 为汞液底部的压强；ρ 为汞液的密度；g 为重力加速度；z 为汞柱高度；P_o 为汞的静态体积柱顶部的压强。

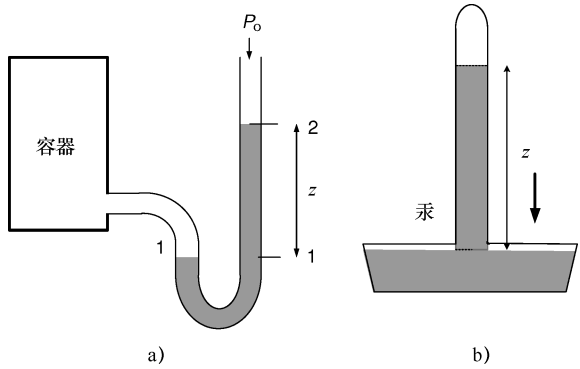


图 1.3　a）基本压力计：$P = \rho g z + P_o$；b）用于测量大气压的基本气压计。管道的长度或截面积对气压计中的流体高度无影响

• 通过测量装置，可以实现相对压强或者绝对压强的测量。表压强 psig 是指相对于本地大气压或环境压强的压强。表压强通过如图 1.3a 所示的开放式压力计来测量。如果将压力计的开放端封闭起来，那么就在该端创建了真空，从而可以测得绝对压强 psia。例如，标准大气压为绝对压强。绝对压强和相对压强之间的关系为

$$\text{绝对压强} = \text{表压强} + \text{大气压} \tag{1.14}$$

• 在日常使用中，压强往往被称为工程大气压，单位为 kgf/cm^2（作用于每平方厘米上的千克力），1kgf/cm^2 = 9.8 × 10^{4}Pa。表 1.6 为一些常用压强单位之间的换算因数。

表 1.6　压强换算因数[2]

	kPa	bar	atm	mmHg	psi
kPa	1	10^{-2}	9.869×10^{-3}	7.50	145.04×10^{-3}
bar	100	1	0.987	750.06	14.503
atm	101.32	1.013	1	760	14.696
mmHg	0.133	1.333×10^{-3}	1.316×10^{-3}	1	19.337×10^{-3}
psi	6.894×10^3	68.948×10^{-3}	68.046×10^{-3}	51.715	1

注：1Pa = 1N/m^2 = 10^{-5}bar = 10.197×10^{-6}at = 9.8692×10^{-6}atm = 7.5006×10^{-3}torr = 145.04×10^{-6}psi。

例 1.2　压强计算

考虑一个汞柱 Hg，它的面积为 1cm^2，高度为 20cm。汞柱顶部对大气开放。汞的密度在 20°C时为 13.55g/cm^3。请估算汞柱施加在密封板上的压强。

解：

数据：$A = 1\text{cm}^2$；$z = 20\text{cm}$；$g = 980\text{cm/s}^2$；$\rho = 13.55\text{g/cm}^3$（20 °C 时），$P_o = 101.32\text{kPa}$。

$$P = \rho gz + P_o = \left(\frac{13.55\text{g}}{\text{cm}^3}\right)\left(\frac{980\text{cm}}{\text{s}^2}\right)(20\text{cm})\left(\frac{\text{kg}}{1000\text{g}}\right)\left(\frac{\text{Ns}^2}{\text{kgm}}\right)\left(\frac{100\text{cm}}{1\text{m}}\right)\left(\frac{\text{m}^2\text{Pa}}{\text{N}}\right)$$

$$\left(\frac{\text{kPa}}{1000\text{Pa}}\right) + 101.32\text{kPa} = 26.56\text{kPa} + 101.32\text{kPa} = 127.88\text{kPa}$$

$$P = 127.88\text{kPa}$$

使用英制工程单位，可以得到汞的密度为

$$\rho = \left(\frac{13.55\text{g}}{\text{cm}^3}\right)\left(\frac{62.4\text{lb}_\text{m}}{\text{ft}^3}\right) = 845\text{lb}_\text{m}/\text{ft}^3$$

使用英制单位，压强变为

$$P = \rho gz + P_o = \left(\frac{845.5\text{lb}_\text{m}}{\text{ft}^3}\right)\left(\frac{32.2\text{ft}}{\text{s}^2}\right)(20\text{cm})\left(\frac{\text{in.}}{2.54\text{cm}}\right)\left(\frac{\text{ft.}}{12\text{in.}}\right)\left(\frac{\text{s}^2\text{lb}_\text{r}}{32.174\text{ftlb}_\text{m}}\right)$$

$$\left(\frac{\text{ft}^2}{144\text{in}^2}\right) + 14.69\text{psi} = 3.85\text{psi} + 14.69\text{psi} = 18.54\text{psi}$$

$$P = 18.54\text{psi}$$

在实践中，一个液柱的高度被称为液柱头（液柱压强）。因此，汞柱压强可以表示为 20cm Hg，而底部密封板上的压强则变为 20cm Hg + 76cm Hg（1atm）= 96cm Hg。

例 1.3　压强换算

将压强 10GPa 换算成①psia；②atm 和③bar。

解：

$$\frac{10\text{GPa}}{1}\left(\frac{10^9\text{Pa}}{\text{GPa}}\right)\left(\frac{14.69\text{psia}}{101.32\times10^3\text{Pa}}\right) = 1.45\times10^6\text{psia}$$

$$\frac{10\text{GPa}}{1}\left(\frac{10^9\text{Pa}}{\text{GPa}}\right)\left(\frac{\text{atm}}{101.32\times10^3\text{Pa}}\right) = 0.098\times10^6\text{atm}$$

$$\frac{10\text{GPa}}{1}\left(\frac{10^9\text{Pa}}{\text{GPa}}\right)\left(\frac{\text{bar}}{100.0\times10^3\text{Pa}}\right) = 0.1\times10^6\text{atm}$$

例 1.4　绝对压强估算

一个与处于真空条件下的腔室相连的压力表读数为 7.6psig。当地大气压为

14.3psi 时，请估算腔室内的绝对压强。

解：

绝对压强显示的是给定点的实际压强。低于大气压的压强称为真空压强，而压力表显示的是大气压与绝对压强之间的压差。

$P_{gauge} = P_{abs} - P_{atm}$（适用于压强高于大气压的情况）

$P_{gauge} = P_{vacuum} = P_{atm} - P_{abs}$（适用于压强低于大气压的情况）

$P_{abs} = P_{atm} - P_{gauge} = 14.3\text{psi} - 7.6\text{psig} = 6.7\text{psia}$

1.8　体积

体积是指占有或包含一种物质的三维空间的大小。物质可以是一种或多种固体、液体、气体或者是等离子态。体积的单位取决于长度的单位。如果长度的单位为米，那么体积的单位则为立方米（m^3）；如果长度的单位为英尺，那么体积的单位则为立方英尺（ft^3）。表 1.7 为体积的常用单位及其定义。表 1.8 为各种不同的体积单位之间的换算因数。与体积相关的衍生物理性质如下：

表 1.7　体积单位及其定义[1,4]

单位名称	符　号	定　义
桶（英制）	bl（Imp）	36gal（Imp）= 0.163m^3
桶	bl；bbl	42US gal = 0.158m^3
立方英尺	cu ft	0.028m^3
立方英寸	cu in	$16.387 \times 10^{-6} m^3$
立方米	m^3	$1m^3 = 1000l$
立方码	cu yd	27cu ft = 0.764m^3
加仑（美制）	US gal	$3.785 \times 10^{-3} m^3 = 3.785L$
美制液量盎司	US fl oz	$1/128\text{US gal} = 29.573 \times 10^{-6} m^3$
品脱	US dry pt	$1/8\text{US dry gal} = 550.610 \times 10^{-6} m^3$
夸脱	US qt	$1/4\text{US dry gal} = 1.101 \times 10^{-3} m^3$
升	L	$1000cm^3 = 10^{-3} m^3$

表 1.8　体积换算因数[2]

	in^3	ft^3	US gal	L	m^3
in^3	1	5.787×10^{-4}	4.329×10^{-3}	1.639×10^{-2}	1.639×10^{-5}
ft^3	1.728×10^3	1	7.481	28.32	2.832×10^{-2}
US gal	231	0.133	1	3.785	3.785×10^{-3}
L	61.03	3.531×10^{-2}	0.264	1	1.000×10^{-3}
m^3	6.102×10^4	35.31	264.2	1000	1

- 一个系统的总体积 V_t 除以它的质量可以计算出其比容 v，比容为密度的倒数，比如 m^3/kg 或 ft^3/lb：

$$比容(v)=\frac{1}{\rho}=\frac{V}{m} \tag{1.15}$$

- 总体积除以它的摩尔数 n 可以计算出摩尔体积：

$$V_m=\frac{V_t}{n} \tag{1.16}$$

- 密度 ρ 为质量与每单位体积之比，比如 lb/ft^3 或者 g/cm^3。它可以通过下式计算：

$$密度(\rho)=\frac{质量}{体积}=\frac{m}{V} \tag{1.17}$$

在常规条件下，液体与固体的密度不会随压强发生显著的变化。不过，液体与固体的密度会根据温度的变化而变化。气体的密度随压强与温度而变化。例如，乙醇的密度为 $0.790g/cm^3$，1lb 乙醇的体积为（$454g/lb$）（$cm^3/0.790g$）$=574.7cm^3$。

- 比重为某种物质的密度与参考物质的密度之比。

$$比重(\text{sp. gr.})=\frac{\rho}{\rho_{H_2O在4^\circ C}} \tag{1.18}$$

在比重中，参考物质通常是 4°C的水，其密度为 $1g/cm^3$ 或者 $62.43lb/ft^3$。气体的比重通常是指空气。因此，比重数据可以通过某种物质的温度与所测量的参考密度的温度来表示。例如，sp. gr. $=0.82$ 在 25°/4°表示该物质为 20°C而参考物质的温度为 4°C。由于水的密度在 4°C时为 $1g/cm^3$，比重和密度的数值在国际单位制中是相同的。

在石油工业中，经常以液体比重计标度来指代石油产品的比重，这种标度称为 API 比重（美国石油学会比重指数），它可以表示为标准温度为 60°F下的：

$$^\circ\text{API 比重}=\frac{141.5}{\text{sp. gr.}\ \frac{60^\circ F}{60^\circ F}}-131.5 \tag{1.19}$$

浓度通常是指每单位体积下的某种物质的数量。一些常用的浓度如下：

- 质量浓度为每单位体积的质量，如 lb 溶质/ft^3 或 g 溶质/L。
- 摩尔浓度为每单位体积的摩尔数，比如 lb mol/ft^3 或 gmol/L。
- 摩尔溶度 = 溶质 gmol 数/L 溶液。
- 重量摩尔溶度 = 溶质 gmol 数/kg 溶剂。
- 当量浓度 = 溶质当量/L 溶液。
- 百万分率 ppm 或者十亿分率 ppb 用来表示浓度极稀溶液或混合物：

$$\text{ppm}=\frac{1\ 份}{10^6\ 份} \tag{1.20}$$

它们是无量纲的，而且等价于固体和液体的质量分数以及气体的摩尔分数。例如，9ppm 左右的一氧化碳意味着每百万份空气中的 9 份（质量或摩尔单位）。

- 体积百万分率为 ppmv，体积十亿分率为 ppbv。

1.9　状态

状态是完全描述该系统条件的一组物理性质，这一点上的所有物理性质都能够被测量或计算。

- 基准状态主要是用以为该状态的方便的一个物理性质或一组物理性质分配一个零值。
- 化学成分物理性质的标准基准状态选为 25°C（77°F）和 1atm。标准基准状态的物理性质值通过一个上角（°）来表示。
- 在稳态下，系统内任何类型的累积均为零。流入和流出随时间保持恒定，系统的物理性质不随时间而变化。
- 一个状态变量的值（比如内能），取决于系统的状态，而不是取决于它以前的历史。
- 气态和汽态经常被用作同义词。一种物质的气态特指高于它的临界温度。而汽态则是指接近该物质冷凝温度的气态。

1.9.1　热力学平衡状态

处于热力学平衡状态的一个系统，在它独立于其外界时没有变化。例如，热平衡意味着整个系统的温度是相同的。如果一个系统任何一点的压强不随时间而变化，则该系统处于机械平衡。在化学平衡中，进、出方向的反应速率相同。

1.9.2　理想气体状态方程

状态方程与物质的压强、温度以及体积有关。在低压和高温状态下，一种气体的密度下降，该气体的体积与它的温度成正比：

$$PV = nRT \tag{1.21}$$

式中，P 为绝对压强；T 为绝对温度；n 为该物质的摩尔数；R 则称为通用气体常数，它对于所有的物质来说都是一样的：

$$R = 8.314\text{J/mol K} = 8.314\text{Pa m}^3\text{/mol K}$$

$$R = 1.986\text{Btu/lbmol °R} = 10.73\text{psia ft}^3\text{/lbmol °R}$$

式（1.21）称为理想气体状态方程，遵从这种关系的气体就被称为理想气体。理想气体关系仅在低密度情况下近似地表征了实际气体的 P-V-T 行为。对于一个

固定的气体质量来说，该理想气体的物理性质在两种不同状态下的相互关系为

$$\frac{P_1V_1}{T_1}=\frac{P_2V_2}{T_2} \tag{1.22}$$

1.9.3　饱和液态与饱和汽态

当一种纯物质的蒸汽压强等于大气压时，该物质将开始沸腾。一种纯物质的饱和温度或沸腾温度取决于它的压强。压强越高，其沸点也越高。图 1.4a 所示为一种纯物质的典型相图。在固相和液相之间，存在一条固-液平衡曲线；在液相和汽相之间，存在一条液-汽平衡曲线。液-汽平衡曲线上的温度和压强为饱和（沸腾）温度和压强。在临界点，饱和液态和饱和蒸汽态是相同的。在三相点上，一种纯物质的三种相平衡共存。在图 1.4b 中的等温线 $T=T_c$ 处，即临界点（P_c，T_c）处，有一个拐点（曲率变化）。等压线变平的区域表示为两相区，它被饱和液态线和饱和汽态线所包围。在超临界区有：$T>T_c$ 和 $P>P_c$。

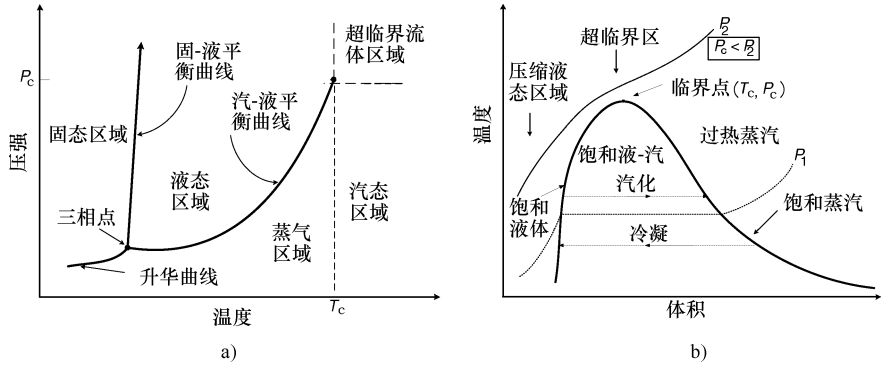


图 1.4　a）一种纯成分的压强-温度图；b）一种纯物质的温度-体积图。在临界点，饱和液体线和饱和蒸汽线合并。在饱和曲线之内，存在着一种汽相和液相的混合物。超临界区域表示物质在其温度和压强高于 P_c（临界压强）和 T_c（临界温度）时的状态

1.9.4　蒸汽表

蒸汽表以表的形式列出了饱和和过热蒸汽和液态水的物理性质，如附录 F 所示，饱和蒸汽的物理性质参见表 F1（使用英制单位）和表 F3（使用国际单位）。表 1.9 和表 1.10 给出了附录 F 中表 F1 和表 F3 的部分内容。饱和水蒸气和液体的物理性质完全由其温度或压强来定义。例如，在 140°F时，液态水的焓值为 107.95Btu/lb，而水蒸气的焓值则为 1122.0Btu/lb。其差异就在于 140°F 时的汽化热。

表 1.9　饱和水（英制工程单位）

T/°F	$P^{饱和}$/psia	V/(ft^3/lb_m)		U/(Btu/lb)		焓 H/(Btu/lb)		熵 S/(Btu/lb °R)	
		V_l	V_g	U_l	U_g	H_l	H_g	S_l	S_g
132	2.345	0.01626	149.66	99，95	1053.7	99.95	1118.6	0.1851	1.9068
134	2.472	0.01626	142.41	101.94	1054.3	101.95	1119.5	0.1884	1.9024
136	2.605	0.01627	135.57	103.94	1055.0	103.95	1120.3	0.1918	1.8980
138	2.744	0.01628	129.11	105.94	1055.6	105.95	1121.1	0.1951	1.8937
140	2.889	0.01629	123.00	107.94	1056.2	107.95	1122.0	0.1985	1.8895
142	3.041	0.01630	117.22	109.94	1056.8	109.95	1122.8	0.2018	1.8852
144	3.200	0.01631	111.76	111.94	1057.5	111.95	1123.6	0.2051	1.8810

表 1.10　饱和水（国际单位）

T/K	$P^{饱和}$/kPa	V/(cm^3/g)		U/(kJ/kg)		焓 H/(kJ/kg)		熵 S/(kJ/kg K)	
		V_l	V_g	U_l	U_g	H_l	H_g	V_l	V_g
372.15	97.76	1.043	1730.0	414.7	2505.3	414.8	2674.4	1.2956	7.3675
373.15	101.33	1.044	1673.0	419.0	2506.5	419.1	2676.0	1.3069	7.3554
375.15	108.78	1.045	1565.5	427.4	2508.8	427.5	2679.1	1.3294	7.3315
377.15	116.68	1.047	1466.2	435.8	2511.1	435.9	2682.2	1.3518	7.3078
379.15	125.04	1.049	1374.2	444.3	2513.4	444.4	2685.3	1.3742	7.2845
381.15	133.90	1.050	1288.9	452.7	2515.7	452.9	2688.3	1.3964	7.2615
383.15	143.27	1.052	1209.9	461.2	2518.0	461.3	2691.3	1.4185	7.2388

过热蒸汽表的物理性质分别在附录 F 中的表 F2（英制单位）和表 F4（国际单位）中列出。表 1.11 和表 1.12 给出了附录 F 中表 F2 和表 F4 的部分内容。过热蒸汽的物理性质完全由温度值和压强值来联合确定。

表 1.11　过热蒸汽（英制工程单位）

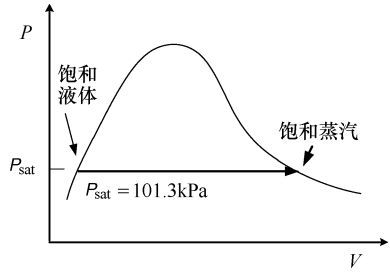
T/°F	V/(ft^3/lb)	U/(Btu/lb)	H/(Btu/lb)	S/(Btu/lb °R)	V/(ft^3/lb)	U/(Btu/lb)	H/(Btu/lb)	S/(Btu/lb °R)
	$P=250$psia，$T^{sat}=400.97$°F				$P=255$psia，$T^{sat}=402.72$°F			
饱和液体	0.019	375.3	376.1	0.5679	0.019	377.2	378.0	0.5701
饱和蒸汽	1.843	1115.8	1201.1	1.5264	1.808	1116.0	1201.3	1.5247
420	1.907	1125.8	1214.0	1.5413	1.865	1125.1	1213.1	1.5383
440	1.970	1135.9	1227.1	1.5559	1.928	1135.3	1226.3	1.5530
460	2.032	1145.6	1239.6	1.5697	1.989	1145.0	1238.9	1.5669
480	2.092	1154.9	1251.7	1.5827	2.048	1154.5	1251.1	1.5800
500	2.150	1164.0	1263.5	1.5951	2.105	1163.6	1262.9	1.5925

表 1.12　过热蒸汽（国际单位）

T/°C	V/ (cm^3/g)	U/ (kJ/kg)	H/ (kJ/kg)	S/ (kJ/kg K)	V/ (cm^3/g)	U/ (kJ/kg)	H/ (kJ/kg)	S/ (kJ/kg K)
	P = 1200kPa，T^{sat} = 187.96°C				P = 1250kPa，T^{sat} = 189.81°C			
饱和液体	1.139	797.1	798.4	2.2161	1.141	805.3	806.7	2.2338
饱和蒸汽	163.20	2586.9	2782.7	6.5194	156.93	2588.0	2784.1	6.5050
200	169.23	2611.3	2814.4	6.5872	161.88	2608.9	2811.2	6.5630
220	178.80	2650.0	2864.5	6.6909	171.17	2648.0	2861.9	6.6680
240	187.95	2686.7	2912.2	6.7858	180.02	2685.1	2910.1	6.7637
260	196.79	2722.1	2958.2	6.8738	188.56	2720.8	2956.5	6.8523
280	205.40	2756.5	3003.0	6.9562	196.88	2755.4	3001.5	6.9353
300	213.85	2790.3	3046.9	7.0342	205.02	2789.3	3045.6	7.0136

例 1.5　蒸发期间的能量变化

质量为 22kg 的饱和液态水在等压条件下（101.3kPa）被蒸发完全并产生饱和蒸汽。请估算蒸汽的温度以及加到水上的能量值。



解：

根据表 F3 可得：P_{sat} = 101.3kPa 和 T_{sat} = 100°C

$H_{sat\ liq}$ = 419.1kJ/kg 和 $H_{sat\ vap}$ = 2676.0kJ/kg

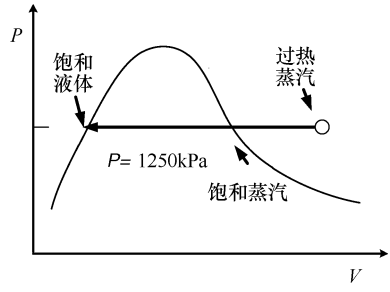
$\Delta H_{vap} = H_{sat\ vap} - H_{sat\ liq}$ = (2676.0 − 419.1) kJ/kg = 2256.9kJ/kg

加入的总热量 = (2256.9kJ/kg)（22kg）= 49651.8kJ

例 1.6　冷凝期间的能量变化

质量为 22kg、温度为 220°C的过热蒸汽在等压条件下（1250kPa），完全冷凝至饱和液态。请估算饱和蒸汽的温度以及从蒸汽中释放的热量。

解：



根据表 F4 和 F3 可得：

过热蒸汽：P = 1250kPa 和 T = 220°C，$H_{superheat\ vap}$ = 2861.9kJ/kg

饱和蒸汽和液体的 T_{sat} = 189.8°C（见表 F3）

饱和液态水在 1250kPa 以及 $H_{sat\ liq}$ = 806.7kJ/kg，T_{sat} = 189.8°C

$\Delta H_{\text{cond}} = H_{\text{sat liq}} - H_{\text{superheat vap}} = (806.7 - 2861.9)\text{kJ/kg} = -2055.2\text{kJ/kg}$

释放的总热量 $= -(2055.2\text{kJ/kg})(22\text{kg}) = -45214.4\text{kJ}$

释放的热量为负号，这是因为在如上图所示的冷凝过程之后，过热蒸汽的热量离开了系统。

1.9.5　饱和液-汽混合物

在饱和混合物中的蒸汽和液体的比例称为蒸汽干度 x（quality x），它为蒸汽的质量与混合物总质量之比：

$$\text{蒸汽干度}(x) = \frac{\text{蒸汽的质量}}{\text{混合物总质量}} \tag{1.23}$$

饱和液-汽混合物的比容、焓和内能平均值可以估算为

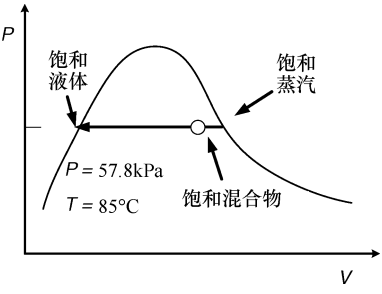
$$V = (1-x)V_{\text{liq sat}} + xV_{\text{vap sat}} \tag{1.24}$$

$$H = (1-x)H_{\text{liq sat}} + xH_{\text{vap sat}} \tag{1.25}$$

$$U = (1-x)U_{\text{liq sat}} + xU_{\text{vap sat}} \tag{1.26}$$

例 1.7　一个饱和液-汽混合物的蒸汽干度

一个刚性容器中含有 15kg 温度为 85 °C 饱和液体和水蒸气。只有 2kg 的水为液态。请估算饱和混合物的焓和容器的容积。



解：

根据表 F3 可得：

饱和液-汽混合物为 57.8kPa，而且 $T_{\text{sat}} =$ 85 °C

饱和蒸汽：$P = 57.8\text{kPa}$，$H_{\text{sat vap}} = 2652.0\text{kJ/kg}$，$V_{\text{vap}} = 2828.8\text{cm}^3/\text{g}$

饱和液态水：$P = 57.8\text{kPa}$，$H_{\text{sat liq}} = 355.9\text{kJ/kg}$，$V_{\text{liq}} = 1.003\text{cm}^3/\text{g}$

液态水总量 $= 2\text{kg}$

蒸汽总量 $= (15-2)\ \text{kg} = 13\text{kg}$

饱和混合物的蒸汽干度：$x = m_{\text{vap}}/m_{\text{total}} = 13\text{kg}/15\text{kg} = 0.87$

混合物的焓，式（1.25）：

$$H_{\text{mix}} = (1-x)H_{\text{sat liq}} + xH_{\text{sat vqp}} = (1-0.87)355.9\text{kJ/kg} + (0.87)2652.0\text{kJ/kg}$$
$$= 2353.5\text{kJ/kg}$$

混合物的体积，式（1.24）：

$$V_{\text{mix}} = (1-x)V_{\text{sat liq}} + xV_{\text{sat vap}} = (1-0.87)0.001003\text{m}^3/\text{kg} + (0.87)2.828\text{m}^3/\text{kg}$$
$$= 2.46\text{m}^3/\text{kg}$$

$$V_{\text{tank}} = 15\text{kg}(2.46\text{m}^3/\text{kg}) = 36.9\text{m}^3$$

饱和混合物的焓取决于混合物的蒸汽干度 x，并且有

$$H_{\text{sat vap}} > H_{\text{mix}} > H_{\text{sat liq}}$$

1.9.6　分压强与饱和压强

分压强为气态混合物中的一个单一成分以与混合物相同的体积和温度独立存在时所施加的压强。分压强取决于压强与温度。另一方面，饱和压强为液相和汽相在给定的温度取得平衡时的压强。饱和压强取决于温度。当一种纯物质的饱和压强达到大气压时，液体开始沸腾。例如，水在 100°C开始沸腾，此时它的饱和压强等于大气压 1atm。安托尼（Antoine）方程可以被用于估算饱和压强：

$$\ln P_{\text{sat}} = A - \frac{B}{T + C}(P \text{ in kPa and } T \text{ in °C}) \tag{1.27}$$

式中，A、B 和 C 为安托尼常数；P 的单位为 kPa，T 的单位为°C表 1.13 列出了一些物质的安托尼常数。

例 1.8　饱和蒸汽压强的估算

① 请估算水和丙酮在 50 °C时的饱和蒸汽压强；②请估算水和丙酮在 P = 101.32kPa 时的沸点温度。

解：

从表 1.13 中查得安托尼常数：

表 1.13　一些成分的安托尼常数[3]：压强单位为 kPa，温度单位为°C

种　类	A	B	C	范围/°C
丙酮	14.314	2756.22	228.06	−77 ~ −26
乙酸	15.071	3580.80	224.65	−142 ~ 24
苯	13.782	2726.81	217.57	−104 ~ 6
正丁醇	15.314	3212.43	182.73	−138 ~ 37
异丁醇	14.604	2740.95	166.67	−128 ~ 30
四氯化碳	14.057	2914.23	232.15	−101 ~ −14
三氯甲烷	13.732	2548.74	218.55	−84 ~ −23
乙醇	16.895	3795.17	230.92	−96 ~ 3
乙基苯	13.972	3259.93	212.30	−163 ~ 33
甲醇	16.578	3638.27	239.50	−83 ~ −11
醋酸甲酯	14.245	2662.78	219.69	−78 ~ −23
正丙醇	16.115	3483.67	205.81	−116 ~ 20
异丙醇	16.679	3640.20	219.61	−100 ~ 8
甲苯	13.932	3056.96	217.62	−136 ~ 13
水	16.387	3885.70	230.17	−200 ~ 0

水：$A=16.3872$；$B=3885.70$；$C=230.17$

丙酮：$A=14.3145$；$B=2756.22$；$C=228.06$

① $T=50°C$使用 $\ln P_{sat}=A-\dfrac{B}{T+C}$

$P_{w,sat}=12.33kPa$，$T=50°C$（此值非常接近于表 F3 中的列表值）

$P_{a,sat}=82.1kPa$，$T=50°C$

② 水在 101.32kPa 时的沸点记为 T_b

$$T_b=\frac{B}{A-\ln P}-C$$

在 101.32kPa 时，$T_{w,b}=100°C$并且 $T_{a,b}=56.4°C$

1.10　过程

过程是一个系统从一个平衡状态过渡到另一种状态所经历的任何变化。为了完全地描述一个过程，应该指明该过程的初始状态和最终状态、它的进行路径及其与外界的相互作用。过程有以下类型：

- 绝热过程发生在与外界无热交换的开口或闭口系统中。这是一个理想的概念，因为它意味着要实现一个完美的热流动隔离，从严格意义上来讲，这是不可能的。
- 在一个等温过程中，温度保持恒定；在一个等压过程中，压强保持恒定；在一个等容过程中，体积保持恒定。
- 在一个批量处理过程中，在该过程运行期间，既不加入材料，也不取出材料。在一个半批量（半间歇）处理过程中，在该过程运行期间，可以加入材料，但不能取出材料。
- 在一个稳流（均匀流）过程中，流体稳定地流过控制体积，在控制体积之内既没有狭义的物理性质，也没有广义的物理性质随时间而改变。在控制体积之内，流体物理性质能够实现从点到点的变化，但是在任何一点，它们在整个过程期间均保持恒定。图 1.5 所示为一个质量和能量与外界发生相互作用的稳流系统。
- 在一个非稳流或者说瞬变流过程中，物理性质在控制体积之内随时间而变化。
- 可逆过程能够在对外界未留下任何痕迹的情况下被逆转。可逆过程是理想过程，事实上，该过程可以被接近但从未达到。在可逆绝热压缩过程中，工作流体以可逆和绝热的方式缩小了体积。在可逆绝热膨胀过程中，工作流体以可逆和绝热的方式膨胀，从而扩大了体积。发生在等温条件下的可逆等温压缩，使得

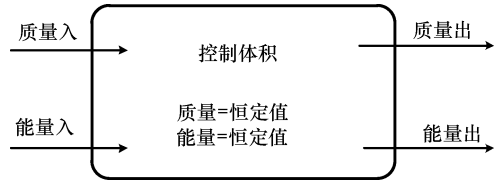


图 1.5　一个质量和能量与外界发生相互作用的稳流系统。在一个稳流系统中，质量和能量的流动不随时间改变

工作流体以可逆的方式缩小了体积。在可逆等温膨胀过程中，温度保持恒定，而工作流体则实现了可逆膨胀。

- 不可逆过程不能自发地将自身逆转并将系统恢复到它的初始状态。它们也被称为自然过程，因为在自然界中发生的所有过程都是不可逆的。例如，作为一个自然过程，热从一个温度较高的系统流入一个温度较低的系统；类似地，水从高水位流向低水位。不可逆可以被视作浪费的潜在功或失去做功的机会。引起不可逆的一些因子是摩擦、无约束的膨胀、两种气体的混合、通过有限温差的热传递、电阻、固体的非弹性变形以及化学反应等。摩擦是人们熟悉的一种不可逆形式，它与物体的运动有关，当两个物体被强制相互相对运动时，这两个物体接触的表面就会产生一种阻碍这种运动的力。
- 循环过程，或者过程系列，它允许一个系统经历各种不同的状态变化并最终返回到系统的初始状态。对于一个循环过程来说，初始状态和最终状态两者是相同的。理想循环由本质可逆过程组成。
- 等熵过程是一个本质的可逆和绝热过程。在这类过程中，熵保持恒定。
- 准静态（或者说准平衡）过程中的系统在任何时候都保持极小地接近于一个平衡状态。一个准静态过程可以被视为一种足够慢的过程，该过程允许系统进行内部自身调节以至于系统一个部分的物理性质变化不快于任何其他部分。

习　　题

1.1　在国际单位制中，温度单位是摄氏度和开（K），在英制工程系统中则是华氏度（°F）和兰氏度（°R）。在什么温度下，温度在摄氏度（°C）和华氏度（°F）温标下的数值相等？

1.2　在一个冷却过程中，系统的温度下降了 36°F。用摄氏度（°C）、开（K）与兰氏度（°R）温标来表示这种下降。

1.3　在一个加热过程中，系统的温度上升了 110°C。用华氏度（°F）、开（K）与兰氏度（°R）温标来表示这种上升。

1.4　一种蒸汽的温度为 420°C，用华氏度（°F）、开（K）与兰氏度（°R）来表示蒸汽温度。

1.5 完成下列单位换算：(a) atm 到 bar，(b) Btu 到 J，(c) hp 到 kW，(d) qr 到 kJ，(e) lbm 到 t，(f) qt 到 L。

1.6 完成下列单位换算：(a) 4km 到 mile，(b) $100ft^3$/天到 cm^3/h，(c) 10mile 到 ft，(d) 1000L 到 gal。

1.7 完成下列单位换算：(a) 40km 到 mile，(b) $10ft^3$/天到 cm^3/h，(c) 100mile 到 ft，(d) 10L 到 gal。

1.8 完成下列单位换算：(a) 1000mile 到 km，(b) $2000ft^3$/天到 gal/h，(c) 50000ft 到 mile，(d) 1000gal 到 m^3。

1.9 完成下列单位换算：(a) 550mile 到 km，(b) $500ft^3$/天到 gal/min，(c) 10000ft 到 mile，(d) 150gal 到 L。

1.10 完成下列单位换算：(a) 1200mile 到 m，(b) $1500ft^3$/天到 gal/s，(c) 2000ft 到 m，(d) 500gal 到 L。

1.11 完成下列单位换算：(a) 200mile 到 in，(b) $2500ft^3$/h 到 gal/s，(c) 600nm 到 in，(d) 300gal 到 in^3。

1.12 乙炔的热容量方程可以表示为

$$C_p = 9.89 + 0.827 \times 10^{-2} T - 0.378 \times 10^{-5} T^2$$

式中，温度单位为°F，C_p 单位为 Btu/lb mol°F。将 C_p 方程转换为使用单位 J/g mol°C。

1.13 表 B1 中参数需要使用单位为开的温度 (K)，从该表可得处于理想气体状态下的乙烯摩尔热容量为

$$\frac{C_p^{ig}}{R} = 1.424 + 14.394 \times 10^{-3} T - 4.392 \times 10^{-6} T^2$$

列出求解 C_p^{ig} 的方程 (单位采用 J/g mol°C)。

1.14 表 B1 中参数需要使用单位为开的温度 (K)，从该表可得处于理想气体状态下的丙烯摩尔热容量为

$$\frac{C_p^{ig}}{R} = 1.637 + 22.706 \times 10^{-3} T - 6.915 \times 10^{-6} T^2$$

列出求解的方程 C_p^{ig} (单位采用 cal/g mol°C)。

1.15 表 B1 中参数需要使用单位为开的温度 (K)，从该表可得处于理想气体状态下的甲烷摩尔热容量为

$$\frac{C_p^{ig}}{R} = 1.702 + 9.081 \times 10^{-3} T - 2.164 \times 10^{-6} T^2$$

列出求解的方程 C_p^{ig} (单位采用 cal/g mol°C)。

1.16 表 B2 中参数需要使用单位为开的温度 (K)，从该表可得乙醇摩尔热容量为

$$\frac{C_p}{R} = 33.866 - 172.60 \times 10^{-3} T + 349.17 \times 10^{-6} T^2$$

列出求解的方程 C_p (单位采用 J/g mol°C)。

1.17 表 B2 中参数需要使用单位为开的温度 (K)，从该表可得甲醇摩尔热容量为

$$\frac{C_p}{R} = 13.431 - 51.28 \times 10^{-3} T + 131.13 \times 10^{-6} T^2$$

列出求解的方程 C_p（单位采用 J/g mol°C）。

1.18　表 B3 中参数需要使用单位为开的温度（K），从该表可得 NaHCO 乙醇摩尔热容量为

$$\frac{C_p}{R} = 5.128 + 18.148 \times 10^{-3} T$$

列出求解的方程 C_p（单位采用 Btu/lb mol °R）。

1.19　空气热容量 C_p（单位为 J/g mol°C）的实验值，温度 T 在 0 ~ 900°C的间隔如下：

T/°C	0	25	100	200	300	400	500	600	700	800	900
C_p/（J/g mol°C）	29.062	29.075	29.142	29.292	29.514	29.782	30.083	30.401	30.711	31.020	31.317

按照下列公式使用最小二乘法来估算各系数的值：

$$C_p = A + BT + CT^2$$

1.20　乙醇的热容量可以表示为 $C_p = 61.34 + 0.1572T$，其中，温度单位为°C，C_p 单位为 J/g mol°C。修改表达式使得 C_p 单位为 Btu/lb mol °R。

1.21　使用：（a）大气压，（b）psia，（c）in Hg，（d）mmHg 来表示 30GPa。

1.22　与真空条件下的一个腔室相连接的压力表读数为 4.5psi。当地大气压为 14.6psi。请估算腔室内的绝对压强。

1.23　与真空条件下的一个腔室相连接的压力表读数为 75kPa。当地大气压为 101.2kPa。请估算腔室内的绝对压强。

1.24　一个压力表被连接至一个腔室读数为 24.8psi。当地大气压为 14.2psi。请估算腔室内的绝对压强。

1.25　请估算温度为 25°C、气压计读数为 755mmHg 的位置的大气压。

1.26　一个重量计使用直径 D 为 3mm 的活塞。如果活塞被压上 50kg 的重量，请确定重量计上的压强读数。

1.27　一个重量计上的压强读数为 30bar。重量计的活塞直径为 4mm。请确定得出这个压强读数所需的近似质量（单位：kg）。

1.28　一个重量计的压强读数为 3atm。重量计的活塞直径为 0.2in。请确定得出这个压强读数所需的近似质量（单位：lbm）。

1.29　一个开式水银压强计（一端对大气开放）的读数为 15.5cm。当地重力加速度为 9.832m/s^2。大气压为 101.75kPa。请确定被测量的绝对压强（kPa）。汞的密度在 25°C为 13.534g/cm^3。

1.30　一个开式水银压强计（一端对大气开放）在 70°F的读数为 10.25in。当地重力加速度为 32.243ft/s^2。大气压为 29.86Hg。请估算被测量的绝对压强（psia）。汞的密度在 70°F时为 13.543g/cm^3。

1.31　一个充满汞的压力计在 300K 时的读数为 65.7cm。当地重力加速度为 9.785m/s^2。对应于这种汞高的压强为多少个大气压？

1.32　一个充满二氧化碳的容器的压力表读数为 45psi。气压计读数为 28.5Hg。请估算容

器中的绝对压强（单位为 psia 和大气压）。

1.33　完成下表，如果 $P_{atm}=100kPa$ 和 $\rho_{Hg}=13.6g/cm^3$。

$P_{表压}$/kPa	$P_{绝对压力}$/kPa	$P_{绝对压力}$/mmHg	$P_{表压}$/m H_2O
5			
	150		
		30	
			30

1.34　请估算一个房间（4×5×5）m^3 内的空气在 20°C和 1atm 时的质量。

1.35　请估算容积为 $20m^3$ 的容器内的 68.2kg 二氧化碳气体在压强为 250kPa 时的温度。

1.36　请估算容积为 $1.6m^3$ 的容器内的 12kg 丙烷气体在压强为 400kPa 时的温度。

1.37　请估算容积为 $40m^3$ 的容器内的 6.8kg 氢气在压强为 300kPa 时的温度。

1.38　请估算容积为 $150ft^3$ 的容器内的 12.6lb 氮气在压强为 27psia 时的温度。

1.39　请估算 2.2kg 二氧化碳（CO_2）气体在 $T=350K$ 和 $V=0.5m^3$ 时的压强。

1.40　请估算 0.6kg 氢气在 $T=400K$ 和 $V=1.0m^3$ 时的压强。

1.41　一个容器已经充满 240lb 丙烷（C_3H_8）。容器的容积为 $150ft^3$，温度为 80°F。使用理想气体的状态方程估算丙烷的压强。

1.42　使用理想气体的状态方程，请估算氮气（N_2）在 20psia 和 180°F时的摩尔体积和比容。

1.43　使用理想气体的状态方程，请估算丙烷 C_3H_8 在 15psia 和 100°F时的摩尔体积和比容。

1.44　将 2.5lg mol/mL min 换算为 lb mol/ft^3 h。

1.45　目前的美国职业安全与健康标准运行（OSHA）对空气中一氧化碳（CO）规定的 8h 极限值为 9ppm。每千克空气中有多少克一氧化碳为 9ppm?

1.46　（a）请估算水和丙酮在 40°C时的饱和蒸汽压强，（b）请估算水和丙酮在 98kPa 时的沸点温度。

1.47　（a）请估算甲醇和乙醇在 40°C时的饱和压强，（b）请估算甲醇和乙醇在 101.33kPa 时的沸点温度。

1.48　（a）请估算甲醇和乙醇在 40°C时的饱和压强，（b）请估算甲醇和乙醇在 101.33kPa 时的沸点温度。

1.49　对一个容器中的 10lb 空气进行加热。空气开始时为 40psia 和 100°F。在加热之后，空气压强变为 60psia。请估算空气的最终温度。

1.50　一个 $2.0m^3$ 的容器内充满压力为 200kPa、温度为 500K 的氢气（H_2）。氢气被冷却至 300K。请估算氢气量以及在冷却之后容器中的最终压强。

1.51　请确定体积为 $500cm^3$、压强为 500kPa、温度为 100°C的乙醇蒸气的质量（单位：g）。

1.52　一个固定容积为 $15m^3$ 的气缸内含 CO_2，初始状态为温度 100°C、压强 101kPa。当温度升至 150°C时，求其最终压强。

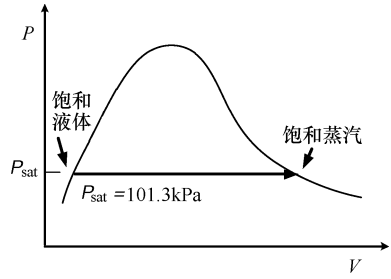
1.53　一个活塞-气缸系统处于等温条件下，温度为 15°C，体积为 $37cm^3$，压强为

120kPa。活塞运动产生了在系统内产生的压强为 260kPa。在活塞达到其最终位置后，体积变化为多少？

1.54　请确定压强为 10MPa 的 10kg 水在温度 400°C和 600°C时所占的体积。

1.55　请确定压强为 260psia 的 3.5kg 水蒸气在温度为 480°F和 1100°F时所占的体积。

1.56　质量为 10kg 的饱和液态水在等压条件下（压强为 101.3kPa）被完全蒸发并产生饱和蒸汽。请估算蒸汽的温度以及加到水上的能量值。



1.57　质量为 25lb 的饱和液态水在等压条件下（压强为 3.2psia）被完全蒸发并产生饱和蒸汽。请估算蒸汽的温度以及加到水上的能量值。

1.58　质量为 100lb 的饱和液态水在等压条件下（温度为 132°F）被完全蒸发并产生饱和蒸汽。请估算蒸汽的温度以及加到水上的能量值。

1.59　质量为 10kg、温度为 220°C的过热蒸汽在等压条件下（1250kPa），完全冷凝至饱和液态。请估算饱和蒸汽的温度以及从蒸汽中释放的热量。

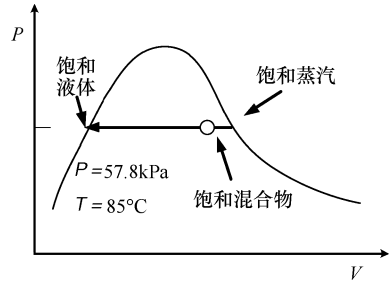
1.60　质量为 150kg、温度为 200°C的过热蒸汽在等压条件下（500kPa），完全冷凝至饱和液态。请估算饱和蒸汽的温度以及从蒸汽中释放的热量。

1.61　质量为 25kg、温度为 240°C的过热蒸汽在等压条件下（470kPa），完全冷凝至饱和液态。请估算饱和蒸汽的温度以及从蒸汽中释放的热量。

1.62　质量为 150lb、温度为 440°F的过热蒸汽在等压条件下（250psia），完全冷凝至饱和液态。请估算饱和蒸汽的温度以及从蒸汽中释放的热量。

1.63　质量为 50lb、温度为 500°F的过热蒸汽在等压条件下（255psia），完全冷凝至饱和液态。请估算饱和蒸汽的温度以及从蒸汽中释放的热量。

1.64　一个刚性容器中含有 30kg 温度为 85°C的饱和液体和水蒸气。只有 2kg 的水为液态。请估算饱和混合物的焓和容器的容积。



1.65 一个刚性容器中含有10kg温度为326.15K的饱和液体和水蒸气。只有1.5kg的水为液态。请估算饱和混合物的焓和容器的容积。

1.66 一个刚性容器中含有100lb温度为140°F的饱和液体和水蒸气。只有8.0lb的水为液态。请估算饱和混合物的焓和容器的容积。

参考文献

1. Çengel YA, Boles MA (2002) Thermodynamics. An engineering approach. McGraw-Hill, New York
2. Himmelblau DM, Riggs JB (2004) Basic principles and calculations in chemical engineering, 7th edn. Prentice Hall, Upper Saddle River
3. Poling BE, Prausnitz JM, O'Connell JP (2001) The properties of gases and liquids, 5th edn. McGraw-Hill, New York
4. Raznjevic K (1995) Handbook of thermodynamic tables, 2nd edn. Begell House, New York

第 2 章　能量与能源类型

2.1　能量

能量是指做功的能力。能量以大量不同的形式存在，比如运动、热、光、电、化学、核能以及重力等。总能量是一个系统所拥有的所有形式能量的总和。在没有磁、电和表面张力效应时，一个系统的总能量包含动能、势能与内能。一个系统的内能由显能、潜能、化学能以及核能组成。显内能是由于原子和分子的平移、旋转以及振动效应而形成的。热能是内能的显热和潜热形式。将能量分成不同的类型通常是按照自然科学中的研究领域边界来进行的。例如，化学能是一种储存于化学键之中的势能，而核能则是以原子核微粒之间相互作用而储存的能量。能量的微观形式与一个系统的分子结构有关，而且它们独立于外部参考框架。

氢能表示一种势能的储存，这种势能可以通过太阳中的氢元素聚变来释放。一些聚变能量随后被转换成太阳光，在它到达地球之后可以再次被储存为重力势能。例如，海洋蒸发的水，可以沉积在地球升高的部分，在一个水电站大坝释放之后，它能够驱动水轮机以电力的形式产生能量。像风、雨、雪以及飓风等大气现象，全部都是太阳能所带来的能量转换作用于地球大气结果。太阳光也可以作为光合作用中的化学势能被植物所捕获，此时，二氧化碳和水被转化为碳水化合物、脂肪和蛋白质。这种化学势能负责一个生物细胞的生长和进化。

英热单位（Btu，英制热力单位）是英制系统中的能量单位，表示将 1lbm 68°F的水提升 1°F所需要的能量。卡［路里］（cal）是非法定计量单位中的能量单位，表示将 1g 15°C的水提升 1°C所需要的能量。表 2.1 给出了一些重要的能量单位及其定义。

表 2.1　一些能量单位及其定义

单位名称	单位符号	定　义
英制热力单位	Btu	1055J = 5.4039psia ft^3
Btu/lb_m	Btu/lb_m	2.326kJ/kg
焦［耳］	J	$J = m \cdot N = 1kg \cdot m^2/s^2$
卡［路里］	cal	4.1868J

（续）

单位名称	单位符号	定　义
千焦	kJ	$kPa\ m^3 = 1000J$
千焦/千克	kJ/kg	$0.43Btu/lb_m$
尔格	erg	$g \cdot cm^2/s^2 = 10^{-7}J$
英尺磅力	ft lb_f	$g \times lb \times ft = 1.355J$
马力小时	hph	$hp \times h = 2.684 \times 10^6 J$
千瓦时	kWh	$kW \times h = 3.6 \times 10^6 J$
夸特	qr	$10^{15}\ Btu = 1.055 \times 10^{18} J$
大气升	atmL	$atm \times L = 101.325J$
千瓦	kW	3412Btu/h
马力	hp	2545Btu/h
克卡	therm	29.3kWh
电子伏特	eV	$\approx 1.602\ 17 \times 10^{-19} \pm 4.9 \times 10^{-26} J$

2.2　能源类型

一次能源和二次能源是两种主要的能源类型，如图2.1所示。一次能源直接从环境提取或获取，而二次能源则以电力或燃料的形式从一次能源转换而来。区分一次能源和二次能源，对于在能量平衡中计量和记录能量供应、转换以及损失来说非常重要。这类能源将在后面讨论。

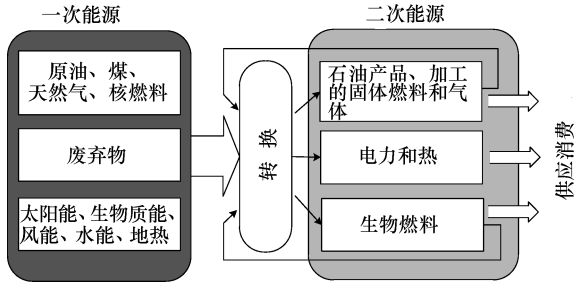


图2.1　一次能源和二次能源类型。区分一次能源和二次能源，对于在能量平衡中计量和记录能量供应、转换以及损失来说非常重要[33]

2.2.1　一次能源

一次能源是直接从环境中提取或获取的能源。一次能源可分为三种类型：

- 不可再生能源（化石燃料）：煤、原油、天然气、核燃料。
- 可再生能源：水能、生物质能、太阳能、风能、地热以及海洋能。
- 废弃物。

包括石油、煤与天然气在内的一次能源约占全世界一次能源消耗中化石燃料的 85%[13,37]。全世界能量使用预测数据显示，石油、煤与天然气到 2035 年仍将占据能源的主导地位（见图 2.2）。供求法则表明，随着化石燃料的减少，它们的价格将随之上升，同时，可再生能源的供应及利用（特别是生物质能、太阳能以及风资源等）将变得足够经济[13,37]。图 2.3 所示为美国的一次能源的流向。

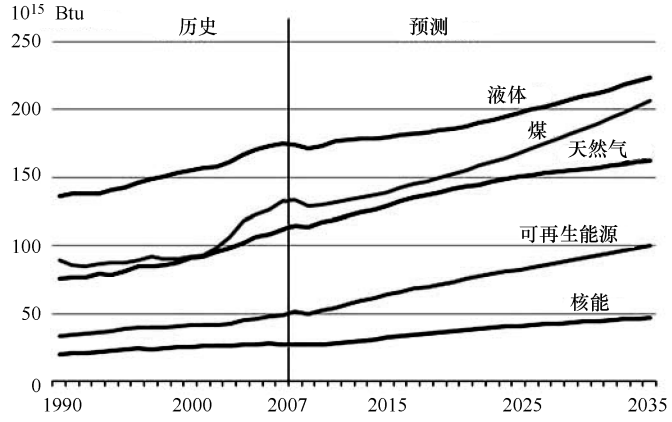


图 2.2　基于燃料类型的全世界能源使用历史数据和预测数据[13]

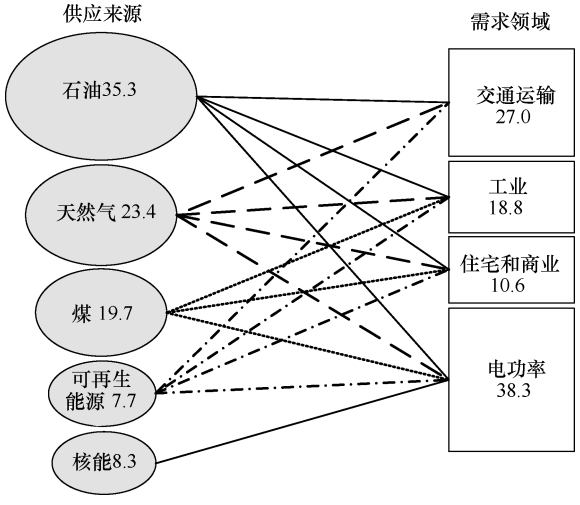


图 2.3　基于能源来源和使用领域的 2009 年美国一次能源流向（单位：10^{15} Btu）。由于各成分独立进行四舍五入，其和可能不等于总数[14]

含能量可以换算为吨油当量（TOE）：1TOE = 11630kWh = 41870MJ。

2.2.2 二次能源

一次能源以电能或燃料的形式被转换成二次能源，比如汽油、燃料油、甲醇、乙醇以及氢气等[3]。可再生能源（比如太阳能、风能、生物质能、地热能以及流动水等）的一次能源通常等同于从其中产生的电能或热能。最终能源通常是电能和燃料能，它被称为有用能。所选的四类最终能源为电能、热能、机械能以及化学能。这些类型的最终能源在能量生产和消耗领域之间设定了一个边界[7,14,33]。

2.3 不可再生能源

通常认为，不可再生能源或化石燃料是由死去的植物和动物残骸暴露于地球地壳的热和压强超过数百万年而形成的。主要的不可再生能源如下：

- 煤；
- 石油；
- 天然气；
- 核燃料。

化石燃料的碳含量百分比很高，主要包括煤、石油以及天然气。例如，天然气仅含很低沸点的气态成分，而汽油则包含沸点非常高的成分。某种特定类型的碳氢化合物混合物给出了这种燃料的独特的物理性质，比如沸点、熔点、密度以及黏度等。这些类型的燃料被称为不可再生能源。下面各小节将讨论一些重要的不可再生能源。

2.3.1 煤

煤是包含可燃性和不可燃性物质与水的沉积岩石。煤的成分复杂，而且其含能量取决于其来源和类型。表 2.2 为各种煤的典型物理性质。最劣质的褐煤碳含量低于 50%，而且其能量密度低于木材。无烟煤的碳含量超过 90%，而烟煤的碳含量则通常是 70%~75%。烟煤易于点燃，而且其燃烧火焰相对较长[35]。如果点燃不当，烟煤会产生过量的烟雾和烟尘。无烟煤硬度很高，表面光亮，而且非常稳定。无烟煤可以产生稳定而且清洁的火焰，为家用首选。而且，与其他类型的煤相比，它的燃烧时间较长，而且释放的热能也更多。对于那些燃油价格上涨的国家来说，煤可以成为一个相对便宜的能量来源。早在 19 世纪 80 年代，煤就已经被首次用于家庭和工厂用电的发电。此后，煤作为能量来源在工业革命中发挥了主要作用。

表 2.2　各种煤的典型物理性质

	无　烟　煤	烟　　煤	褐　　煤
固定碳，重量百分比（%）	80.5 ~ 85.7	44.9 ~ 78.2	31.4
水分，重量百分比（%）	2.8 ~ 16.3	2.2 ~ 15.9	39
体积密度，lb/ft^3	50 ~ 58	42 ~ 57	40 ~ 54
煤灰，重量百分比（%）	9.7 ~ 20.2	3.3 ~ 11.7	3.3 ~ 11.7
硫，重量百分比（%）	0.6 ~ 0.77	0.7 ~ 4.0	0.4

注：ETB[18]，Gaur 和 Reed[15]。

煤具有硫和氮之类的杂质，当它燃烧时，这些杂质能够与水蒸气结合在空气中生成液滴，以酸雨这种弱硫酸和硝酸的形式滴落地球。煤里也含有矿物质，它不燃烧，而且会形成煤灰留在煤燃烧室之中。CO_2 是能够帮助地球保存热量的几种气体之一，正如许多科学家相信的那样，它能够引起地球的温度上升并改变地球的气候。由于碳含量较高，比起其他任何化石燃料（如原油），对于每单位释放能量来说，煤会产生更多的 CO_2。煤的含硫量也是一个缺点。通常，烟煤中含硫量占 2% 左右。不过，先进的煤技术通过使煤更有效地燃烧，能够滤掉 99% 的极小微粒，去除超过 95% 的酸雨污染物，并减少 CO_2 排放。许多新建工厂被要求安装称为除尘器的烟气除硫设备[7,27]。

2.3.2　石油（原油）

石油是自然产生的可燃性液体，由多种不同分子量的碳氢化合物的复杂混合物组成，这种组成定义了石油的物理和化学性质，比如说热值、颜色以及黏度等。碳氢化合物的成分范围很广，在较轻的油中重量可高达 97%，而在更重的油中则可低至 50%。化学元素比例的变化略窄，见表 2.3。原油中的碳氢化合物通常是烷烃、环烷烃和大量不同的芳香烃，而其他有机化合物则包含氮、氧、硫以及极少量的金属。每种成分的相对百分比均不同，并决定了油的物理性质（见表 2.4）。

表 2.3　基于原油重量的典型元素组成[17]

元　　素	百分比范围（%）
碳	83 ~ 87
氢	10 ~ 14
氮	0.1 ~ 2
氧	0.1 ~ 1.5
硫	0.5 ~ 6
金属	< 0.1

表 2.4　基于石油中碳氢化合物重量的组成成分表

碳氢化合物	平均（%）	范围（%）
石蜡（烷烃）	30	15～60
石油环烷（环烷烃）	49	30～60
芳香烃	15	3～30
沥青质	6	剩余部分

• 烷烃（又称为石蜡）是带有只含碳和氢的直链或支链的饱和碳氢化合物，通用分子式为 C_nH_{2n+2}。它们的每个分子通常具有 5～40 个碳原子。例如，CH_4 表示甲烷，它是天然气的主要成分。丙烷（C_3H_8）和丁烷（C_4H_{10}）又被称为石油气体。在该范围的较重一端，石蜡是带有近似 25 个碳原子的烷烃，而沥青质则有 35 个以上。这些长链烷烃通常由先进的精炼厂裂解为较轻的、更有价值的产品。

• 环烷烃（又称为萘）是具有一个或多个碳环的饱和碳氢化合物，根据分子式 C_nH_{2n}，环上附有不同数目的氢原子。环烷烃具有与烷烃类似的性质，但是具有更高的沸点。

• 芳香烃是具有一个或多个六碳环的不饱和碳氢化合物。六碳环又称为苯环，根据分子式 C_nH_n，它具有双键、单键和氢原子。

目前，石油供应了总能量需求的 40% 多，而且超过 99% 的燃料是用于交通运输。已知的石油储量通常估算为大约 1.2 万亿桶（无油砂），或者是 3.74 万亿桶（含油砂）[3,26]。

2.3.3　石油馏分

石油被精炼后，可以分化生产出大量的商业产品：从汽油、煤油、沥青质一直到用于生产塑料和药品的化学制剂。图 2.4 所示为一个典型的炼油厂精炼过程的一部分，它将原油加工生产出大量不同的燃料。石油中 84% 的碳氢化合物被转化成富含能量的燃料，包括汽油、柴油、喷气燃料、供暖燃料以及其他燃料油和液化石油气体。剩余的石油被转换为药品、溶剂、化肥、农药以及塑料等[22]。因此，石油对许多工业来说是至关重要的，并因此成为许多国家关注的重点。

由石油精炼而得的一些常用的馏分如下：

• 液化石油气（LPG）是丙烷（C_3H_8）（体积约占 38%，冬季时更高）和丁烷（C_4H_{10}）（体积约占 60%，夏季时更高）混合而成的一种可燃气，用作供暖设备和车辆的燃料。由于氢碳比较高，每千克液化石油气的含能量高于汽油。液化石油气产生 1kWh 能量排放的 CO_2 量分别为石油和煤的 81% 和 70%。液化石油气的典型比热为 46.1MJ/kg，而汽油则为 43.5MJ/kg。不过，它的能量密度

为 26MJ/L，低于汽油的能量密度。纯正丁烷大约在 220kPa（2.2bar）时液化，而纯丙烷（C_3H_8）在 2200kPa（22bar）时液化。处于液态时，液化石油气的蒸气压强大约为 550kPa（5.5bar）。

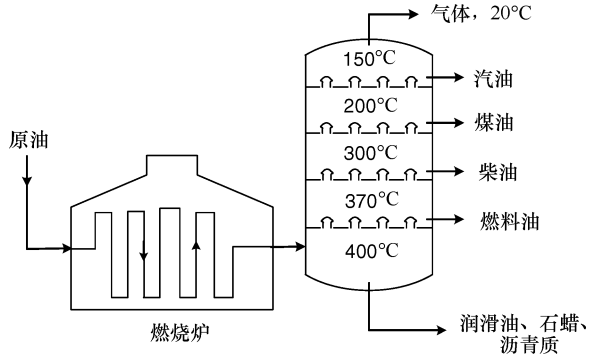


图 2.4　一个蒸馏塔，显示由石油中加工出来的重量不同的产品

- 汽油主要是用作内燃机燃料。典型的汽油由每个分子的碳原子数在 4～12 的碳氢化合物组成。它通常包括由石油分馏而得的脂肪族碳氢化合物组成，添加异辛烷或芳香烃甲苯和苯以提高其辛烷值。汽油的比密度范围为 0.71～0.77（6.175lb/US gal），密度越高，其芳香烃的含量越大。汽油的热值约为 132MJ/US gal（高热值），而它的混合物的热值在平均值上下浮动，幅度最高可达 4%。来自汽油的 CO_2 排放量约为 73.38g/MJ。

- 石化柴油的每个分子含有 8～21 个碳原子，沸点范围为 180～360°C（360～680°F）。石化柴油的密度约为 6.943lb/gal。该燃油质量中大约 86.1% 为碳，其净热值大约为 43.1MJ/kg。不过，由于密度较高，柴油的体积能量密度也比较高：128700Btu/gal，高于汽油的 115500Btu/gal，比其余一些燃油更是高出 11%（见表 2.7）。来自柴油的 CO_2 排放为 73.25g/MJ（接近于汽油）。由于质量管理需要进行额外的精炼以去除硫分，这将会导致其成本提升。

- 煤油是一种稀薄的清澈液体，由碳原子数在 6～16 的分子构成，密度为 0.78～0.81g/cm^3。煤油的闪点在 37～65°C（100～150°F），它的自燃温度为 220°C（428°F）。煤油的燃烧热与柴油类似：它的低热值约为 18500Btu/lb（43.1MJ/kg），高热值为 46.2MJ/kg（19861Btu/lb）。

- 喷气燃料是设计用于飞行器燃气轮机的一种航空燃料。常用的燃料是 Jet A与 Jet A-1，它们遵从一个标准化的国际规格。Jet B 用于增强其低温性能。喷气燃料是在 15°C（59°F）时密度为 0.775～0.840kg/L 的多种碳氢化合物的混合物。这个范围根据产品需求而严格限定（例如，凝点或发烟点）。煤油类型的喷气燃料（包括 Jet A 与 Jet A-1）的碳原子数在 8～16；宽馏或轻油类型的喷气

燃料（包括 Jet B）的碳原子数在 5 ~ 15。

• 燃料油由长链碳氢化合物（特别是烷烃、环烷烃以及芳香烃等）组成，重于汽油和轻油。根据燃料油的沸点、成分和目的，可以分为六类，编号为 1 ~ 6。它的沸点范围为 175 ~ 600 °C，碳链长度为 9 ~ 70 个原子。编号越大，黏度也越高，而且最重的燃料油必须加热方可流动。通常，燃料油编号越大，价格越低。1 号燃料油类似于煤油，2 号燃料油是供卡车和某些小汽车使用的柴油燃料，进而得名“车用柴油”。4 号燃料油通常为重馏油和残渣燃料油的混合物。5 号燃料油和 6 号燃料油称为残渣燃料油或重质燃料油。表 2.5 为各种燃料油的每加仑热值。

表 2.5　各种燃料油的典型热值

类　　型	单　　位	Btu
1 号燃料油	gal	137400
2 号燃料油	gal	139600
3 号燃料油	gal	141800
4 号燃料油	gal	145100
5 号燃料油	gal	148800
6 号燃料油	gal	152400

注：ETB[15] 已获得使用授权。

碳燃料含有硫和杂质。这样的燃料燃烧最终会导致排出的气体中含有氧化硫（SO）和二氧化硫（SO_2），从而促进酸雨的形成。排气污染中最终的一个元素是臭氧（O_3）。它不是被直接排放出来的，而是在空气中通过太阳光作用于其他污染物而生成的地面臭氧，如果它浓度太高将会对呼吸系统产生危害。不过，较高大气层中的臭氧层有利于阻止来自太阳的有害射线。臭氧可以被氮氧化物所破坏。对于氮氧化物、CO、SO_2 与 O_3，法律设定了应当遵守的无害的可接受水平。

2.3.4　天然气

天然气是一种自然产生的混合物，主要成分是 CH_4。表 2.6 为天然气的典型成分。天然气提供了全世界所有能源消耗的 23%。据国际能源机构（International Energy Agency，IEA）预测，到 2030 年，天然气需求的增长将超过 67%。天然气正变成一种日益普及的替代型交通运输燃料。理论上，典型的天然气火焰温度为 1960 °C（3562 °F），燃点为 593 °C。

天然气是使用燃气轮机和蒸汽轮机发电的主要能量来源。它的燃烧更为清洁，产生一个当量的热，要比燃油减少大约 30% 的 CO_2 排放，比燃煤减少大约 45%。这样，使用天然气的混合循环发电就成为可用的化石燃料中最为清洁的能

源，由此，在燃气成本合理的情况下，这种技术就获得了广泛的使用。根据天然气成分的不同，1m^3 天然气的总燃烧热约为 39MJ，其典型的热量卡值大约为 1000Btu/ft^3。

表 2.6　天然气典型成分的摩尔百分比和热值

成　　分	组成比例（%）	范围（%）
甲烷	95.2	87.0 ~ 96.0
乙烷	2.5	1.5 ~ 5.1
丙烷	0.2	0.1 ~ 1.5
丁烷，正丁烷	0.03	0.01 ~ 0.3
异戊烷，正戊烷，正己烷附加物	0.01	极微量 ~ 0.14
氮气	1.3	0.7 ~ 5.6
二氧化碳	0.7	0.1 ~ 1.0
氧气	0.02	0.01 ~ 0.1
氢气	极微量	极微量 ~ 0.02
比重	0.58	0.57 ~ 0.62
总热值（MJ/m^3），折干计算	37.8	36.0 ~ 40.2

液化天然气存在于 -161°C（-258°F）。气态化石燃料中的杂质和重碳氢化合物在冷却过程之前已经去除掉了。液化天然气的密度范围为 410 ~ 500kg/m^3。在大气压条件下，液化天然气的体积约为气态下的 1/600。

2.3.5　核能

核电站是通过核燃料（比如铀）的裂变来发电，因此它们不排放有害气体，不污染空气。核裂变是一种核反应，在这种反应中，一个原子的原子核被分解为更小的部分，通常是产生伽马射线形式的自由中子和光子，并释放出大量的能量。在一个核反应堆中，当核燃料被自由中子撞击时，会出现裂变并产生中子，从而导致一个自持链式反应，该反应会以一个可控的速率释放能量[5,7]。这种热用于产生蒸汽推动汽轮机实现发电。这与大多数燃煤、燃油和燃气发电厂相类似。

典型的裂变释放大约 200MeV 的能量，远远高于大多数化学氧化反应。例如，铀-235 同位素完全裂变的能量为 6.73×10^{10} kJ/kg[8]。在一个核反应堆中，核裂变的能量被释放为裂变产物及碎片的动能以及伽马射线形式的电磁辐射。在粒子和伽马射线与组成反应堆及其工作流体（通常是水，偶尔使用重水）的原子碰撞时，能量被转换成热能。不过，核裂变的产物比通常用作裂变燃料的重元素具有强得多的放射性，而且会保持相当长的时间，从而带来严重的核废料问

题。在全球 25 个国家共有 400 多座核电站正在运行，为世界提供了接近 17% 的电力。

核电站基本上是无碳的。不过，建造新核电站来发电成本相对昂贵，而且核能面临着巨大的障碍。最大的挑战是放射性废弃物的处置以及核扩散的威胁。新核电站获得执照也将需要很长时间，而且，在核能能够被用于影响气候变化问题之前，这可能需要至少十年的时间。

2.4　燃料的热值

一种燃料的热值是指它在“标准”（即 25°C和 1atm）条件之下等压燃烧所产生的热量值。燃烧过程产生水。各种不同的燃料热值为：

- 高热值（HHV）是指燃烧产物为凝结水，而且包含于水蒸气之中的汽化热也被考虑在内。因此，燃烧产生的所有水均为液态。
- 低热值（LHV）假设燃烧产物中的水分为汽态，而且汽化热未计算在内。
- 净热值与低热值相同，而且可以通过将总热值或高热值减去燃烧形成的水蒸气汽化潜热而求得。
- 总热值为等压条件下完全燃烧可以获得的总热量，包括燃烧产物中水蒸气冷凝所释放的热量。总热值考虑了燃料燃烧之前所含的液态水，这对于含水燃料（比如木材和煤）来说是有价值的。如果一种燃料在燃烧之前没有水分，那么，它的总热值就等于高热值。计算一种燃料的单位质量的 HHV 和 LHV 之间关系的常用方法为

$$\mathrm{HHV} = \mathrm{LHV} + \Delta H_{\mathrm{vap}}\left[\left(\mathrm{MW}_{\mathrm{H_2O}} n_{\mathrm{H_2O,out}}\right)/\left(\mathrm{MW}_{\mathrm{fuel}} n_{\mathrm{fuel,in}}\right)\right] \tag{2.1}$$

式中，ΔH_{vap}为每摩尔水的汽化热（kJ/kg 或 Btu/lb）；$n_{\mathrm{H_2O,out}}$为蒸发的水的摩尔数；$n_{\mathrm{fuel,in}}$为燃烧燃料的摩尔数；MW 为分子量。

表 2.7 与表 2.8 分别给出了一些常用燃料的物理性质和热值。化石燃料的热值会因来源和成分的不同而变化。

表 2.7　一些常用燃料和碳氢化合物在 1atm 和 20°C时的性质和热值；液体燃料为 25°C，气态燃料为 1atm 和标准沸腾温度

燃料(相)	分子式	MW/（kg/kmol）	ρ/（kg/L）	ΔH_v/（kJ/kg）	T_b/°F	C_p/（kJ/kg°C）	HHV①/（kJ/kg）	LHV①/（kJ/kg）
碳（s）	C	12.01	2.000	—		0.71	32800	32800
氢气（g）	H_2	2.01	—	—		14.40	141800	120000
甲烷（g）	CH_4	16.04	—	509	-258.7	2.20	55530	50050
甲醇（l）	CH_3OH	32.04	0.790	1168	149.0	2.53	22660	19920

（续）

燃料(相)	分子式	MW/（kg/kmol）	ρ/（kg/L）	ΔH_v/（kJ/kg）	T_b/°F	C_p/（kJ/kg°C）	HHV①/（kJ/kg）	LHV①/（kJ/kg）
乙烷（g）	C_2H_6	30.07	—	172	-127.5	1.75	51900	47520
乙醇（l）	C_2H_5OH	46.07	0.790	919	172.0	2.44	29670	26810
丙烷（g）	C_3H_8	44.09	0.500	420	-43.8	2.77	50330	46340
丁烷（l）	C_4H_{10}	58.12	0.579	362	31.1	2.42	49150	45370
异戊烷（l）	C_5H_{12}	72.15	0.626	—	82.2	2.32	48570	44910
苯（l）	C_6H_6	78.11	0.877	433	176.2	1.72	41800	40100
正己烷（l）	C_6H_{14}	86.18	0.660	366	155.7	2.27	48310	44740
甲苯（l）	C_7H_8	92.14	0.867	412	231.1	1.71	42400	40500
正庚烷（l）	C_7H_{16}	100.204	0.684	365	209.1	2.24	48100	44600
辛烷（l）	C_8H_{18}	114.23	0.703	363	258.3	2.23	47890	44430
癸烷（l）	$C_{10}H_{22}$	142.28	0.730	361		2.21	47640	44240
汽油（l）	$C_nH_{1.87n}$	100～110	0.72～0.78	350		2.40	47300	44000
轻柴油（l）	$C_nH_{1.8n}$	170.00	0.78～0.84	270		2.20	46100	43200
重柴油（l）	$C_nH_{1.7n}$	200.00	0.82～0.88	230		1.90	45500	42800
天然气（g）		～18.00	—	—		2.00	50000	45000

注：ETB[15]已获得使用授权。

① HHV，LHV：分别为高热值和低热值；(s)：固态；(l)：液态；(g)：气态。

表 2.8　一些常用燃料的高热值（总热值）

燃　料	高　热　值	
	kJ/kg	Btu/lb
无烟煤	32500～34000	14000～14500
烟煤	17000～23250	7300～10000
丁烷	49510	20900
木炭	29600	12800
煤（无烟煤）	30200	13000
煤（烟煤）	27900	12000
焦炭	28000～31000	12000～13500
柴油	44800	19300
醚	43000	
汽油	47300	20400
甘油	19000	

（续）

燃　料	高　热　值	
	kJ/kg	Btu/lb
氢气	141790	61000
褐煤	16300	7000
甲烷	55530	
油，蔬菜	39000～48000	
泥炭	13800～20500	5500～8800
石油	43000	
丙烷	50350	
半无烟煤	26700～32500	11500～14000
木材（干）	14400～17400	6200～7500
	kJ/m^3	Btu/ft^3
乙炔	56000	
丁烷 C_4H_{10}	133000	3200
氢气	13000	
天然气	43000	950～1150
甲烷 CH_4	39820	
丙烷 C_3H_8	101000	2550
丁烷 C_4H_{10}		3200
	kJ/l	Btu/gal
汽油	32000	115000
6 号重质燃料油	42600	153000
煤油	37600	135000
柴油	36300	130500
生物柴油	33500	120000
丁烷 C_4H_{10}	36200	130000
甲醇	15900	57000
乙醇	21100	76000

注：Gaur 和 Reed[18]；ETB[15]已获得使用授权。

$1kJ/kg = 1J/g = 0.43Btu/lb_m = 0.239kcal/kg$。

$1Btu/lb_m = 2.326kJ/kg = 0.55kcal/kg$。

$1kcal/kg = 4.187kJ/kg = 1.8Btu/lb_m$。

2.4.1 能量密度

能量密度为每单位体积的能量值。比能为每单位数量的能量值。例如，氢气

燃料与汽油的效率之比，氢气比汽油的比能高，但是它的能量密度非常低（即便是按液态来比较）。每单位体积能量的物理单位相同，都是“压强”。表 2.9 列出了一些燃料与燃料混合物的能量密度。

表 2.9　一些燃料的能量密度

燃料类型	总热值（HHV）			净热值（LHV）
	MJ/L	MJ/kg	Btu/gal	Btu/gal
普通汽油	34.8	44.4	125000	115400
高辛烷值汽油	33.5	46.8	120200	112000
液化石油气（60% Pr. +40% Bu.）	26.8	46.0		
乙醇	24.0	30.0	84600	75700
甲醇	17.9	19.9	64600	56600
丁醇	29.2	36.6		
乙醇汽油 E10（体积中含乙醇 10%）	33.2	43.5	120900	112400
乙醇汽油 E85（体积中含乙醇 85%）	25.6	33.1		
汽油	34.2	46.4		115500
柴油	38.6	45.4	138700	128700
生物柴油	33.5	42.2	126200	117100
喷气燃料（煤油基）	35.1	43.8	125935	
喷气燃料（轻油）	42.8	33.0	127500	118700
液化天然气（160°C）	22.2	53.6	90800	
液化石油气	26.8	46.0	91300	83500
氢（20K 时，液态）	10.1	142.0		130
氢气	0.0108	143.0		
甲烷（1atm，15°C）	0.0378	55.6		
天然气	0.0364	53.6		
液化石油气-丙烷	25.3	49.6		
液化石油气-丁烷	27.7	49.1		
原油	37.0	46.3		
煤，无烟煤	72.4	32.5		
煤，褐煤		14.0		
煤，烟煤	20.0	24.0		
木材		18.0		

注：Gaur 和 Reed[18]，ETB[15]。

例 2.1 一辆小汽车消耗的能源

一辆小汽车每月平均消耗 50gal 汽油。请估算小汽车每年消耗的能源。

解：

假设汽油平均密度为 0.72g/cm^3，热值为 47.3MJ/kg（见表 2.7）。

数据：$V = 50\text{gal/月} = 189.25\text{L/月}$，2271.0L/年（3.785L = 1gal）

$\rho_{gas} = 0.72\text{g/cm}^3 = 0.72\text{kg/L}$

汽油质量：$m_{gas} = \rho V = 1635.1\text{kg/年}$

每年消耗的能量：

$E_{gas} = 1635.1\text{kg/年}\ (47300\text{kJ/kg}) = 77340230\text{kJ/年} = 77340.2\text{MJ/年}$

例 2.2 一个低里程小汽车和一个高里程小汽车的燃料消耗

一辆小汽车的平均日常行驶距离大约是 40mile/天。一辆小汽车的城市里程油耗为 20mile/gal。如果该小汽车被一辆城市里程为 30mile/gal 的新小汽车所代替，汽油的平均成本为 3.50 美元/gal，请估算使用新小汽车每年节省的燃料量、能量以及成本。

假设：汽油是不可压缩的，$\rho_{av} = 0.75\text{kg/L}$。

低热值（LHV）= 44000kJ/kg；44000kJ 为 1kg 汽油完全燃烧而且产生的水为汽态时所释放的热量（见表 2.7）。

旧小汽车需要的燃料：(40mile/天)/(20mile/gal) = 2gal/天

新小汽车需要的燃料：(40mile/天)/(30mile/gal) = 1.34gal/天

旧小汽车：

汽油的质量：

$$m_{gas} = \rho_{av}(\text{体积}) = (0.75\text{kg/L})(2.0\text{gal/天})(3.785\text{L/gal}) = 5.7\text{kg/天}$$

汽油的能量：

$$E_{gas}(\text{LHV}) = (5.7\text{kg/天})(44000\text{kJ/kg}) = 250800\text{kJ/天}(365\text{ 天/年})$$
$$= 91542000\text{kJ/年} = 91542\text{MJ/年}$$

成本：(3.50 美元/gal)(2gal/天)(365 天/年) = 2555 美元/年

新小汽车：

汽油的质量：

$$m_{gas} = \rho_{av}(\text{体积}) = (0.75\text{kg/L})(1.34\text{gal/天})(3.785\text{L/gal}) = 3.8\text{kg/天}$$

汽油的能量：

$$E_{gas}(\text{LHV}) = (3.8\text{kg/天})(44000\text{kJ/kg}) = 167200\text{kJ/天}(365\text{ 天/年})$$
$$= 61028000\text{kJ/年} = 61028\text{MJ/年}$$

成本：(3.50 美元/gal)(1.34gal/天)(365 天/年) = 1712 美元/年

新小汽车减少的燃料消耗约为 33%，这是非常明显的。

例 2.3　一座城市的日常天然气消耗

一座城市的天然气消耗率为 $500 \times 10^6 ft^3$/天。体积流量的标准条件为 60°F和 1atm = 14.7psia。如果天然气的成本为 6 美元/GJ（高热值），那么这座城市日常的天然气成本是多少？

解：

$Q = 500 \times 10^6 ft^3$/天（60°F），1atm = 14.7psia。

高热值为天然气燃烧产物中的水分为液态时的燃烧热。从表 2.7 可查得 HHV 的值为：1030Btu/ft^3（见表 2.8）。

热值：1030Btu/ft^3（$500 \times 10^6 ft^3$/天）$= 515.0 \times 10^9$Btu/天

（515.0×10^9Btu/天）（1055J/Btu）= 543325GJ/天

日常成本：（543325GJ/天）（6 美元/GJ）$= 32.6 \times 10^5$ 美元/天

例 2.4　一辆小汽车的能源消耗

一辆小汽车每天的平均消耗大约为 2gal（US gal = 3.785L），油箱的容量大约为 15gal。因此，一辆小汽车需要每周加油一次。汽油的密度范围为 0.72 ~ 0.78kg/L（见表 2.7）。汽油的低热值大约是 44000kJ/kg。假设汽油的平均密度为 0.75kg/L。如果小汽车可以使用 0.2kg 的核燃料铀-235，请估算需要重新加油的年数。

解：

假设：汽油是不可压缩的，而且 $\rho_{av} = 0.75$kg/L。

低热值（LHV）= 44000kJ/kg；44000kJ 为 1kg 汽油完全燃烧而且产生的水为汽态时所释放的热量。

完全裂变的能量铀-235 $= 6.73 \times 10^{10}$kJ/kg

每天消耗的汽油质量：

$$m_{gas} = \rho_{av} V = (0.75\text{kg/L})(2\text{gal/天})(3.785\text{L/gal}) = 5.67\text{kg/天}$$

每天消耗的汽油能量：

$$E_{gas} = m_{gas}(\text{LHV}) = (5.67\text{kg/天})(44000\text{kJ/kg}) = 249480\text{kJ/天}$$

0.2kg 铀-235 完全裂变释放的能量：

$$E_{\text{U-235}} = (6.73 \times 10^{10}\text{kJ/kg})(0.2\text{kg}) = 1.346 \times 10^{10}\text{kJ}$$

加油的时间：（1.3461010kJ）/（249480kJ/天）= 53952 天 = 148 年

因此，小汽车大约 148 年不需要加油。

2.5 可再生能源

可再生能源来自自然资源，而且可以自然地补充。主要的可再生能源如下：

- 水电；
- 太阳能；
- 生物质；
- 风；
- 地热；
- 海洋。

各种形式的可再生能源都是直接来自太阳，或者是来自地球深处产生的热量。在2008年，全球最终能源消耗大约19%来自于可再生能源，其中13%来自传统的生物质（这主要用于加热），3.2%来自于水电。其他的可再生能源（比如，小型水力、生物质、风能、太阳能、地热以及生物燃料）的贡献大约为2.7%，而且在快速地增长。可再生能源在发电中的份额约为18%，其中全球电力的15%来自水电、3%来自于新的可再生能源。气候变化的备受关注、不断走高的石油价格以及政府的大力支持使得可再生能源使用和商业化不断提升[14]。因此，2004～2009年，世界范围的可再生能源容量的年度增长率达到了10%～60%，创造了相关产业和就业机会。可再生能源在四个主要的领域取代了传统的燃料：发电、热水/空间取暖、运输燃料以及农村（离网）能源服务[6,7]：

- 可再生能源发电提供了18%的全球总发电量。可再生能源发电设备遍布全球许多国家，其中风力发电在某些地区已经独自提供了显著的电力份额。
- 太阳能热水已经满足了全球多个国家7千多万家庭的部分热水需求。
- 可再生能源生物燃料已经对巴西、美国以及许多国家的石油消耗下降作出了贡献。2009年，在世界范围内产生的930亿L生物燃料取代了大约680亿L当量的汽油，大约等于世界汽油产量的5%左右。

包括纤维素乙醇、干热岩地热发电站和海洋能在内的新兴可再生能源技术依然处于发展演进过程之中。从长期来看，可再生能源通常会变得更加便宜，而化石燃料通常则会变得更加昂贵。当然，化石燃料技术更成熟一些，而可再生能源技术也在快速地改进以提高可再生能源的效率并降低成本。在农村和边远地区，来自化石燃料的能量传输和分配非常困难，成本也非常昂贵，因此在当地开发可再生能源将能够提供一种切实可行的替代方案。

国际可再生能源机构（IRENA）在全世界范围内促进采用可再生能源。截至2010年3月，IRENA拥有143个国家或地区成员。全球共有73个国家或地区制订了可再生能源政策目标，而且近年来促进可再生能源使用的公共政策已经变

得更为常见。已有 17 个国家颁布了在车用燃料中将混入生物燃料的法令。粮食作物原料的废弃残渣和原生草也为农民和投资者提供了大量的机会[30]。

2.5.1　水能

水能来自于运动水体的力或能量。大多数水电能来自驱动水轮机和发电机的库坝蓄水的势能。从水中提取的能量取决于水的体积与水源和出水口之间的高度差，这种高度差称为液柱头。水的势能与液柱头成正比。为了给水轮机供水同时维持液柱头产生的压强，可以使用一种称为压力管道的大型管道。1878 年，世界上首个使用水电供电的房间位于英国英格兰诺森伯兰郡。靠近美国尼亚加拉大瀑布的古老的 Schoelkopf 发电厂早在 1881 年就开始发电了。

水电的主要优点之一是消除了燃料的使用。由于无燃料燃烧，与化石燃料发电厂相比，它的空气污染很小；与核电站相比，它的热污染也非常有限。水电站也比燃料发电站具有较长的经济寿命，一些建造于 50 ~ 100 年前的水电站现在仍在服役。

因为水电站是自动化的，而且在标准常规的运行期间需要的现场人力也较少，因此它的运行劳动力成本通常也比较低。水电站的电力销售在满负荷运行 5 ~ 8年之后就可以收回建设成本。

水电通常是指大型水电站大坝。微型水电系统通常能产生高达 100kW 的电能。无坝水电系统则是从河流和海洋中提取动能。海洋能包括海流能、海洋热能转换以及潮汐能等。图 2.5 所示为美国的冰港坝（Harbor dam）。



图 2.5　冰港坝（Harbor dam）。水电站运行在其中可用的合适航道中。水可以成为一种成本低廉且相对清洁的能量来源。此外，由于无燃料燃烧，与化石燃料发电厂相比，水电站的空气污染很小；与核电站相比，水电站的热污染很有限。用水发电具有由河流和川溪筑坝而引起的环境影响，它会影响当地植物的生长地、鱼类以及动物的栖息地[14]

2.5.2　太阳能

太阳能的能量通过太阳能辐射的形式来自于太阳。太阳能发电依靠光伏和热机。其他太阳能应用包括通过太阳能建筑实现的空间供暖和冷却、照明、太阳能热水、太阳能烹饪以及工业用高温过程热等。根据太阳能获取、转换和分配方式的不同，太阳能技术通常被分为被动式太阳能或主动式太阳能：

- 主动式太阳能技术包括使用太阳能集热器来收集能量。一些主动式太阳能技术包括商业和工业建筑的太阳能过程热、空间供暖/冷却以及水加热等。一个典型的水加热系统包括与泵、热交换器以及一个或多个大热储存容器一起工作的太阳能集热器。最常用的集热器称为平板集热器。它安装在房顶上，包含一个又薄又平的方盒子，盒子上带有一个朝向太阳的透明罩（见图 2.6a）。小型管道穿过盒子，将热传递给待加热的流体（主要是水或空气）。管道附连着一个吸收器板，该板被涂成黑色以便吸收热量。由于热量集聚在集热器中，可以加热通过管道的流体。储存容器是用来储存加过热的液体。它可以仅仅是一个改进的热水器，不过它通常会更大，而且隔热性能很好。使用非水流体的系统，通常利用通过储存容器中充满热流体的环形管路来对水实现加热。
- 被动式太阳能系统依靠水的重力和流动趋势来实现水的自然循环加热。被动式太阳能技术使建筑朝向太阳，选择具有良好的热量或光扩散性质的材料，并将空间设计成能够自然循环的空气。图 2.6a 所示为太阳能热水系统，图 2.6b 所示为带有被动式太阳能设计的房间。



a)　　b)

图 2.6　a）对于太阳能热水系统来说，平板太阳能集热器通常被朝南安装在房顶上；b）美国锡安国家公园游客服务中心（Zion National Park Visitor Center）体现了被动式太阳能设计的特点，包括用于照明的天窗以及白天吸热、夜间放热的特朗伯集热墙（Trombe walls）㊀[32]

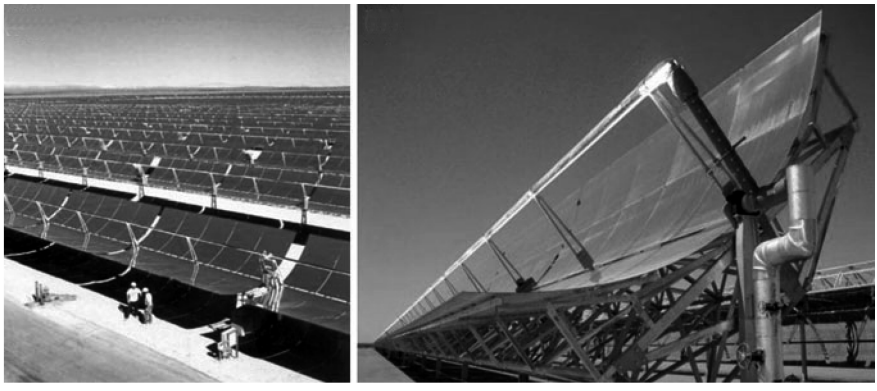
㊀　特朗伯集热墙是一种依靠被动式收集太阳能为建筑供暖的集热墙体。它是由法国太阳能实验室主任 Felix Trombe 教授及其合作者首先提出并实验成功，故以此得名。——译者注

2.5.2.1　非住宅太阳能集热器

用于非住宅建筑的两种主要类型的太阳能集热器是真空管集热器和线性聚光系统。它们能够以高温实现高效率运行。真空管集热器由多个双壁玻璃管和用于加热管内流体的反射器组成。双壁之间的真空用于隔离内部管道，并保存热量。线性聚光系统使用较长的 U 形直角反射镜，令其倾斜以将太阳光聚焦于沿着反射镜长度方向布置的管道。集聚的太阳光将管道内的流体加热。太阳能吸收系统使用热能来蒸发制冷剂以冷却空气。相对地，太阳能干燥系统使用热能来回收干燥空气的干燥剂，从而使空气冷却[4,14]。

2.5.2.2　太阳能发电系统

太阳能发电系统使用抛物线槽式集热器来收集太阳能，从而产生蒸汽驱驱动传统的蒸汽轮机[4]。抛物线反射镜自动地全天跟踪太阳。太阳光被对准装有合成油的中央管道，合成油被加热到 400°C左右，热量被用于将水转换成蒸汽去驱动蒸汽轮机并产生电能。最大的太阳能热电厂位于美国莫哈韦沙漠，它的功率输出为 354MW（见图 2.7）。



a)　　b)

图 2.7　a）此处所示的 150MW Kramer Junction 发电站是 354MW 太阳能发电系统（SEGS）设备系列的一部分，每台设备均使用抛物线槽式集热器来收集太阳能以产生蒸汽去驱动一个传统的蒸汽轮机。该电站已在加利福尼亚莫哈韦沙漠运行 20 多年[32]；b）最近投产的美国亚利桑那州图森市外的 1MW Saguaro 发电厂使用的抛物线槽式太阳能集热器，将太阳光集聚在沿抛物线槽焦线布置的接收管上。太阳能将接收管内的工作流体加热，它能够将二次流体蒸发以驱动涡轮机。这种集热器的下一代版本正被安装在美国内华达州的一个 64MW 新电厂中[25]

2.5.2.3　光伏

太阳能光伏（PV）使用半导体材料将光能转换成电力。光伏电池是一种太

阳能电池，它是一个将光能直接转换为电力的固态电力装置。电池组装起来被称为太阳能电池组件或太阳能面板。太阳能电池组件通常以单独组件的阵列方式部署在房顶、建筑物正面，或者是大规模地面阵列上（见图 2.8）。一个组件包含多个联合连接的太阳能电池。大多数晶体组件通常包含 60～72 个电池。光伏电池和组件使用各种不同的半导体；它们有三种类型：①晶体硅；②薄膜；③聚光器。光伏系统产生直流电，如果系统输出要用于电网并网，它必须通过一个逆变器转换成交流电。2005 年美国光伏组件年度发电大约为 150MW，而全球范围的光伏组件发电则为 1.7GW 左右[11]。



a)　　b)

图 2.8　a）光伏系统通常位于房顶，而且可以被并入电网。光伏组件能够与竞争电力的零售价格，抵消技术的高成本；b）房顶光伏组件（奥伯林学院的 Adam Joseph Lewis 环境研究中心建有覆盖 Williamson 测温装置的朝南曲线房顶）[25]

提高太阳能光伏效率和降低成本是主要目标之一。目前，晶体硅电池的效率约为 15%～20%。光伏系统的总体成本目前峰值为 6～9 美元/W。包括光伏组件在内的设备成本为 3～4 美元/W（直流），另外的 3～5 美元/W 则是来自逆变器、安装以及系统平衡。到 2015 年，来自太阳能光伏的住宅电力成本应该为 10～12美分/kWh，到 2030 年则会降至 6～8 美分/kWh。图 2.9 所示为 2009 年美国能量供应中的可再生能源消耗量。图 2.10 所示为美国在 2000～2009 年使用的光伏电能（kW）。

2.5.3　生物质与生物质能

生物质是来自植物的包括微生物和动物在内的有机材料。植物在光合作用中吸收太阳能，并将能量储存为生物质（见图 2.11）。因此，生物质是一种基于碳循环的可再生能源。一些生物质燃料的例子包括木材、农作物和藻类。在燃烧时，生物质中的化学能以热的形式被释放出来。生物质可以被转换成其他生物燃料，比如乙醇与生物柴油等。可用作生物燃料的生物质包括玉米、大豆、柳枝稷

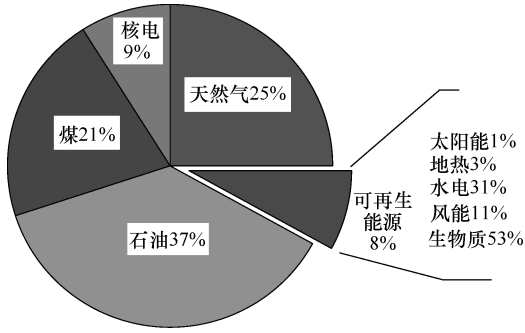


图 2.9　2009 年美国能量供应中的可再生能源消耗量。(qr = 10^{15} Btu)；总量：97892qr Btu，总可再生能源：8049qr Btu[14]

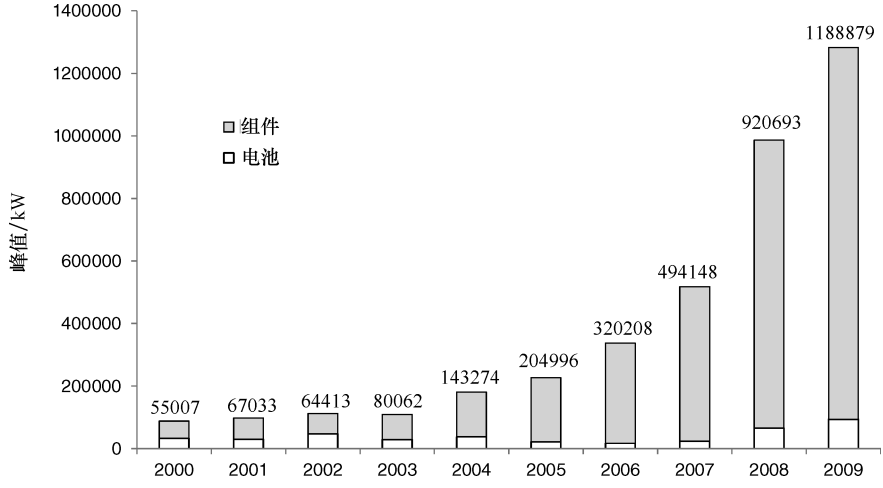


图 2.10　美国光伏工业在 2000 ~ 2009 年的增长图。电池组装起来被称为太阳能电池组件或太阳能面板。光伏电池和组件使用各种不同的半导体，它们具有三种类型：①晶体硅；②薄膜；③聚光器[14]

(willow switch grass)、油菜、甜菜、棕榈油以及高粱等[30]。纤维素生物质（比如玉米秸秆、稻草、木材、稻壳等）也能够被用于生物燃料发电（见图 2.11）。生物质的有氧分解会产生沼气，而气化则会产生合成气，它为氢气和二氧化碳的混合物，可被转换成液体燃料。纤维素乙醇能够通过一个热化学过程产生，它使用温度、压强、水、氧气或空气以及催化剂的各种不同组合，将生物质转换为纤维素乙醇。表 2.10 为一些生物质的低热值、水分以及灰分含量。

如图 2.12 所示，在 2006 ~ 2010 年，风力发电与生物质的使用量出现了增长，而水电的份额则出现了下降；太阳能和地热源的使用则保持不变[14]。



a) b) c)

图 2.11 a）光合作用，在光合作用中植物将太阳能转换成葡萄糖形式的化学能：水 + 二氧化碳 + 太阳光→葡萄糖 + 氧气，以及 $H_2O + CO_2 +$ 太阳光→$C_6H_{12}O_6 + 6O_2$；b）生物质增长；c）发电能力为 21MW 的 Tracy 生物质发电厂使用农业和工业生产废弃的木材残屑为美国旧金山湾地区提供基本的负载容量[32]

表 2.10 部分生物质的低热值（LHV）

品 名	水分（%）	灰分含量①（%）	低热值/(MJ/kg)
甘蔗渣	18	4	17 ~ 18
椰子壳	5 ~ 10	6	16，7
咖啡壳	13	8 ~ 10	16，7
玉米秸秆	5 ~ 6	8	17 ~ 19
玉米芯	15	1 ~ 2	19，3
棉壳	5 ~ 10	3	16，7
油棕纤维	55	10	7 ~ 8
油棕壳	55	5	7 ~ 8
杨木	5 ~ 15	1.2	17 ~ 19
稻壳	9 ~ 11	15 ~ 20	13 ~ 15
稻草和稻壳	15 ~ 30	15 ~ 20	17 ~ 18
柳枝	8 ~ 15	6	18 ~ 20
小麦秸秆和麦壳	7 ~ 15	8 ~ 9	17 ~ 19
柳木	12	1 ~ 5	17 ~ 19

① 近似值[15]。

2.5.3.1 碳循环

在碳循环中，碳以各种形式在地球生物圈的各种要素之间、在大气、水圈（海洋）、岩石圈（岩石、土壤和矿物质沉积物，包括化石燃料）与生物材料（包括植物和动物）之间传输。碳循环维持一种动态平衡的状态。其他形式（最著名的是化石燃料）则能够无限期地潜在地储存碳，不过如果它们被燃烧之后，碳就被释放出来，导致碳循环的净增加，并增加了总自由碳量。如果使用生物质

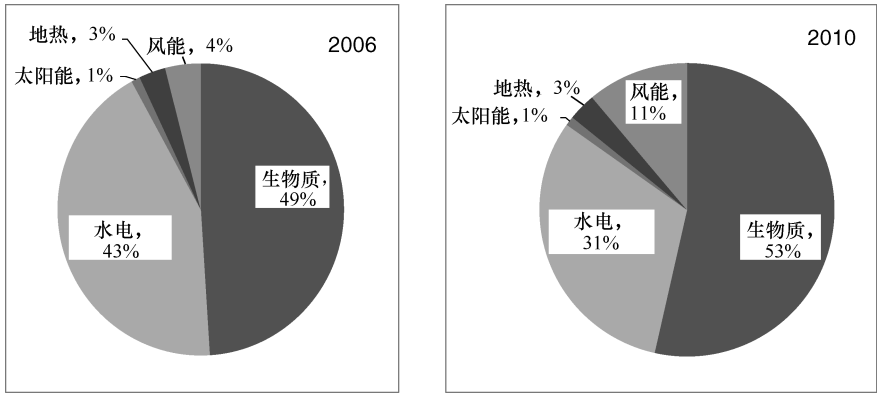


图 2.12　可再生能源在美国的使用情况；风力发电与生物质的使用量出现了增长，而水电的份额则出现了下降；太阳能和地热源的使用则保持不变[14]

而无替代品，例如在没有森林的情况下，这也会导致碳循环的净增加。由于植物生长会吸收收获的生物质释放出来的碳，持续使用生物质将不会产生直接的净贡献[19,20]。

2.5.3.2　生物质燃料的总热值

生物质燃料通常以工业分析和元素分析为特征。

- 工业分析给出了基于样品完全燃烧为二氧化碳和液态水时的水分含量、挥发物含量（当加热至 950 °C时）、该点的自由碳保持量、样品的灰分（矿物质）以及高热值。
- 元素分析（又称为最后分析）是进行元素性分析，并以碳、氢、氧、硫和氮的重量百分比的形式给出生物质的成分。

表 2.11 为部分燃料的总热值测量值和估算值以及工业分析和元素分析数据，包括生物质成分、自然生物质（木材、农产品）、加工生物质以及其他固体和液体燃料等。

表 2.11　生物质燃料的工业分析和元素分析的重量百分比

品　名	固定碳	挥发物（%）	灰分（%）	C（%）	H（%）	O（%）	N（%）	S（%）	HHV_m/（kJ/g）	HHV_{est}/（kJ/g）
道格拉斯冷杉	17.70	81.50	0.80	52.30	6.30	40.50	0.10	0.00	21.05	21.48
山核桃	—	—	0.73	47.67	6.49	43.11	0.00	0.00	20.17	19.82
枫	—	—	1.35	50.64	6.02	41.74	0.25	0.00	19.96	20.42
西黄松	17.17	82.54	0.29	49.25	5.99	44.36	0.06	0.03	20.02	19.66
杨	—	—	0.65	51.64	6.26	41.45	0.00	0.00	20.75	21.10

（续）

品　名	固定碳	挥发物（%）	灰分（%）	C（%）	H（%）	O（%）	N（%）	S（%）	HHV_m/（kJ/g）	HHV_{est}/（kJ/g）
红木	16.10	83.50	0.40	53.50	5.90	40.30	0.10	0.00	21.03	21.45
西部铁杉	15.20	84.80	2.20	50.40	5.80	41.10	0.10	0.10	20.05	20.14
黄松	—	—	1.31	52.60	7.00	40.10	0.00	0.00	22.30	22.44
白冷杉	16.58	83.17	0.25	49.00	5.98	44.75	0.05	0.01	19.95	19.52
白橡木	17.20	81.28	1.52	49.48	5.38	43.13	0.35	0.01	19.42	19.12
道格拉斯冷杉树皮	25.80	73.00	1.20	56.20	5.90	36.70	0.00	0.00	22.10	22.75
火炬松树皮	33.90	54.70	0.40	56.30	5.60	37.70	0.00	0.00	21.78	22.35
桃仁	19.85	79.12	1.03	53.00	5.90	39.14	0.32	0.05	20.82	21.39
核桃壳	21.16	78.28	0.56	49.98	5.71	43.35	0.21	0.01	20.18	19.68
杏树枝	21.54	76.83	1.63	51.30	5.29	40.90	0.66	0.01	20.01	19.87
黑胡桃枝	18.56	80.69	0.78	49.80	5.82	43.25	0.22	0.01	19.83	19.75
玉米芯	18.54	80.10	1.36	46.58	5.87	45.46	0.47	0.01	18.77	18.44
小麦秸秆	19.80	71.30	8.90	43.20	5.00	39.40	0.61	0.11	17.51	16.71
棉花秸秆	22.43	70.89	6.68	43.64	5.81	43.87	0.00	0.00	18.26	17.40
玉米秸秆	19.25	75.17	5.58	43.65	5.56	43.31	0.61	0.01	17.65	17.19
甘蔗渣	14.95	73.78	11.27	44.80	5.35	39.55	0.38	0.01	17.33	17.61
稻壳	15.80	63.60	20.60	38.30	4.36	35.45	0.83	0.06	14.89	14.40
松针	26.12	72.38	1.50	48.21	6.57	43.72			20.12	20.02
轧棉机垃圾	15.10	67.30	17.60	39.59	5.26	36.38	2.09	0.00	16.42	15.85
纤维素	—	—	162	44.44	6.17	49.38	—	—	—	17.68
木质素（软木）	—	—	—	63.8	6.30	29.90	—	—	—	26.60
木质素（硬木）	—	—	—	59.8	6.40	33.70	—	—	—	24.93

注：Gaur 和 Reed[18]。

高热值（HHV）与元素组成之间的关系可以表示为

$$HHV(kJ/g) = 0.3491C + 1.1783H - 0.1034O - 0.0211A + 0.1005S - 0.0151N \quad (2.2)$$

式中，C、H、O、A、S 和 N 分别为元素分析的碳、氢、氧、灰分、硫、和氮的重量分数。

该方程表征的实验数据平均误差为 1.45%，能够用于热值估算与生物质过程建模[18]。

根据燃料化学官能团的不同，其热值也会发生变化。当一种燃料的含氧百分

比较高时，可用于燃烧的碳和氢的百分比就随之降低，这就会导致低热值的出现。使用固定碳的值（FC，wt%），就能够通过下式来估算生物质样品的高热值：

$$HHV(MJ/kg) = 0.196(FC) + 14.119 \tag{2.3}$$

根据式（2.3）计算得到的热值表明估算值和测量值之间的平均差异为 2.2%[10]。另外，生物质的 HHV 和工业分析得到的干灰含量（重量百分比）之间的关系可以表示为

$$HHV(MJ/kg) = 19.914 - 0.2324\ 灰分 \tag{2.4}$$

根据主要元素 C、H 和 O 的成分（重量百分比），热值可以估算为

$$HHV(MJ/kg) = 0.3137C + 0.7009H + 0.0318O - 1.3675 \tag{2.5}$$

其中，超过 90% 的预测值的误差范围为 ±5%[34]。

例 2.5　总热值估算

使用表 2.11 中的数据，请估算红木这种生物质的总热值（kJ/kg）：①元素分析；②固定碳；③干灰含量；④以及（d）碳（C）、氢（H）和氧（O）的成分。

品　名	固定碳	挥发物（%）	灰分（%）	C（%）	H（%）	O（%）	N（%）	S（%）	HHV_m/（kJ/g）	HHV_{est}/（kJ/g）
红木	16.10	83.50	0.40	53.50	5.90	40.30	0.10	0.00	21.03	21.45

解：

① 根据元素分析

$$HHV(MJ/kg) = 0.3491(53.50) + 1.1783(5.90) - 0.1034(40.3) - 0.0211(0.0040) + 0.1005(0.0) - 0.0151(0.0010) = 21.44MJ/kg = 21440kJ/kg$$

② 根据固定碳百分比

$$HHV(MJ/kg) = 0.196(FC) + 14.119$$

$$HHV(MJ/kg) = 0.196(16.10) + 14.119 = 17.3MJ/kg = 17300kJ/kg$$

③ 根据干灰含量

$$HHV(MJ/kg) = 19.914 - 0.2324\ 灰$$

$$HHV(MJ/kg) = 19.914 - 0.2324(0.0040) = 19.914MJ/kg = 19914kJ/kg$$

④ 根据主要元素 C、H 和 O（重量百分比）

$$HHV(MJ/kg) = 0.3137C + 0.7009H + 0.0318O - 1.3675$$

$$HHV(MJ/kg) = 0.3137(53.50) + 0.7009(5.9) + 0.0318(40.3) - 1.3675$$

$$= 20.83MJ/kg$$

$$= 20830kJ/kg$$

④中使用的根据式（2.5）进行的估算值最接近测量值 21.03MJ/kg（21030kJ/kg）。

2.5.3.3　生物能源

通过光合作用产生的生物燃料可以被划分为三大类：

- 碳水化合物：表示一种单糖、双糖与多糖的混合物（4kcal/g 或 17kJ/g）。
- 脂肪：不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸（甘油三酯或甘油三酸酯）（9kcal/g 或 39kJ/g）。
- 蛋白质：部分用作燃料源（4kcal/g 或 17kJ/g）。

碳水化合物是带有能够以直链或环存在的多种羟基群的直链醛或酮。淀粉等碳水化合物是最丰富的生物分子，而且具有多种功能，比如储存和运输能量以及作为结构成分（如植物中的纤维素等）。甘油三酸酯和无脂肪酸都含有长的线性脂肪族碳氢化合物链，它属于部分不饱和而且碳分子数也有一定范围。燃料值等于燃料的燃烧（氧化）热。碳水化合物和脂肪能够被完全氧化，而蛋白质只能够部分氧化，因此，它的燃料值较低[28]。

合成生物燃料如下：

- 生物乙醇——在美国，玉米乙醇作为一种汽油替代品或添加剂，是目前最大的生物燃料来源。现在美国销售的汽油混有 10% 的乙醇，这种混合物被称为 E10（或乙醇汽油）。只有被称为灵活燃料汽车的特定类型车辆才能够使用乙醇含量大于 10% 的混合物。E85 是一种替代燃料，它的乙醇含量高达 85%（见图 2.13[16]）。



图 2.13　生物燃料能够取代进口石油用于交通运输。新墨西哥州圣达菲 Baca Street 生物燃料站的这种三选式生物燃料加注机，为消费者提供了三种可再生运输燃料的选择[32]

- 生物柴油——生物柴油最常以 2%（B2）、5%（B5）或者 20%（B20）的

比例与石化柴油混合。它也可以被用作纯生物柴油（B100）。生物柴油能够使用多种原料进行生产[2]，而且无需对发动机做任何改造，即可用于常规的柴油车辆[24]。

- 绿色柴油——绿色柴油是通过用氢进行催化反应，将包含甘油三酸酯和脂肪酸的可再生能源原料中的氧去除而得到的，同时产生富含石蜡的产物、水以及二氧化碳。因此，绿色柴油的热值与传统的柴油相同，而且可兼容完全用于同石油生成的柴油燃料的标准混合物的混合[9,23]。生物柴油含有大约 11% 的氧，而石油基柴油与绿色柴油则没有氧分。

在 2008 年，生物乙醇与生物柴油为全球提供了 1.8% 的运输燃料，而且为美国提供了大约 4% 的能源使用量[14]。使用生物质作为液体燃料生产的原料，能够削减废气和温室气体排放，还可以替代供热和发电中化石燃料的使用。世界范围的生物质电能总容量大约为 40GW。目前，全球生物质基交通运输燃料的增长率已经超过每年 10%。

2.5.4　风能

地球受太阳不均衡加热，而且这种热差驱动全球从地球表面到平流层的大气对流系统。这些风运动中储存的大部分能量发生在高海拔处，其连续风速可超过 160km/h（99mile/h）（见图 2.14）。为了评估特定的位置风速的频率，经常使用一个概率分布函数来观察该数据。总体上，风力发电是一种无温室气体排放的可再生能源，但是由于它的不可预测性，还存在与国家电网并网的问题。截至 2009 年年底，世界范围的风电场容量为 157900MW，表明该年度增长达到 31%，而且风力发电供应了全球 1.3% 左右的电力消耗。截至 2008 年年底，美国风力发电装机容量达到 25170MW，而且增长势头依然强劲（2010 年风力发电容量逐渐增加到 15%）[1,39]。



a)　　b)

图 2.14　a）美国纽约劳维尔市附近枫树岭风电场中，每个 1.65MW 风力发电机组可以产生足够 500 个左右的家庭使用的电力。Jennifer Harvey，NYSERDA，NREL（美国可再生能源实验室）PIX 14399；b）海上风资源。目前，美国拥有超过 35000MW 的陆基风力发电装机容量。这足以为超过 9 百万个家庭服务，而且可以避免年度排放 6200 万 t 二氧化碳[13]

靠风力来提供大量能量的潜能是非常可观的（见图 2.15）。通过减少风能传输的成本，输电能力的可用性有助于实现风电的大规模部署。

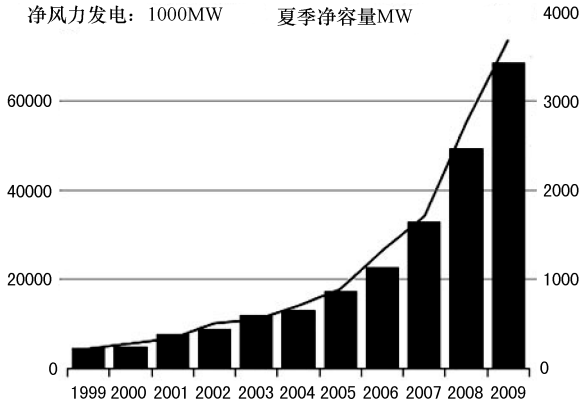


图 2.15　风力发电与装机容量；风电的增长[14]

2.5.5　地热能

地热能是指来源于行星的原始形成、矿物质的放射性衰变、火山活动以及地表吸收的太阳能的热量（见图 2.16）。地热梯度是指行星内核与其表面之间的温差，驱动热能以热量的形式从内核向表面不断传递。地热发电站具有成本效益型、可靠、可持续以及环境友好等优点。世界最大的地热发电站位于美国加利福尼亚州的 Geysers，其额定容量为 750MW。全球范围内地热发电站的装机容量大约为 10715MW。另外，还有 28GW 的直接地热容量被用于地区供热、空间供暖、温泉、工业处理、脱盐淡化以及农业应用等。



a)　　b)

图 2.16　a）美国内华达州一个热泉，地球的热量（称为地热能）以蒸汽的方式逸出；b）马姆莫斯湖发电厂位于北加利福尼亚州的一处风景区。双循环地热发电站不释放二氧化碳或水汽羽，而且也与周围环境融为一体[32]

地球深处所蓄的热水或蒸汽可以通过钻探来获得。靠近地球表面的地热温度

通常维持在 50 ~ 60°F。所蓄热水和蒸汽可以被用于驱动发电机实现发电。在其他应用中，地热可以直接用于建筑物和工厂供热。在生物质发电的情况下，一个地热发电站可以 7 × 24h 运行，能够提供基本的负载能量，由此可与燃煤发电厂相竞争。

2.5.6　海洋能

海洋波浪能发电系统最近已经成为一种发展势头良好而且切实可行的技术。这种技术的发展趋势被认为大有前途。全球首家商业潮汐发电厂 2007 年建成于爱尔兰斯特兰福德湾海峡。虽然发电机的功率足以为上千个家庭供电，但水轮机对环境的影响也是最小的，因为它几乎完全处于水下，而且转子转动非常缓慢，对野生动物没有危险。海洋热能转换使用深水与浅水之间存在的温差来驱动热机（参见 7.16 节）。

2.5.7　可再生能源贡献的预测

图 2.17 所示的饼图为不同的可再生能源技术的相对贡献。混合可再生能源系统通常将两种或更多的可再生能源一起使用，以提供更高的系统效率并实现更强的能量供应平衡。例如，假设一个负载需要的功率为 100%，而且没有任何一种可再生能源系统能够满足这种需要，因此可以将两种或更多的可再生能源系统组合起来使用。例如，60% 由生物质系统来提供，20% 由风能系统来提供，而剩余部分则通过燃料电池来提供。这样将所有这些可再生能源系统组合起来可以满足 100% 的负载功率和能量需求（比如，家庭或商业需求）。另一个例子是光伏阵列加上风力发电机组组合。这种组合将会在冬季由风力发电机组产生更多的输出，而在夏季，太阳能面板将会提供它们的峰值输出。

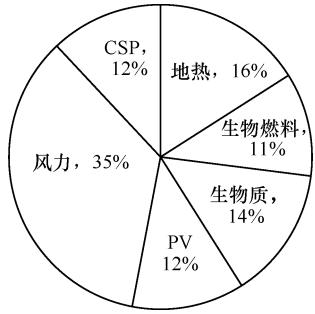


图 2.17　2030 年各种可再生能源相对贡献的未来预测饼图[14]。PV：光伏；CSP：集中式太阳能发电

2.6　氢

氢是最简单的元素，氢的每个原子只有一个质子，太阳基本上是由氢气和氦气组成的一个大球。在太阳内核中，氢原子结合形成氦原子（称为聚变过程）并释放出辐射能。这种辐射能维持地球上的生命，因为它驱动植物与其他生命系统的光合作用，而且它被储存为化石燃料中的化学能。

氢并不是以一种气体存在于地球之上的，而且仅发现于与其他元素所形成的

化合物形式中，比如水（H_2O）和甲烷（CH_4）。氢产生于包括天然气、煤、生物质甚至是水等在内的其他资源。两个最常见的生产方法是蒸汽转化法和电解法，在这个过程中水被分解为氧气和氢气。蒸汽转化法是目前产生氢气成本最低而且最常见的方法，电解出处理成本较高。目前，全球的氢气生产 48% 来自天然气，30% 来自石油，18% 来自煤以及 4% 来自水电解。

按重量来算，氢气在所有普通燃料中含能量最高（大约超过汽油 3 倍），但按体积来算，其含能量又最低（见表 2.9）。氢气以可用的形式将能量从一个位置运输到另一个位置。跟电力一样，氢气是一种能量载体。氢气燃烧清洁，产生水（H_2O）。当在发动机中燃烧或者使用燃料电池，它会被转换为水。为了使氢气成为一种可再生能源燃料，它应该使用可再生能源（比如风力发电或太阳能发电）进行生产。

目前，氢气有两种基本用途。大约一半的氢气用于通过哈柏法（Haber）生产氨（NH_3）。进而，氨被直接地或间接地用作化肥。目前生产的另一半氢气用于氢化裂解过程以将重油资源转换为适合用作燃料的较轻馏分。氢燃料电池能够提供电力。它们效率很高，但是造价昂贵。小型燃料电池能够驱动电动小汽车，而大型燃料电池则能够在不使用输电线的情况下为偏远位置提供电力。

2.7 电能

一个原子的质子和电子带有一个电荷。质子带有一个正电荷（+），而电子则带有一个负电荷（-）。异性电荷相互吸引。原子的最外层上的电子受质子的吸引并不强烈，能够从一个原子移动到另一个原子上并产生电力。在一段时间内，一个发电厂产生的或一个消费者使用的电量可以用千瓦时（kWh）来测量，它等于 1000W 做功 1h 的能量。例如，如果使用一个 100W 的灯泡 7h，就已经使用了 700Wh 或 0.7kWh 的电能。图 2.18 所示为电力的使用分布情况，而图 2.19 则是美国的电力来源分布情况。

在住宅领域，大部分电力是用于空调、冰箱、空间和水加热、照明以及为电器和设备供电。直到 2030 年，在世界范围内，电力将是增长最快的最终使用能量形式，因为在过去的几十年中早已如此。电力是最为著名的能量载体，它将煤、天然气、铀、风能以及其他能源中的能量输送给家庭、商业以及工业等。人们也使用电力将水电站大坝流动水体中的能量输送给消费者。对于许多能量需要来说，使用电力比使用该能源自身更为容易。

如果电流通过一个电器设备，其中一些电能将会转化成其他形式的能量（尽管一些能量总是会以热量的形式损失掉）。因电流而产生的电能数量 E_e 可以用多种不同的方式来表示：

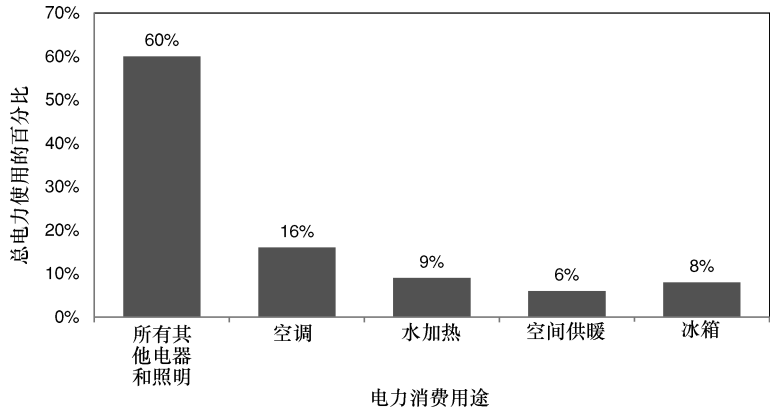


图 2.18　2008 年美国家庭电力使用情况[14]

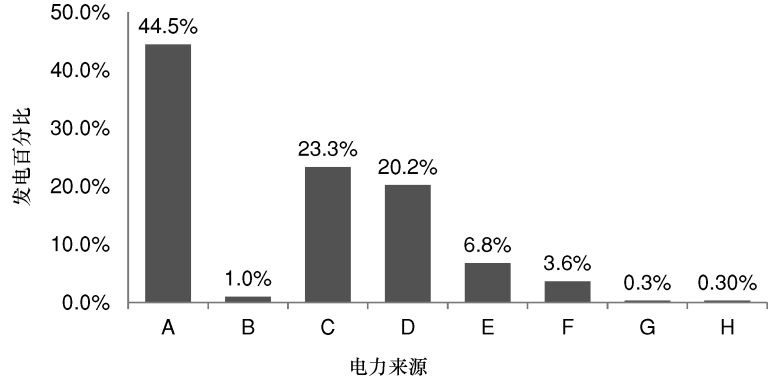


图 2.19　美国电力工业不同燃料的净发电量[13]

A—煤　B—石油　C—天然气　D—核　E—水电

F—其他可再生能源　G—其他气体　H—其他[14]

$$E_e = VIt = I^2Rt \tag{2.6}$$

式中，V 为电势差（V）；I 为电流（A）；t 为电流流动的时间（s）；R 为电阻（Ω）。

在交流（AC）电中，电子流动的方向以固定的间隔或周期来回切换。来自墙壁插座的日常家庭用电和输电线中流动的电流就是交流电。美国所用的标准电流为每秒 60 次循环（即频率为 60Hz）；欧洲和世界大多数其他地方为每秒 50 次循环（即频率为 50Hz）。另一方面，在直流（DC）电中，电流总是单向流动。手电筒中流动的电流就是直流电。交流电的优点之一就是改变电流的电压相对便宜。而且，使用交流电的电流长距离输送发生的不可避免的能量损失要远远小于使用直流电。

例 2.6　笔记本电脑的电力消耗

一台 90W 的笔记本电脑平均每天使用 10h。笔记本电脑的成本为 500 美元，而且将使用 4 年。电力成本为 0.15 美元/kWh。请估算这台笔记本电脑使用四年的总电力成本。

解：

$$\text{Cost}_{\text{laptop}} = \frac{500\text{ 美元}}{4\text{ 年}} = 125\text{ 美元/年}$$

$$\text{Cost}_{\text{electricity}} = \frac{0.15\text{ 美元}}{\text{kWh}} \frac{10\text{h}}{\text{天}} \frac{365\text{ 天}}{\text{年}} 90\text{W} \frac{\text{kW}}{1000\text{W}} = 49.3\text{ 美元/年}$$

$$\text{Cost}_{\text{total}} = \text{Cost}_{\text{laptop}} + \text{Cost}_{\text{electrictiy}} = (125\text{ 美元/年} + 49.3\text{ 美元/年})4\text{ 年} = 697.2\text{ 美元}$$

2.8　磁能

磁能与电能之间并无本质区别：两种现象的关系可以用麦克斯韦方程来表示。一个磁矩为 m 的磁体在磁场 B 中的势能被定义为磁力的功（磁转矩），其估算公式为

$$E_m = -mB \tag{2.7}$$

计算在单位体积内产生一个电场或磁场所需的功取决于电场和磁场能量密度。电磁辐射（比如微波、可见光或者伽马射线等）表示一个电磁能流。电磁辐射的能量具有离散的能量等级。这些等级之间的间距等于 $E = h\nu$，其中 h 为普朗克常数，6.626×10^{-34}Js[31]；ν 为辐射频率。这个电磁能数通常被称作一个光子。组成可见光的光子能量为 160～310kJ/mol。

2.9　化学能

化学能来自分子中的原子组合以及其他各种物质的聚合。它可以被定义为电力所做的功，也就是电荷的静电势。如果一个系统的化学能在一个化学反应期间下降了，该差值就被以热或光的形式传递给外界。另一方面，如果一个化学反应的结果是提高了系统的化学能，那么，该差值就是通过外界以热或光的形式来提供的。在一个化学反应期间摩尔化学能变化的典型值范围为每摩尔数十到数百千焦。例如，汽油中广泛使用的 2，2，4-三甲基戊烷（异辛烷）的化学分子式为 C_8H_{18}，它与氧气发生放热反应产生 10.86MJ/mol 异辛烷：

$$C_8H_{18}(l) + 25/2O_2(g) \rightarrow 8CO_2(g) + 9H_2O(g) + 10.86\text{MJ/mol} \tag{2.8}$$

当两个氢原子反应形式一个氢分子时，通过 H-H 键的键能降低了化学能。当电子被从一个氢原子中完全去除时，形成了一个氢离子，此时被称为电离能的

化学能增大了。

2.10　能量与全球变暖

化石燃料的燃烧每年大约产生 21.3 亿 t 的二氧化碳，而自然过程只能够吸收其中的一半左右，因此，大气中的二氧化碳每年净增长 10.65 亿 t[21]。

一吨碳相当于：$MW_{CO_2}/MW_C = 44/12 = 3.7t$ 二氧化碳。

二氧化碳排放量可以通过下式来计算：

$$e_{CO_2} = (C_f/E_f)(MW_{CO_2}/MW_C) \tag{2.9}$$

式中，e_{CO_2}为 CO_2 排放量（kg_{CO_2}/kWh）；C_f 为燃料的碳含量（kg_C/kg_{fuel}）；E_f 为燃料的含能量（kWh/kg_{fuel}）。

表 2.12 为各种燃料燃烧的典型二氧化碳排放。一辆小汽车每年平均行驶 10000mile，汽油消耗平均为 25mile/gal，每年大约排放 1.2t 二氧化碳。早在 19 世纪初期人们就已经知道，各种大气气体，就像温室中的玻璃一样，传输入射的太阳光并吸收出射的红外线辐射，由此，提升了地球表面的平均气温。很显然，二氧化碳是影响最大的温室气体。对于气候变化，可以得到的最强有力的证据就是从格陵兰岛与南极洲的古代冰核样本所获得的所谓古气候数据。通过分析冰在形成时嵌入的空气泡，科学家能够确定温室气体的含量甚至是每个时间点的平均温度。图 2.20 表明，在过去的 420000 年间，大气中的二氧化碳体积含量在 180～290ppm周期性地变化，该周期结合地球的轨道变化大约是 100000 年。地球的温度紧密地跟随温室气体浓度的变化而变。

表 2.12　各种燃料燃烧的二氧化碳排放数据

燃料/（kg_C/kg_{fuel}）	比碳/（kWh/kg_{fuel}）	比能/（kg_{CO_2}/kg_{fuel}）	比 CO_2 排放（kg_{CO_2}/kWh）	比 CO_2 排放
煤（烟煤/无烟煤）	0.75	7.5	2.3	0.37
汽油	0.9	12.5	3.3	0.27
轻油	0.7	11.7	2.6	0.26
柴油	0.86	11.8	3.2	0.24
LPG 液化石油气	0.82	12.3	3.0	0.24
天然气，甲烷	0.75	12	2.8	0.23
原油				0.26
煤油				0.26
木材①				0.39
泥炭①				0.38
褐煤				0.36

注：（ETB[15]已获得使用授权）。

① 通常被视为一种生物燃料。

1850 年左右，当时的二氧化碳水平约为 280ppm，随后开始上升，目前达到 380ppm，这个数字表明其值比工业化前升高了 36%（见图 2.20）。温度的升高能够从地面和海水中释放出二氧化碳，因此这两种效应相互强化。温度和二氧化碳水平上升的可能后果包括冰的融化、海平面上升以及由于大气中额外的能量所带来的严重风暴。由于冰的融化，导致水色变深而且地面会吸收更多的太阳光，由此，加剧了气候变暖。融化的水像河流一样流动，引起了快速热传递和热侵蚀。

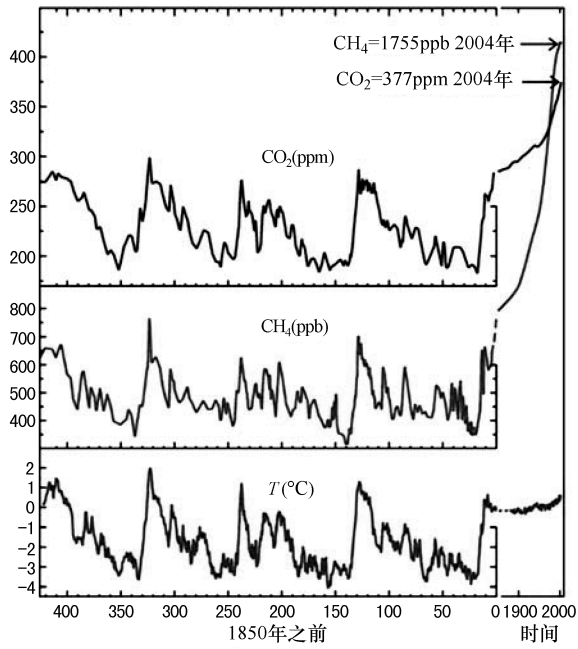


图 2.20　来自冰核的古气候数据显示，近来二氧化碳和甲烷在不断增加。尽管温度在不断上升，但其仍未达到记录水平，不过到 21 世纪中叶将有可能达到该水平[38]

地球变暖潜势是给定质量的某种化学物质在给定的时间内对全球变暖贡献的度量。地球变暖潜势为由一种物质所引起的变暖潜势与同等质量的二氧化碳所引起的变暖潜势之比。各种氢氯氟碳化物（HCFC）和氢氟烃（HFC）的地球变暖潜势范围为 93～12100。这些值是根据 100 多年的数据计算而得的[12,36]。

例 2.7　天然气燃烧的二氧化碳排放

当一种碳氢化合物燃料燃烧时，燃料中所有的碳几乎都被完全燃烧生成引起温室效应的二氧化碳。平均而言，燃气发电厂每发 1kWh 电将会产生 0.59kg 二

氧化碳。一个典型的新家庭每年大约用电 7000kWh。请给出一个拥有 200000 户家庭的城市使用冰箱而产生的二氧化碳总量。

解：

天然气燃烧的二氧化碳排放 *A*kWh 等于 kW 乘以小时数。它是功率为 1kW 的设备 1h 消耗的能源总量（1kJ/s，3600s），因此可以使用这个能量单位。

数据：$m_{CO_2}=0.59\text{kg}_{CO_2}/\text{kWh}$，200000 个房间，每年为 7000kWh/房间供能每年产生的二氧化碳 *d* 总质量为每 kWh 的二氧化碳产生率与房间数之积：

$$m_{\text{total CO}_2}=\text{供能}(m_{CO_2})(\text{房间数})=\left(\frac{\text{kWh}}{\text{房间年}}\right)\left(\frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{kWh}}\right)(\text{房间数})$$

$$m_{\text{total CO}_2}=8.26\times10^{8}\text{kg}_{CO_2}/\text{年}=826.0\ \text{Mt}_{CO_2}/\text{年}$$

2.11　应对全球变暖问题

电力生产（约 40%）和交通运输燃料（约 30%）占了总二氧化碳排放的大部分（见图 2.21）。因此，用于发电和交通运输的燃料产生了大约 70% 的二氧化碳排放。例如，使用可再生能源发电并不会带来额外的二氧化碳排放，而且它是未来可持续的能源。大规模扩张使用可再生能源的主要挑战来自于成本、供应的间歇性以及资源与最终用户之间的距离。

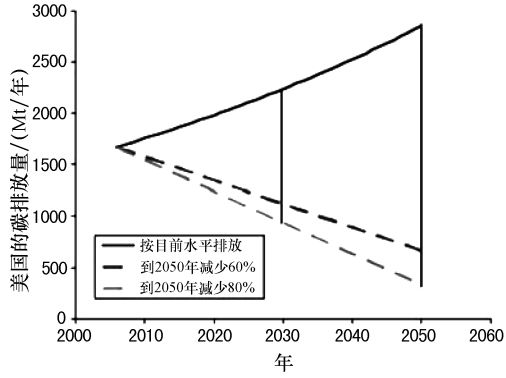


图 2.21　到 2030 年和 2050 年，美国化石燃料的碳排放比目前水平减少 60%~80% 的三角形示意图[25]

一些可能的可再生能源是集中式太阳能发电、地热发电、风力发电、分布式房顶光伏系统以及太阳能热水器等。混合动力电动小汽车代表着一个重要的进步。混合电动小汽车的续航里程大约为 10~20mile，而且如果它能够接入电网充电，那就有可能大大地减少汽油车辆的使用数量。使用 E85（分别由 85% 的乙醇和 15% 的汽油混合而成）可能会有助于降低二氧化碳排放[29]。

例 2.8　煤的消耗与来自煤的二氧化碳排放量

某大型公共计算机实验室每周运行 6 天（周一~周六）。每台计算机的功率约为 240W。如果该计算机实验室拥有 45 台计算机，而且每台计算机每天使用

12h，那么在一学年内，当地的燃煤发电厂将不得不向大气释放多少二氧化碳（单位分别使用 kg 和 kmol）以维持这些计算机的运行？

解：

数据：煤（烟煤/无烟煤）：0.37kg_{CO_2}/kWh。数据来自表 2.12。

$$\left(\frac{240\text{W}}{\text{计算机}}\right)\left(\frac{\text{kW}}{1000\text{W}}\right)\left(\frac{52\text{ 周}}{\text{年}}\right)\left(\frac{6\text{ 天}}{\text{周}}\right)\left(\frac{12\text{h}}{\text{天}}\right)\left(\frac{45\text{ 台计算机}}{\text{实验室}}\right)$$

$$=40435.2\text{kWh}$$

可以知道实验室每年需要 40435.2kWh 的电能，由于使用燃煤发电，能够使用它的排放值 0.37kg_{CO_2}/kWh。

$$(40435.2\text{kWh})(0.37\text{kg}_{CO_2}/\text{kWh})=14961\text{kg}_{CO_2}\text{被排放}$$

或者

$$14962\text{kg}/(44.01\text{kg/mol})=339.9\text{kmol}_{CO_2}\text{被排放}$$

例 2.9　使用地热减少空气污染

某地区使用天然气供暖。假设一个煤气炉的平均 NO_x 和 CO_2 排放分别为 0.0045kg/克卡和 6.4kg/克卡。现在考虑使用地热系统来取代天然气供暖系统。使用地热系统预计每年将节省天然气 20×106 克卡。请给出地热系统每年将减少的 NO_x 和 CO_2 排放量。

解：

克卡 = 29.3kWh（见表 2.1）

减少的 NO_x 排放量 = (0.0045kg/克卡)(20×10^6 克卡/年)

$$=9.0\times10^4\text{kg/年}$$

减少的 CO_2 排放量 = (6.4kg/克卡)(20×10^6 克卡/年)

$$=12.8\times10^7\text{kg/年}$$

典型的小汽车每年大约产生 8.5kg NO_x 和 6000kg CO_2。使用地热系统来取代天然气供暖系统相当于减少 10600 辆小汽车上路的 NO_x 排放量和 21000 辆小汽车上路的二氧化碳排放量。因此，所提议的地热系统将会对空气污染产生积极的影响[8]。

学生对全球变暖问题的关注

每一代人都有各自时代的危机，人们会受到这些危机的严重影响。有些时代会遭遇战争或者饥荒，而如果不重视能源危机，我们这一代肯定会同时面临战争或者饥荒。人们对化石燃料的依赖已然成瘾，享受着许多奢侈品，比如空调、电视、上网冲浪或者是打电话等。所有的这些奢侈品都在告诉人们生活在现代化社会当中，但不幸的是，在能源短缺的时候，人类将会是最大的受害者。很难相信

具有最强大的人类智慧的下一代能够对这个问题视而不见。化石燃料能源是有限的，而且许多科学家预言它的枯竭期不会超出我们的有生之年。人类需要更好地去理解能源及其使用的基本规律，以致能够做出更好的选择，并改变目前前进的方向。——Brad Healey- Senior UNL-2012。

习　　题

2.1　使用煤的优缺点各是什么？

2.2　电动小汽车能够减少化石燃料的使用吗？

2.3　燃油加热器或电阻加热器对于环境来说是最好的吗？

2.4　天然气加热器或地热系统对于房间来说是最好的吗？

2.5　为什么电能如此有用？

2.6　为什么风的能量能被利用？

2.7　风力发电怎样才能帮助保护石油供应？

2.8　如何使用风能才能有助于减少空气污染？

2.9　什么是转换成电力的最好能源？

2.10　房顶的白色瓦片会使房间变冷吗？

2.11　如何利用来自太阳的能量为水加热？

2.12　核电优点很明显，为什么它不常用？

2.13　如何能够使用太阳能有助于减少大气污染并有助于保存石油供应？

2.14　为什么光合作用的过程如此有价值？

2.15　列出一些已知的高能量食物。

2.16　为什么电池供电车辆被认为是运输业的未来？

2.17　为什么化学能对人们是有用的？

2.18　什么其他形式的能量能够从化学能中产生？

2.19　列出三种包含化学能的其他燃料的例子。

2.20　一台过度使用的小汽车每月可以消耗大约 250 加仑的汽油。请估算小汽车每年消耗的能源。

2.21　一台过度使用的小汽车每月可以消耗大约 150 加仑的汽油。请估算小汽车每年消耗的能源。

2.22　一辆小汽车的日常行驶距离大约是 80mile/天，城市里程为 20mile/gal。如果使用城市里程为 30mile/gal 的新车来取代它，汽油的平均成本为 4.50 美元/gal，请估算使用新车每年①节省的燃料量、能量以及成本；②减少的二氧化碳排放量。

2.23　一辆小汽车的日常行驶距离大约是 80mile/天，城市里程为 10mile/gal。如果使用城市里程为 32mile/gal 的新车来取代它，汽油的平均成本为 4.50 美元/gal，请估算使用新车每年①节省的燃料量、能量以及成本；②减少的二氧化碳排放量。

2.24　某城市的天然气消耗率为 $500 \times 10^6 ft^3$/天。体积流量的标准条件为 60°F 和 1atm = 14.7psia。如果高热值天然气的成本为 12 美元/GJ，该城市日常的天然气成本是多少？

2.25 某城市的天然气消耗率 $800 \times 10^6 ft^3$/天。体积流量的标准条件为 60°F 和 1atm = 14.7psia。如果高热值天然气的成本为 10 美元/GJ，该城市日常的天然气成本是多少？

2.26 一辆小汽车一天的消耗大约为 6gal，油箱的容积大约为 15gal。汽油的密度范围是 0.72～0.78kg/L（见表 2.2）。较低的热值汽油大约是 44000kJ/kg。假设汽油的平均密度为 0.75kg/L。如果小汽车能够使用 0.2kg 核燃料铀-235，请估算需要重新加油的年数。

2.27 一辆小汽车一天的消耗大约为 3gal，油箱的容积大约为 11gal。汽油的密度范围是 0.72～0.78kg/L（见表 2.2）。较低的热值汽油大约是 44000kJ/kg。假设汽油的平均密度为 0.75kg/L。如果小汽车能够使用 0.1kg 核燃料铀-235，请估算需要重新加油的年数。

2.28 使用表中 2.11 中的数据和元素分析，只考虑固定碳、干灰含量、C、H 以及 O 等成分，请估算生物质白橡木的总热值（单位：kJ/kg）。

2.29 使用表中 2.11 中的数据和元素分析，只考虑固定碳、干灰含量、C、H 以及 O 等成分，请估算生物质玉米秸秆和小麦秸秆的总热值（单位：kJ/kg）。

2.30 当一种碳氢化合物燃料燃烧时，燃料中所有的碳几乎都被完全燃烧生成二氧化碳，它是引起温室效应进而导致全球气候变化的基本气体。平均而言，燃气发电厂每发 1kWh 电将会产生 0.59kg 二氧化碳。一个典型的新家庭每年大约用电 7000kWh 电力。请给出一个拥有 100000 户家庭的城市使用冰箱而产生的二氧化碳总量。

2.31 当一种碳氢化合物燃料燃烧时，燃料中几乎所有的碳都完全燃烧生成二氧化碳，它是引起温室效应进而导致全球气候变化的基本气体。平均而言，燃气发电厂每发 1kWh 电将会产生 0.59kg 二氧化碳。一个典型的新家庭每年大约用电 10000kWh 电力。请给出一个拥有 250000 户家庭的城市使用冰箱而产生的二氧化碳总量。

2.32 某大型公共计算机实验室每周周一～周六运行 6 天。这些计算机一直被连续使用或保持开机状态直到下一个用户使用。每台计算机的功率约为 240W。如果该计算机实验室拥有 53 台计算机，而且每台计算机每天使用 12h，那么在一学年内，当地的燃煤发电厂将不得不向大气释放多少二氧化碳（单位使用 g mol）以维持这些计算机的运行？

2.33 某普通大学的大型公共计算机实验室每周周一～周六运行 6 天。这些计算机一直被连续使用或保持开机状态直到下一个用户使用。每台计算机的功率约为 240W。如果该计算机实验室拥有 53 台计算机，而且每台计算机每天使用 12h，那么在一学年内，当地的燃煤发电厂将不得不向大气释放多少二氧化碳以维持这些计算机的运行？

2.34 某大型公共计算机实验室每周从周一到周六运行 6 天。每台计算机的功率约为 120W。如果该计算机实验室拥有 45 台计算机，而且每台计算机每天使用 12h，那么在一学年内，当地的燃煤发电厂将不得不向大气释放多少二氧化碳（单位使用 g mol）以维持这些计算机的运行？

2.35 如果一辆小汽车每月消耗 60gal 汽油。请估算小汽车每年消耗的能源。

2.36 一辆小汽车每天使用 32mile，平均油耗为 22mile/gal。如果 1gal 燃料的成本为 3.8 美元，请估算小汽车的年度燃料成本。

2.37 一辆小汽车每天使用 32mile，平均油耗为 22mile/gal。请估算小汽车每年消耗的能源。

2.38 如何能够控制您的碳足迹？

2.39　一个 150W 的电灯泡平均使用 10h/天。新灯泡成本为 2.0 美元，寿命大约为 5000h。如果电力成本为 0.15 美元/kWh，请估算灯泡的年度成本。

2.40　一台功耗为 90W 的笔记本电脑平均使用 5h/天。如果一台笔记本电脑的成本为 500 美元而且将使用 4 年，请估算笔记本电脑使用 4 年的总电力成本。电力成本为 0.15 美元/kWh。

2.41　一台功耗为 90W 的笔记本电脑平均使用 7h/天。如果一台笔记本电脑的成本为 500 美元而且将使用 4 年，请估算笔记本电脑使用 4 年的总电力成本。电力成本为 0.10 美元/kWh。

2.42　一台 20hp 的电动机用于将地下水抽入储存容器，每天抽水 4h。请估算每年泵做的功（单位：kW）以及每年的电力成本。假设电力单位成本为 0.1 美元/kWh。

2.43　某城市的天然气消耗率为 $250 \times 10^6 ft^3$/天。体积流量的标准条件为 60°F和 1atm = 14.7psia。如果高热值天然气的成本为 6 美元/GJ，该城市日常的天然气成本是多少？

2.44　某个家庭的供暖天然气消耗率为 $4.3 ft^3$/天。体积流量的标准条件为 60°F和 1atm = 14.7psia。如果高热值天然气的成本为 0.67 美元/MJ，该家庭的日常天然气成本是多少？

2.45　某地区使用天然气供暖。假设一个煤气炉的平均 NO_x 和 CO_2 排放分别为 0.0045kg/克卡和 6.4kg/克卡。该地区计划使用地热系统来取代天然气供暖系统。使用地热系统预计每年将节省天然气 40×10^6 克卡。请给出地热系统每年将减少的 NO_x 和 CO_2 排放量。

2.46　一个热水器使用丙烷作为燃料，燃烧后产生水为蒸汽形态时它提供 80% 的标准燃烧热。如果丙烷的价格为 2.2 美元/gal（在 25°C时测量）。那么每百万 Btu 的供热成本是多少美元？每 MJ 的供热成本是多少美元？

2.47　某个普通视频游戏系统运行时功率为 170W。如果某个人在一年 80% 的时间一天玩 1h，这个人等于燃烧了多少升汽油？（使用 HHV 来估算）。

2.48　某公路竞技自行车运动员可以在 4h 的比赛中保持 300W 的平均功率。在漫长的比赛中，他必须连续三周每天如此。假设每个蛋白棒含 184cal 热量，该运动员应该吃掉多少蛋白棒以弥补比赛中的热量损失？

2.49　请描述天然气是如何从它的自然状态走向市场的过程。

2.50　有些人喜欢在睡觉时打开背景声音。许多人是选择听它们的电视声音。电视的功耗通常是 340W 左右，在您睡着时将会运行 8h。如果电力成本为 0.20 美元/kWh，如果您一年每周五天如此，请计算这种做法的成本。

2.51　交流电的优点和缺点是什么？

2.52　直流电的优点和缺点是什么？

2.53　在寻找可再生和温室气体排放少的新能源时，碳基生物燃料是主要兴趣所在。这些燃料仍然是碳基的，而且必须经历燃烧才能释放化学能。为什么这种处理被视作一种合理的能源？

2.54　在一个房间内修改线路时，电工想要使新线路具有与原设计相同的输电能力。原电路的电阻为 2Ω，电流为 20A。如果电阻变为 4Ω，为了传输相同的电能，需要多少安的电流？

2.55 如果您将每天9min的淋浴削减为6min，请计算每年节省的费用。淋浴器体积流量为3.2gal/min，每加仑的能量值为440Btu，能量成本为0.13美元/kWh。

2.56 请将下列碳基燃料按总能量密度自低至高排列：柴油、乙醇、传统的汽油以及煤油基喷气燃料。

参考文献

1. AWEA (2006) U.S. Wind industry ends most productive year, sustained growth expected for at least next two years. American Wind Energy Association in http://www.awea.org
2. Behzadi S, Farid MM (2007) Review: examining the use of different feedstock for the production of biodiesel. Asia-Pac J Chem Eng 2:480–486
3. Belyaev LS, Marchenko OV, Filippov SP, Solomin SV, Stepanova TB, Kokorin AL (2002) World energy and transition to sustainable development. Kluwer, Boston
4. Blair N, Short W, Mehos M, Heimiller D (2006) Concentrating solar deployment systems (CSDS)—A new model for estimating U.S. concentrating solar power market potentialpotential. ASES Solar conference, 8–13 July 2006
5. Bodansky D (2004) Nuclear energy: principles practices and prospects. Springer, Oxford
6. Bolinger M, Wiser R (2005) Balancing cost and risk: the treatment of renewable energy in western utility resource plans, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California. http://eetd.lbl.gov/EA/EMP/reports/58450.pdf
7. Capehart BL (2007) Encyclopedia of energy engineering and technology. CRC Press, Boca Raton
8. Çengel YA, Boles MA (2002) Thermodynamics an engineering approach. McGraw-Hill, New York
9. Demirbas A (2008) Biodiesel: a realistic fuel alternative for diesel engines. Springer, Berlin
10. Demirbas A (1997) Calculation of higher heating values of biomass fuels. Fuel 76:431–434
11. Denholm P, Margolis R (2006) Very large-scale deployment of grid-connected solar photovoltaicphotovoltaic in the United States: challenges and opportunities. ASES Solar conference, 8–13 July 2006
12. Davidson E, Janssens I (2006) Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature 440:165
13. DOE/EIA (2010) International energy outlook. Report #:DOE/EIA-0484. http://www.eia.gov/oiaf/ieo/highlights.html. Accessed May 2011
14. EIA (2011) Renewable energy consumption and electricity preliminary statistics 2010, Release date: June 28, 2011. http://www.eia.gov/renewable/. Accessed July 2011
15. ETB (2011) Engineering Tool Box. http://www.engineeringtoolbox.com. Accessed May 2011
16. Farrell A, Plevin R et al (2006) Ethanol can contribute to energy and environmental goals. Science 311:506–508
17. Gary JH, Handwerk GH (1994) Petroleum refining technology, 3rd edn. Marcel Dekker, New York
18. Gaur S, Reed T (1998) Thermal data for natural and synthetic fuels. Marcel Dekker, New York
19. Houghton RA (2005) The contemporary carbon cycle. In: Schlesinger WH (ed) Biogeochemistry. Elsevier, Amsterdam
20. Janzen HH (2004) Carbon cycling in earth systems -a soil science perspective. Agric Ecosys Environ 104:399–417
21. Jacobson MZ (2009) Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. Energy Environ Sci 2:148–173
22. Kaes GL (2000) Refinery process modeling. Kaes Enterprises, Colbert

23. Kalnes T, Marker T, Shonnard DR (2007) Green diesel: a second generation biofuel. Int J Chem Reactor Eng 5:1–9
24. Knothe G (2006) Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acids alkyl esters. Fuel Process Technol 86:1059–1070
25. Kutscher CF (2007) (ed) Tackling climate change in the U.S., American Solar Energy Society. www.ases.org/climatechange. Accessed May 2011
26. Kydes AS, Kanudiab A, Loulouc R (2004) National energy modeling systems. In: Cleveland CJ (ed) The encyclopedia of energy. Elsevier, Oxford
27. Laursen JKr, Karavanov AN (2006) Processes for sulfur recovery, regeneration of spent acid, and reduction of nox emissions. Chem Petrol Eng 42:229–234
28. Marks DB (1999) Biochemistry, 3rd edn. Kluwer, Ney York
29. Metz B, Davidson O et al (2005) IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Working Group III. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge
30. Milbrandt A (2005) A geographic perspective on the current biomass resource availability in the United States, NREL, Golden, Colorado. http://www.nrel.gov/learning
31. Mohr PJ, Taylor BN, Newell DB (2011) The 2010 CODATA Recommended values of the fundamental physical constants. This database was developed by Baker J, Douma M, Kotochigova S. http://physics.nist.gov/constants
32. NREL (2011) National Renewable Energy Laboratory Golden Colorado. http://www.nrel.gov/learning. Accessed May 2011
33. Øvergaard S (2008) Issue paper: definition of primary and secondary energy. www.og.ssb.no. Accessed April 2011
34. Sheng C, Azevedo JLT (2005) Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. Biomass Bioenergy 28:499–507
35. Smoot LD, Smith PJ (1985) Coal combustion and gasification. Plenum Press, New York
36. Swisher J (2006) Tackling climate change in the U.S.: the potential contribution from energy efficiency, the ASES Solar National Conference, 8–13 July 2006
37. EP UN (2009) Towards sustainable production and use of resources: assessing biofuels. United Nations Environment Programme, Renewable Energy World
38. Vimeux F, Cuffey KM, Jouzel J (2002) New insights into southern hemisphere temperature changes from Vostok ice cores using deuterium excess correction. Earth Planet Sci Lett 203:829–843
39. Wiser R, Bolinger M (2010) DOE EERE, 2010 Wind technologies market report. http://www.osti.gov/bridge. Accessed July 2011

第 3 章　机械能与电能

3.1　机械能

有两种基本力能够体验：引力和电磁力。这两种力都是通过空间作用的。机械能描述了呈现于机械系统各组件中的势能与动能之和。机械能为与在引力作用下的一个物体的运动或位置有关的能量。质量导致了引力。电荷与质量遵守二次方反比律，它表明一种特定的物理量或强度为与该物理量来源的距离的二次方成反比。万有引力定律的基础是反比于两个质量之间距离的二次方，因此，质量在某种程度上起到了类似于电荷之于力律的作用。带电粒子表现出它们之间的非重力作用力。两种带电粒子之间的吸引力或排斥力直接与电荷之积成正比，并与它们之间距离的二次方成反比。这被称为库仑定律。机械能守恒定律表明，如果一个物体或者系统只受保守力作用，该物体或系统的总机械能保持恒定。机械能是可以直接通过一个机械装置（如一个涡轮机）被完全转换为机械功的能量形式。

热能不能被直接和完全地转换成功，因此热能不是机械能。熟悉的机械能形式为动能和势能。由于流体的压强产生的压力能也是另一种形式的机械能。因此，一个单位质量的机械能可以被定义为

$$\left(\frac{\Delta P}{\rho}+\frac{\Delta v^2}{2}+g\Delta z\right)=W_{\text{shaft}}+W_{\text{loss}} \tag{3.1}$$

压力能 + 动能 + 势能 = 机械能 + 损失功

式中，P 为压强；ρ 为密度；v 为流速；g 为重力加速度；z 为海拔；W_{shaft} 为泵、风扇或者类似设备的每单位质量的轴净能量；W_{loss} 表示由于摩擦与其他非理想因素产生的能量损失。

泵、风扇或者涡轮机的机械能方程可以根据每单位质量的能量写出（ft^2/s^2 或 $\text{m}^2/\text{s}^2 = \text{N m/kg}$）。式（3.1）通常用于不可压缩的流动问题，并被称为机械能方程[7]。

3.2　动能

动能（KE）为一个系统或物质由于其相对于外界的速度所拥有的能量。流

动流体相对于固定的外界的动能可以估算为

$$\mathrm{KE}=\frac{1}{2}mv^2 \tag{3.2}$$

式中，m 为质量；v 为平均速度。

动能值的变化发生在一个特定的时间间隔内，而且只取决于该物质的质量、初始平均速度与最终平均速度值。

$$\Delta\mathrm{KE}=\frac{1}{2}m(v_2^2-v_1^2) \tag{3.3}$$

质量流量 m 与密度 ρ、截面积 A 以及平均速度有关：

$$\dot{m}=\rho Av \tag{3.4}$$

在英制工程单位中，为了单位一致性，使用了 g_c（$g_c=32.174\mathrm{lb_m\ ft/lb_f s^2}$），动能的单位变为

$$\mathrm{KE}=\frac{mv^2}{2g_c}=\frac{\mathrm{lb_m ft^2 s^{-2}}}{\mathrm{lb_m ft(lb_f)^{-1}s^{-2}}}=\mathrm{ft\ lb_f} \tag{3.5}$$

例 3.1　流动流体的动能计算

流量为 2.0kg/s 的水通过一个内径为 2.5cm 的管道从一个储存容器中抽出。请计算管中水的动能。

解：

假设水的密度 $\rho=1000\mathrm{kg/m^3}$。

基准为 2.0kg/s。

管道半径（r）$=2.5/2=1.25(\mathrm{cm})$。

管道横截面积：

$$A=\pi r^2=3.14(2.5\mathrm{cm}/2)^2(1\mathrm{m}/100\mathrm{cm})^2=4.906\times10^{-4}\mathrm{m^2}$$

水的平均流速：

$$v=\frac{\dot{m}}{\rho A}=\frac{2.0\mathrm{kg/s}}{(1000\mathrm{kg/m^3})(4.906\times10^{-4}\mathrm{m^2})}=4.076\mathrm{m/s}$$

管中水的动能：

$$\mathrm{KE}=\frac{1}{2}mv^2=\frac{1}{2}(2.0\mathrm{kg/s})(4.076\mathrm{m/s})^2\left(\frac{\mathrm{kJ/kg}}{1000\mathrm{m^2/s^2}}\right)=0.0166\mathrm{kJ/s}=16.6\mathrm{W}$$

J = Nm，其中 N 为牛。

例 3.2　一辆小汽车的动能

一辆质量为 2750lb 的小汽车以 55mile/h 的速度行驶。请估算：①小汽车的动能（kJ）；②让小汽车停止所需的功。

解：

方程：$\mathrm{KE}=\frac{1}{2}mv^2$

数据：$m=2750\mathrm{lb}(\mathrm{kg}/2.2\mathrm{lb})=1250\mathrm{kg}$

$$v=55\mathrm{mile/h}\rightarrow v=\left(\frac{55\mathrm{mile}}{\mathrm{h}}\right)\left(\frac{1609.34\mathrm{m}}{\mathrm{mile}}\right)\left(\frac{\mathrm{h}}{3600\mathrm{s}}\right)=24.58\mathrm{m/s}$$

① $\mathrm{KE}=\frac{1}{2}(1250\mathrm{kg})(24.58\mathrm{m/s})^2\left(\frac{\mathrm{kJ/kg}}{1000\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2}\right)=377.6\mathrm{kJ}$

② $W=\mathrm{KE}=377.6\mathrm{kJ}$

3.3 势能

只要一个物体处于某个力场内的某个位置，就有势能存在。靠近地球表面的重力随高度 z 变化很小，它等于质量 m 乘以重力加速度 $g=9.81\mathrm{m/s}^2$。当力场为地球的重力场时，一个物体的势能（PE）则为

$$\mathrm{PE}=mgz \tag{3.6}$$

式中，z 为高于地球表面或参考表面高度。

势能被储存在一个系统内，而且当一个恢复力试图将该物体拉回到某些较低的能量位置时才被触发。例如，当一个质量被提升时，重力将作用以便将该质量带下来。用于提升该质量的能量被储存于它在重力场中的位置上。

因此，势能为一个物体在给定位置的能量与它在参考位置 Δz 的能量之间的能量差异，并可以表示为

$$\Delta\mathrm{PE}=mg\Delta z \tag{3.7}$$

在英制单位中，势能表示为

$$\Delta\mathrm{PE}=\frac{mg\Delta z}{g_c}=\frac{\mathrm{lb_m\,ft\ ft\ s^{-2}}}{\mathrm{lb_m\,ft(lb_f)^{-1}s^{-2}}}=\mathrm{lb_f\ ft} \tag{3.8}$$

为了单位一致性，使用了 g_c（$g_c=32.174\mathrm{lb_m\ ft/lb_f s^2}$），势能的单位变为 $\mathrm{lb_f ft}$。

势能的不同类型与一个特定类型的力有关：

- 重力势能为重力的功。如果一个物体在重力场之内从一个点落到另一个点，重力将对该物体做正功，比如通过水的落差进行水力发电。
- 弹性势能是一种弹性力功。弹性势能作为一个力试图将物体恢复到它的原始形状的结果而增加，最常见的是在构成该物体的原子与分子之间的电磁力。
- 化学势能与原子或分子的结构布置有关。例如，化学势能为储存于化石燃料当中的能量，当一种燃料燃烧时，化学能被转换成热能。绿色植物通过光合作用过程将太阳能转换成化学能。电能可以通过电化学反应转换成化学能。

- 核势能为在一个原子核之内粒子的势能。核粒子通过强核力束缚在一起。

例 3.3　水的势能变化

水被从一个储水器抽到另一个储水器中。第二个储水器中的水位高出第一个储水器的水位 30ft。1 磅水（Btu）的比势能提高了多少？

解：

问题是要求 1lb_m 水的势能变化。两个储水器之间的水位差 $\Delta z = 30\text{ft}$。

根据式（3.8）可得

$$\Delta\text{PE} = \left(\frac{32.2\text{ft}}{\text{s}^2}\right)\left(\frac{\text{lb}_\text{f}\text{s}^2}{32.2\text{lb}_\text{m}\,\text{ft}}\right)(30\text{ft})\left(\frac{\text{Btu}}{778.2\text{ft lb}_\text{f}}\right) = 0.0385\text{Btu/lb}$$

例 3.4　一部电梯的能量

一部质量为 1500kg 的电梯停在电梯井底基之上 3m 高处。电梯运行至电梯井底基之上 30m 高处。电梯从这个高度自由地落到底基上，并撞击一个强力弹簧。假设整个过程不计摩擦。请估算：

① 电梯在相对于电梯井底基的原始位置的势能。

② 运行电梯所做的功。

③ 电梯在相对于电梯井底基的最高位置的势能。

④ 电梯在它撞击弹簧之前的速度与动能。

解：

假设 $g = 9.8\text{m/s}^2$

数据：$m = 1500\text{kg}$，$z_1 = 3\text{m}$，$z_2 = 30\text{m}$

① $\text{PE}_1 = mgz_1 = (1500)(9.8)(3) = 44100\text{J} = 44.1\text{kJ}$

② $W = \int_{z_1}^{z_2} F\text{d}z = \int_{z_1}^{z_2} mg\text{d}z = mg(z_1 - z_2) = (1500)(9.8)(30 - 3) = 396.9\text{kJ}$

③ $\text{PE}_2 = mgz_2 = (1500)(9.8)(30) = 441.0\text{kJ}$

所以 $W = \text{PE}_2 - \text{PE}_1 = (441.0 - 44.1)\text{kJ} = 396.9\text{kJ}$

④ $\text{KE} = \text{PE}_2 = 441.0\text{kJ}$

$$\text{KE} = \frac{mv^2}{2} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2\text{KE}}{m}} = \sqrt{\frac{2(441000)}{1500}} = 24.25\text{m/s}$$

3.4　压力能

压强单位 Pa 被定义为 $\text{Pa} = \text{N/m}^2 = \text{Nm/m}^3 = \text{J/m}^3$，它变为每单位体积的能

量。压强与体积 $P(1/\rho)$ 之积即每单位质量的能量 J/kg。因此，由于流体的压强而产生的机械能称为压力能 PV，并可以表示为

$$\mathrm{PV} = \frac{P}{\rho} \qquad (3.9)$$

式中，ρ 为密度。

压力能 P/ρ 可以被完全转换成机械能，例如，通过一个可逆涡轮机。机械能的传递通常是通过一个旋转轴来完成，而且机械功通常是指轴功。例如，一个涡轮机将一种流体的机械能转换为轴功。只有摩擦效应会引起以热的形式的机械能损失。考虑一个装满水的容器，如图 3.1 所示。

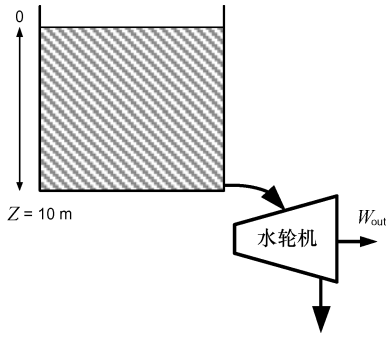


图 3.1　压力能 P/ρ 可以通过一个可逆水轮机被完全转换成机械能

$$\dot{W}_{max} = \dot{m}\frac{P}{\rho} = \dot{m}\frac{\rho g z}{\rho} = \dot{m} g z \qquad (3.10)$$

例如，对于一个质量流量为 10kg/s 的水流，最大功将为

$$\dot{W}_{max} = \dot{m} g z = (10\mathrm{kg/s})(9.81\mathrm{m/s^2})(10\mathrm{m}) = 981\mathrm{W}$$

对于一种流动流体来说，使用表压强代替绝对压强时，压力能与流动能量相同。

例 3.5　水轮机的压力能

通过将一个水轮机安装在一个大湖附近来发电。湖中的平均水深为 45m。水的质量流量为 600kg/s。请确定水轮机的输出功。

解：

假设：水轮机出口处水的机械能很小而且可以忽略不计。水的密度为 $1000\mathrm{kg/m^3}$。

$$W_{out} = \mathrm{PF} = \dot{m} g z = (600\mathrm{kg/s})(9.81\mathrm{m/s^2})(45\mathrm{m}) = 264.9\mathrm{kW}(\mathrm{kJ/kg} = 1000\mathrm{m^2/s^2})$$

该湖为水轮机提供 264.9kW 的机械能。

3.4.1　压头

对于一种不可压缩流体，比如液体，两个海拔之间的压差可以表示为静态压差：

$P_2 - P_1 = -\rho g\ (z_2 - z_1)$。压头 h 可以估算为静态压差：

$$h = \frac{P_2 - P_1}{\rho g}\quad (\mathrm{m}\ 或\ \mathrm{ft}) \qquad (3.11)$$

压头与需要提供压差 $\Delta P = P_2 - P_1$ 的流体柱的高度有关。

机械能方程［式（3.1）］也可以根据液柱头 ΔP 被写为

$$\left(\frac{\Delta P}{\rho g}+\frac{\Delta v^2}{2g}+\Delta h\right)+h_{\text{shaft}}=h_{\text{loss}} \tag{3.12}$$

式中 $h_{\text{shaft}}=W_{\text{shaft}}/g$ 为每单位质量的净轴能量液柱头，而且由于摩擦而产生的液柱头损失可以估算为

$$h_{\text{loss}}=W_{\text{loss}}/g=\text{由于摩擦而产生的液柱头损失} \tag{3.13}$$

例 3.6　抽水

从一个液位为零的开口容器中将水抽到液位为 12ft 的开口容器中。当抽水体积流量为 $3\text{ft}^3/\text{s}$ 时，泵为 6hp。请估算能量损失（液柱头）。

解：

数据：$Q=3\text{ft}^3/\text{s}$，$W_{\text{shaft}}=6\text{hp}$

因为 $v_{\text{in}}=v_{\text{out}}=0$，$P_{\text{in}}=P_{\text{out}}=0$，$h_{\text{in}}=0$ 那么，式（3.12）变为 $g=32.2\text{ft}/\text{s}^2$。水的密度 $=62.4\text{lb}/\text{ft}^3$

带有符号的特定换算因子 $g_c=32.174\text{ft lb}_\text{m}/(\text{s}^2\text{lb}_\text{f})$。

$$h_{\text{shaft}}=h_{\text{loss}}+h_{\text{out}}$$

$$h_{\text{shaft}}=\frac{W_{\text{shaft}}}{\rho(g/g_c)Q}=\frac{(6\text{hp})\left(\dfrac{550\text{ft lb}_\text{f}/\text{s}}{\text{hp}}\right)(32.174\text{ft lb}_\text{m}/\text{s}^2\text{lb}_\text{f})}{(62.4\text{lb}_\text{m}/\text{ft}^3)(32.2\text{ft}/\text{s}^2)(3\text{ft}^3/\text{s})}=17.6\text{ft}$$

式中，水的比重为 $62.4\text{lb}_\text{m}/\text{ft}^3$；1hp（英制马力）$=550\text{ft lb}_\text{f}/\text{s}$。

$$h_{\text{loss}}=(17.6-12)\text{ft}=5.6\text{ft}$$

例 3.7　抽水所需功的计算

一个泵从一个 10ft 深的井中抽水，并将其排入一个容器中，该容器高出地平面 2ft。排水流量为 $0.25\text{ft}^3/\text{s}$。请计算泵所需的功率。

解：

假设因管道和泵内的摩擦而产生的热耗散可以忽略不计。

可以计算所需要的功：

$$\dot{W}=\dot{m}g(z_{\text{out}}-z_{\text{in}})$$

式中，g 为标准重力 $g=9.806\text{m}/\text{s}^2=32.2\text{ft}/\text{s}^2$。

带有符号的特定换算因子 $g_c=32.174\text{ft lb}_\text{m}/(\text{s}^2\text{lb}_\text{f})$。

水的密度 $=62.4\text{lb}/\text{ft}^3$。

基于 $\text{lb}_\text{m}/\text{s}$，水的质量流量为

$$\dot{m}=(0.25\text{ft}^3/\text{s})(62.4\text{lb}/\text{ft}^3)=15.6\text{lb}_\text{m}/\text{s}$$

根据换算关系 $1.0\text{kW}=737.56\text{lb}_\text{f}\ \text{ft}/\text{s}$（见表 3.1）

功：$W=\dfrac{(15.6\text{lb}_\text{m}/\text{s})(32.2\text{ft}^2/\text{s})(12\text{ft})}{32.2\text{ft lb}_\text{m}/(\text{s}^2\text{lb}_\text{f})}\left(\dfrac{1.0\text{kW}}{737.56\text{lb}_\text{f}\text{ft}/\text{s}}\right)=0.253\text{kW}=0.340\text{hp}$

3.5　表面能

表面能是在生成一个表面时发生在分子间的力的度量。表面能为材料表面与成块相比多出的能量。液体的表面张力（表面能量密度）被定义为每单位长度的力。水的表面能量密度为 0.072 J/m^2，表面张力为 0.072 N/m。由于表面张力或者表面能，雨滴是球形的。表面能是一种液体的固有性质，而且与液体的表面积直接相关。较大的几何表面积蕴含着较大的表面能，而较低的几何表面积则蕴含着较低的表面能。液体将自身变为球形以降低其总体能量状态，因为球形具有最小的表面积，而且也具有最低的能量状态。球型液体背后的驱动力涉及粘接力，它是液体的分子之间的相互吸引力[8]。

3.6　声能

声能为一个物体的振动产生的能量。声能 E 等于声压 P 乘以粒子速度 v 在表面 A 上的积分，可以表示为积分：

$$E=\int(Pv)\,\text{d}A \tag{3.14}$$

声能通量为声能通过任何特定的面积 A 的平均速率，通常称为声强。因此，声能是机械能的一种形式，而且与声音振动产生的压强有关。由于能够从声音获得的能量值非常小，因此，声能通常不能用于发电或人类的其他能量需要。

超声波是频率大于人类听觉上限的循环声压，近似 20kHz。对于声波来说，赫（Hz）等于声波每秒的循环次数。超声波通常用于穿透某种介质并测量反射信号或提供聚焦的能量。反射信号能够揭示介质内部结构的有关细节。在塑料超声焊接中，高频（15～40kHz）低幅振动用于通过要连接的材料之间的摩擦产生热量。此外，超声测试还用于发现材料中的裂缝，并用于测量物体的厚度[4]。

3.7　机械功

当一个力通过一段距离作用于一个系统之上时，那么，能量就以功的形式被传递。当一个机械力推动一个系统的边界时就产生了机械功。例如，在一个压缩功中，一个活塞代表外界对气体做功（见图 3.2）以致初始边界发生变化，而且气体的最终体积小于气体的初始体积。在一个时间段内，机械所做的净功为

$$W = -\int_{\text{state1}}^{\text{state2}} \boldsymbol{F}\mathrm{d}\boldsymbol{l} \qquad (3.15)$$

式中，$\boldsymbol{F}$ 是一个作用于系统边界的外力矢量；$\boldsymbol{l}$ 为位移或路径矢量。

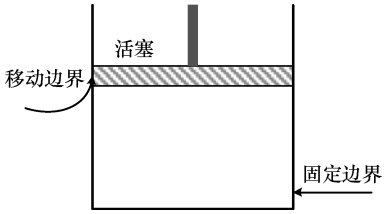


图 3.2　机械功对于一个机械力移动一个系统的边界

下面各节小结了一些常用功的类型：

3.7.1　功率

功率为以时间计的能量交换。例如，瓦（W）是在 1s 时间内产生了 1J 的能量。表 3.1 给出了一些功率的定义以及它们的换算关系。每单位时间做的功称为功率。使用国际单位，功率被定义为 W = J/s = N · m/s = kg · m^2/s^3。在英制单位中，功率为 Btu/s = 778.1ft lb_f/s = 1.415hp；机械 hp = 550ft lb_f/s = 746W = (电工 hp)。

表 3.1　功率换算关系

	hp	kW	ft lb_f/s	Btu/s	J/s
hp	1	0.745	550	0.707	745.7
kW	1.341	1	737.56	0.948	1000
ft lb_f/s	1.818×10^{-3}	1.356×10^{-3}	1	1.285×10^{-3}	1.356
Btu/s	1.415	1.055	778.16	1	1055
J/s	1.341×10^{-3}	1000	0.737	9.478×10^{-3}	1

注：Himmeblau 和 Riggs[3]。

hp 为英制（英国）功率单位。1hp 为速率为 33000lbf ft/min 或 550lbf ft/s 做功的能力。例如，水从给定的高度落下产生的总马力功率为

$$P_{\text{hp}} = \frac{\dot{m}gz}{550} \qquad (3.16)$$

或者根据体积流量，马力功率可以估算为

$$P_{\text{hp}} = \frac{\dot{Q}\rho gz}{550} \qquad (3.17)$$

式中，P_{hp}为马力功率；$\dot{m}$为质量流量（lb/s）；z 为液柱头或高度（ft）；g 为重力加速度（32ft/s^2）；$\dot{Q}$ 为体积流量（ft^3/s）。

制动马力为进入泵的实际马力功率，而不是发动机使用的马力功率。由于泵或水轮机中的液压、机械以及容积损失，可做功的实际马力功率低于所提供的总马力功率。

例 3.8　功率转换

一个 20kW 电动机用于将地下水抽入一个储存容器中。请估算泵做的功，单

位分别为①Btu/h；②hp；③J/s；④ft lb_f/h。

解：

①（20kW）$\left(\frac{0.948\text{Btu/s}}{\text{kW}}\right)\left(\frac{3600\text{s}}{\text{h}}\right)=6.825\times10^4\text{Btu/h}$

②（20kW）$\left(\frac{1.341\text{hp}}{\text{kW}}\right)=26.82\text{hp}$

③（20kW）$\left(\frac{1000\text{J/s}}{\text{kW}}\right)=2\times10^4\text{J/s}$

④（20kW）$\left(\frac{737.5\text{ft lb}_\text{f}\text{/s}}{\text{kW}}\right)\left(\frac{3600\text{s}}{\text{h}}\right)=53.1\times10^6\text{ft lb}_\text{f}\text{/h}$

3.7.2　边界功

最常见的机械功形式为边界功。边界功是一种能量在系统和外界之间相互作用的机制。边界功为在等压条件下总边界通过加入整个等压过程期间从初始状态到最终状态的所有元功（differential work）而得到的功：

$$W=-\int_{\text{state1}}^{\text{state2}}P\text{d}V \tag{3.18}$$

例如，在一个膨胀过程期间，边界功表示从系统向外界传递的能量。因此，对于适用此处的符号规约，膨胀功为负。对于一个压缩过程来说，边界功表示从外界向系统传递的能量，如图3.3所示。因此，根据符号规约，压缩功为正。如果边界在状态1和状态2之间是固定的，将不会对系统做功。例如，如果将一个固定容积的容器内的某种气体加热，而且它的初始温度发生变化，那也不会对该气体做功，因为系统的边界并没有变化。根据式（3.18）计算所得的功可以是任何值，这取决于从状态1到状态2之间的路径。这说明功是一个依赖于路径的函数[1]。

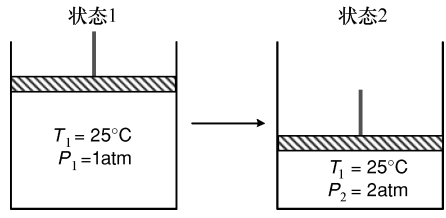


图3.3　一个边界功的例子：在等温条件下压缩

在等压条件下，式（3.18）变为

$$W=-P(V_2-V_1) \tag{3.19}$$

对于理想气体，等温条件下的边界功使用下式表示：$PV=nRT=$常数$=C$ and $P=C=V$。它可以被代入式（3.18），那么该功就可以估算为

$$W=-\int_{\text{state1}}^{\text{state2}}P\text{d}V=-\int_{\text{state1}}^{\text{state2}}\frac{C}{V}\text{d}V=-C\ln\frac{V_2}{V_1}=-P_1V_1\ln\frac{V_2}{V_1} \tag{3.20}$$

上式可以根据下式来修正：$P_1V_1=P_2V_2$ 或 $V_2/V_1=P_1/P_2$。例如，如果一个

活塞-气缸装置包含 0.5m³ 的空气（120kPa 和 100°C），而且该气体在等温条件下被压缩至 0.2m³，那么，所做的功为

$$W = -P_1V_1\ln\frac{V_2}{V_1} = -(120\text{kPa})(0.5\text{m}^3)\ln\left(\frac{0.2}{0.5}\right)\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kPam}^3}\right) = 54.97\text{kJ}$$

由于是外界对系统做功，根据本书所采用的符号规约，该功为正。

将 $PV = nRT$ 和 $P = nRT/V$ 代入式（3.20），在等温条件下的边界功也可以被估算为

$$W = -\int_1^2 P\text{d}V = -\int_1^2\left(\frac{nRT}{V}\right)\text{d}V = -nRT\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = -nRT\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (3.21)$$

例 3.9　理想气体的膨胀功和压缩功

请估算下列情形所做的功：①气体在 120kPa 等压条件下从 1m³ 膨胀为 7m³；②气体压缩，压强从 100kPa 变化为 80kPa 并且体积从 7m³ 变化为 5m³。

解：

假设理想气体做功或吸收功计算方法是求压强与体积变化之积。

数据：

① $P = 120\text{kPa}$，$V_1 = 1\text{m}^3$，$V_2 = 7\text{m}^3$，

$W = -P(V_2 - V_1) = -720\text{kJ}$

注意该功为负，而且是气体对外做功。

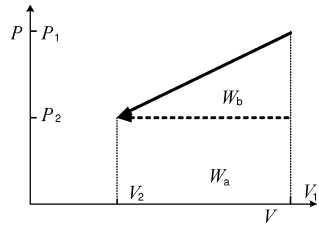
② 当压强与容积同时变化时，计算功 P-V 图之下的两个部分：一个矩形和一个三角形：

$P_1 = 100\text{kPa}$，$P_2 = 80\text{kPa}$，$V_1 = 7\text{m}^3$，$V_2 = 5\text{m}^3$

矩形区域的“面积”为 $W_a = -P_2(V_2 - V_1) = 160\text{kJ}$

三角形区域的“面积”为 $W_b = (1/2)(P_1 - P_2)(V_2 - V_1) = 20\text{kJ}$

对气体所做的总功 = (160 + 20) kJ = 180kJ



例 3.10　等温条件下的压缩功

当 $V_1 = 0.5\text{m}^3$ 的二氧化碳在 $T_1 = 27°\text{C}$的等温条件下从 $P_1 = 110\text{kPa}$ 被压缩至 $P_2 = 750\text{kPa}$，请估算其边界功。

解：

假设二氧化碳为理想气体。

数据：$V_1 = 0.5\text{m}^3$，$P_1 = 110\text{kPa}$，$T_1 = 27\,^\circ\text{C}$，$P_2 = 750\text{kPa}$

在等温条件下系统：$\Delta H = \Delta U = 0$

理想气体：$PV = nRT$ 和 $P = \dfrac{nRT}{V}$

$$W = -\int_1^2 P\mathrm{d}V = -\int_1^2 \left(\frac{nRT}{V}\right)\mathrm{d}V = -P_1V_1\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$W = -P_1V_1\ln\frac{V_2}{V_1} = -P_1V_1\ln\frac{P_1}{P_2} = -(110\text{kPa})(0.5\text{m}^3)\ln\left(\frac{110}{750}\right)\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kPam}^3}\right)$$

$$= 105.6\text{kJ}$$

正号表明对系统做功。

3.7.3　等熵过程功

等熵过程功发生在等熵条件下：$S_1 = S_2$。对于 C_v 和 C_p 为常数的等熵过程的理想气体，可以得到下面关系：

$$S_2 - S_1 = C_p\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = 0 \tag{3.22}$$

使用由理想气体方程得到如下关系：

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2V_2}{P_1V_1}\text{和}\ C_p - C_v = R\ \text{或}\ R/C_p = (\gamma - 1)/\gamma \tag{3.23}$$

根据式（3.22）可得

$$P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma\text{和}\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \tag{3.24}$$

式中，γ 为比率热容量（$\gamma = C_p/C_v$）。

对于理想气体，热容量取决于温度。使用各种不同单位的 R 值为

$R = 10.73\text{psia ft}^3/\text{lbmol °R} = 0.7302\text{atm ft}^3/\text{lbmol °R} = 83.14\text{bar cm}^3/\text{gmol K}$

$R = 1.987\text{cal/gmol K} = 1.986\text{Btu/lbmol °R}$

$R = 8.314\text{J/gmol K} = 8.314\text{Pa m}^3/\text{gmol K} = 8314\text{kPa cm}^3/\text{gmol K}$

$R = 0.082\text{atm l/gmol K} = 82.06\text{atm cm}^3/\text{gmol K}$

对于等熵过程（可逆，绝热），热传递为零，而且使用理想气体的关系，功可以估算为

$$W_s = \dot{m}C_v(T_2 - T_1) = \dot{m}(U_2 - U_1) \tag{3.25}$$

例 3.11　空气的等熵压缩

一个容器内充满压强为 1bar、温度为 20°C的空气，被绝热（等熵）压缩至 4bar。请估算该压缩功（单位：kJ/mol）。空气的定热容为 $C_{v,av}=20.8\text{J/mol K}$，$C_{p,av}=29.1\text{J/mol K}$。

解：

假设气体为理想气体。

计算基础：1mol 理想气体。

数据：

$T_1=20°\text{C}(293\text{K})$；$P_1=1\text{bar}$；$P_2=4\text{bar}$；$R=8.314\text{J/mol K}$

$C_{v,av}=20.8\text{J/mol K}$，$C_{p,av}=29.1\text{J/mol K}$，$\gamma=C_{p,av}/C_{v,av}=1.4$

$$T_2=T_1\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}=435\text{K}$$

对于绝热膨胀：

$$W=C_{v,av}(T_2-T_1)=2953.9\text{J/mol}$$

正号表示对空气做功。

3.7.4　多变过程功

在多变过程功中，压强与体积关系为

$$P_1V_1^{\gamma}=P_2V_2^{\gamma}=C \tag{3.26}$$

而且压强可以表示为

$$P=CV^{-\gamma} \tag{3.27}$$

式中，γ 与 C 为常数。

通过使用式（3.18）中新得到的压强，可以求得多变功[1]：

$$W=-\int_{\text{state1}}^{\text{state2}}P\text{d}V=-\int_{\text{state1}}^{\text{state2}}CV^{-7}\text{d}V=-C\frac{V_2^{-\gamma+1}-V_1^{-\gamma+1}}{1-\gamma}=-\frac{P_2V_2-P_1V_1}{1-\gamma} \tag{3.28}$$

例 3.12　活塞对理想气体做功的计算

一个活塞对理想气体做压缩功。理想气体初始状态为 400K 和 300kPa。气体的体积被从 0.1m^3 压缩至 0.3m^3。请计算通过两种不同的路径活塞对气体所做的功。

路径 A：在等压条件下压缩，$P=300\text{kPa}$。

路径 B：在等温条件下压缩，$T=400\text{K}$。

解：

假设活塞是不计摩擦的，而且是理想压缩（变化非常缓慢），理想气体为系统。

计算基础：理想气体。

根据理想气体定律：$PV = nRT$，其中 $R = 8.314\text{kPa m}^3/\text{kmol K}$

气体摩尔数：$n = PV/(RT) = (300\text{kPa})(0.3\text{m}^3)/$

$[(8.314\text{kPa m}^3/\text{kmol K})(400\text{K})] = 0.027\text{kmol}$。

路径 A：在 $P = 300\text{kPa}$ 时等压压缩：

$(V_2 - V_1) = (0.1 - 0.3)\text{m}^3 = -0.2\text{m}^3$

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} P\mathrm{d}V = -P(V_2 - V_1) = -300 \times 10^3\text{Pa}\,\frac{\text{N}}{\text{m}^2\text{Pa}}(-0.2\text{m}^3)\,\frac{\text{J}}{\text{Nm}} = 60\text{kJ}$$

路径 B：在 $T = 400\text{K}$ 时等温压缩：

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} P\mathrm{d}V = -\int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V}\mathrm{d}V = -nRT\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$= -(0.027\text{kmol})\left(\frac{8.314\text{kJ}}{\text{kmol K}}\right)(400\text{K})\ln\left(\frac{0.1\text{m}^3}{0.3\text{m}^3}\right)$$

$$= 98.65\text{kJ}$$

由于功是一个依赖于路径的变量，因此，不同的路径所做的功各不相同。

例 3.13　空气的多变膨胀

一个气缸中的空气为 110kPa，而且从 0.01m^3 多变膨胀到 0.05m^3。多变过程中压强体积关系（PV^γ = 常数）的指数 $\gamma = 1.3$。请估算在该过程中所做的功。

解：

假设气体为理想气体。$PV = RT$（对于 1mol 气体）。

数据：

$V_1 = 0.01\text{m}^3$，$V_2 = 0.05\text{m}^3$，$P_1 = 110\text{kPa}$，$\gamma = 1.3$

$P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma = C =$ 常数

$$P_2 = P_1\frac{V_1^\gamma}{V_2^\gamma} = (110\text{kPa})\left(\frac{0.01}{0.05}\right)^{1.3} = 13.6\text{kPa}$$

$$W_b = \int_1^2 CV^{-\gamma}\mathrm{d}V = \frac{R\Delta T}{\gamma - 1} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{\gamma - 1}\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kPa m}^3}\right) = -1.4\text{kJ}$$

负号表明对外界做功。

3.7.5　轴功

轴功为通过旋转轴传输的能量，而且与施加给该轴的转矩 $\boldsymbol{T}$ 以及每单位时间轴转数有关。当有外力作用在轴上克服机械阻力驱动轴转动时，便产生轴功。通过泵将液体传输一段距离所做的轴功为正。另一方面，如果系统中的流体驱动轴转动对外界做功，则轴功为负[5]。

力 F 通过力臂 r 作用产生转矩 $\boldsymbol{T}$。

$$T = Fr \text{ 和 } F = \frac{\boldsymbol{T}}{r} \tag{3.29}$$

该力作用距离为 $2\pi rN$，其中 N 为转数。在 N 转期间所做的功为

$$W_s = F(2\pi rN) = \frac{\boldsymbol{T}}{r}2\pi rN = 2\pi N\boldsymbol{T} \tag{3.30}$$

旋转轴能够传输功率。通过轴传输的功率为

$$\dot{W}_s = 2\pi \dot{N}\boldsymbol{T} \tag{3.31}$$

式中，$\dot{N}$ 为每单位时间的转数。

例 3.14　轴功的估算

当一辆小汽车的轴上施加的转矩为 100Nm 时，请估算通过该轴传输的功率。轴的转速为 2000r/min。

解：

$\dot{N} = 2000/\text{min}$，$\boldsymbol{T} = 100\text{Nm}$

$$\dot{W}_s = 2\pi \dot{N}\boldsymbol{T} = 2\pi\left(2000\ \frac{1}{\text{min}}\right)\left(\frac{\text{min}}{60\text{s}}\right)(100\text{Nm})\left(\frac{\text{kJ}}{1000\text{Nm}}\right) = 20.9\text{kW} = 28.1\text{hp}$$

3.7.6　弹簧功

当力施加在弹簧上，其长度会发生变化。如果在施加力后长度变化为 $\text{d}x$，那么所做的功为

$$\delta W_{sp} = F\text{d}x \tag{3.32}$$

对于线性弹性弹簧，长度的变化与施加的力成正比：$F = kx$，其中 k 为弹性系数（单位为 kN/m）。因此，如果初始长度为 x_1，最终长度为 x_2，所做的功则为

$$W_{sp} = \frac{1}{2}k(x_2^2 - x_1^2)(\text{kJ}) \tag{3.33}$$

例 3.15　弹簧功的估算

一个活塞-气缸系统附带一个弹性系数为 110KN/m 的弹簧。在状态 1 时该弹簧无位移。在状态 2 时，活塞-气缸系统受到了压缩做功，而且由于活塞下面的体积减小了，弹簧的长度变化了 0.12m。请估算该弹簧功。

解：

$$k = 110\text{kN/m},\quad x_1 = 0,\quad x_2 = 0.12\text{m}$$

$$W_{sp} = \frac{1}{2}k(x_2^2 - x_1^2) = 792\text{J} = 0.792\text{kJ}$$

3.8 电能

电力来源于产生电动力的电荷。例如，当点亮一盏电灯泡时，电荷从墙壁插座流经灯泡并将灯泡的灯丝加热发光。引力和电磁力是两种基本力，这两种力都是通过空间作用的。质量会引起引力，而且两个质体总是相互吸引。一些粒子带有一个电荷而且可以受电磁力所约束。电荷可以为正，也可以为负，而且两个正电荷或两个负电荷将相互排斥，而正电荷与负电荷则会相互吸引。电荷的测量单位是库（C），它以第一个给出电荷力定律公式的科学家夏尔·奥古斯丹·库仑（Charles Augustin Coulomb）命名。法拉（F）为库仑的电荷数。库仑定律可以表示为

$$F = k_e \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \tag{3.34}$$

式中，k_e 为库仑常数，而且 $k_e = 1/(4\pi\varepsilon_0) = 8.987 \times 10^9 \mathrm{Nm^2/C^2}$，$\varepsilon_0$ 为电常数，而且在国际单位制中，$\varepsilon_0 \approx 8.885419 \times 10^{-12}\mathrm{F/m}$。

两个电荷 Q_1 和 Q_2 之间的作用力与两个电荷之积成正比，并与它们的距离 r（单位：m）的二次方成反比。电荷库（C）为1A电流在1s内运输的电量（C=As）。1F为96485C。力为正意味着它是排斥力，而力为负则意味着它是吸引力。电荷大小是离散的。电子与质子的电荷量级为 1.6×10^{-19} C，电子为负，而质子则为正。一个电子的电荷是自然界的基本常数。一个电子和一个质子的两个电荷相互抵消，不会出现净电荷[2]。

当电荷在导线内流动时就称为电流（I），它的测量单位是C/s，称为安（A）。例如，如果电流为4A、时间间隔为15s，总电荷为（电流）(时间)=(4A)(15s)=60C。电流也可以通过离子溶液和地面流动。电流可以通过一个称为电流表的仪表来测量。

3.8.1 电势能

电势能为库仑力的功。分子间力的功称为分子间势能。电势能主要有两种类型：静电势与电动势（或磁势能）。静电势为一个带电粒子在电场中的能量。它被定义为在没有任何非电力作用的情况下，将带电粒子从无限远的距离移动到当前位置必须做的功[2]。考虑带有电荷 Q_1 和 Q_2 两个点（比如物体 A_1 和 A_2）。将 A_1 从无限远的距离移动到距离 A_2 为 r 时所需要的功 W 可以表示为

$$W = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r} \tag{3.35}$$

被称为电压的电势能等于每单位电荷的电势。电压是电流背后的驱动力。当带电粒子运动时，它们会产生磁势能。这种势能是具有势能的磁力移动其他类似

的物体的结果。磁体被认为具有磁矩。

图 3.4 所示为一个带有一个电池和两个其他元件的简单电路。电池将以特定电压为一个应用电负载提供电荷。当电荷流过负载时，它将势能作用在负载上。如果负载是一个发动机，该能量就可以被转化成机械能。如果负载是一个灯泡，能量则会被转化成光能和热能。

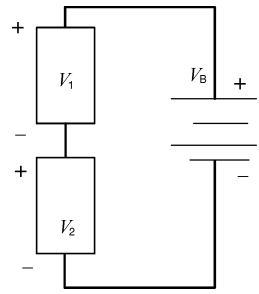


图 3.4　电路：V_B 表示电池两端的电压

其中，V_B 表示电池两端的电压。考虑图 3.4 中的电路，加到一个电荷 Q 上的能量如下：

- 当电荷从电池的底部移动到电池的顶部时，电荷获得的能量值为 QV_B。
- 当一个电荷 Q 从元件 1 的顶部移动到元件 1 的底部时，电荷失去的能量值为 QV_1。
- 当一个电荷 Q 从元件 2 的顶部移动到元件 2 的底部时，电荷失去的能量值为 QV_2。

像机械势能一样，电势能和电压也要通过一个参考基准来测量（通常选大地）。这意味着参考基准为地球或大地自身。电压值为 120V 意味着该点与地面之间的电压差为 120V。测量电路的电压差要使用电压表。

3.8.2　电能的估算

图 3.5 所示为一个带有电阻 R 的电路，它决定了将有多少电流流过一个元件。电阻控制着电压与电流的水平。电阻值高允许小电流流动；电阻值低允许大电流流动。电阻的测量单位为欧姆（Ω）。1Ω 为使用 1V 电压维持 1A 电流所通过电阻的阻值。在一个电阻中，电压与电流的相互关系可以通过欧姆定律来表示：

$$I = V/R \text{ 或 } V_r = RI_r \qquad (3.36)$$

欧姆定律定义了电压 V、电流 I 以及电阻 R 之间的关系。如果 V 和 I 在时间 t 内保持恒定，那么电能则为

$$W_e = VIt \qquad (3.37)$$

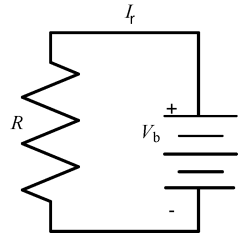


图 3.5　电路图；电池电压为 V_b，通过电阻 R 的电流为 I_r

3.8.3　电功率

电功率 P 为通过一个电路传递电能的速度：

$$P = VI \qquad (3.38)$$

式中，P 为电功率；V 为电势差；I 为电流。

在国际单位制中，电功率的测量单位为 W。流入电池的功率为负，而流出电池的功率为正。被传递给电阻的功率为电阻两端的电压与通过电阻的电流之积：VI_r。

在负载为电阻的情况下（见图 3.5），使用欧姆定律，耗散功率可以使用下式来代替：

$$P = I^2R = V^2/R \tag{3.39}$$

式中，R 为电阻。

电功发生在电流通过电路中的电阻时。电功的速率形式与功率相同：

$$\dot{W}_e = VI = I^2R \tag{3.40}$$

3.8.4　电容

一个电容储存电荷的能力称为电容，它的测量单位为法拉（F）。当 1C 电荷在电容器两个平行板之间产生的电势差为 1V 时，其电容就是 1F（F = C/V）[6]。

在交流电路中，能量储存元件（比如电感和电容）可以导致能量流动方向的周期性逆转。导致能量单向净传递的功率流部分（平均分布在一个完整循环的交流波形上）称为实际功率或有功功率有功功率或有功功率。储存的能量而在每个周期中返回到电源的那部分功率称为无功功率，如图 3.6 所示。

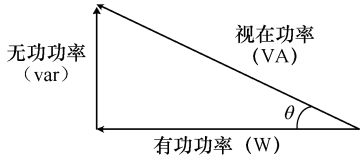


图 3.6　交流电源的功率三角形及其组成

有功功率、无功功率与视在功率之间的关系可以用矢量的形式。有功功率可以表示为一个水平矢量，而无功功率则可以表示为一个垂直矢量。视在功率矢量为连接有功功率矢量与无功功率矢量所形成的正三角形的斜边。这种表示经常被称为功率三角形。使用勾股定理，有功功率、无功功率以及视在功率之间的关系为

$$(\text{视在功率})^2 = (\text{有功功率})^2 + (\text{无功功率})^2 \tag{3.41}$$

当电流和电压均为正弦曲线，而且两者之间的相位角已知时，有功功率和无功功率也可以直接通过视在功率来计算：

$$(\text{有功功率}) = (\text{视在功率})\cos(\theta) \tag{3.42}$$

$$(\text{无功功率}) = (\text{视在功率})\sin(\theta) \tag{3.43}$$

有功功率与视在功率之比称为功率因数，而且其值总处于 0 ~ 1。当电流和电压为非正弦形式时，则需要考虑畸变的影响来合成功率因数。

例 3.16　电功的估算

一个电阻加热器装在一个隔热良好的容器中之内，用于加热 12kg 水。来自

120V 电源的 0.6A 的电流流过加热器，加热 4h。请估算加热 4h 之后使用的电能。

解：

$$V = 120\text{V}, I = 0.6\text{A}, t = 4\text{h}$$

水接收的电能为

$$W_e = VIt = 120\text{V}(0.6\text{A})(4\text{h})(3600\text{s/h})\left(\frac{\text{kJ/s}}{1000\text{VA}}\right) = 1036.8\text{kJ}$$

3.9　其他形式的功

非机械形式的功可以使用广义力 F 与广义位移 x 通过下式来表示：

$$W_{\text{other}} = Fx \tag{3.44}$$

- 磁功：（磁场强度）（总磁偶极矩）。
- 电极化功：（电场强度）（介质的极化）。

介质的极化为分子的旋转电偶极矩之和。表 3.2 中小结了一些常用的功及其计算公式。

表 3.2　一些常用的做功公式

边　界　功	方　　程
通用	$W = -\int_{\text{state1}}^{\text{state2}} P\text{d}V$
等压功 P = 常数	$W = -P(V_2 - V_1)$
等温功 T = 常数	$W = -P_1V_1\ln\frac{V_2}{V_1}$
等熵功 S = 常数	
理想气体	$W_s = \dot{m}C_r(T_2 - T_1) = \dot{m}(U_2 - U_1)$
多变功	
PV^γ = 常数	$W = -\frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-\gamma}$
轴功	$W_s = 2\pi NT$
弹簧功	$W_{sp} = \frac{1}{2}k(x_2^2 - x_1^2)$
电功	$W_e = VIt$
非机械形式的功	$W_{\text{other}} = Fx$

习　　题

3.1　请确定动能和势能的国际单位和英制单位。

3.2　一个 1lb_m 的玻璃杯开始处于静止状态，随后跌落到一个固体表面之上：

①动能是如何变化的？②势能变化的符号是什么？③功是什么？

3.3 使用一个 50hp 的电动机将地下水抽入储存容器之中。请估算泵做的功（单位分别使用 Btu/h、kW 与 J/s）。

3.4 一个水泵抽水过程消耗 200hp。请估算泵做的功（单位分别使用 Btu/h 和 kW）。

3.5 使用一个 25hp 的电动机将地下水抽入储存容器之中。请估算泵做的功（单位分别使用 Btu/h、MW 与 J/s）。

3.6 使用一个 85hp 的电动机将地下水抽入储存容器之中。请估算泵做的功（单位分别使用 Btu/h、kW 与 kcal/s）。

3.7 使用一个 40kW 的电动机将地下水抽入储存容器之中。请估算泵做的功（单位分别使用 Btu/h、hp、J/s 与 ft lbf/h）。

3.8 一辆质量为 1500kg 的小汽车，初始行驶速度为 80Km/h。它均匀减速并在 90m 处停止。①当它停止时，小汽车在这 90m 行程上的动能变化是多少？②当它停止时，作用在小汽车的净力是多少？

3.9 一辆重 5000lb 的卡车的行驶速度为 55mile/h，突然制动令完全小汽车停止。请估算通过制动传递的能量。

3.10 一辆质量为 1000kg 小汽车开始处于静止状态。在 50m 的距离上对小汽车施加一个 1000N 的净恒力，令小汽车加速。①请估算小汽车在这 50m 行程上的所做的总功，②请估算小汽车在 50m 之后的速度。

3.11 计算一辆质量为 1500kg、速度为 30m/s 的小汽车的动能（KE）。如果它是在 20s 之内加速到这个速度，它使用的平均功率是多少？

3.12 使用 60.0N 的力将一个质量为 200kg 的负载推动 20.0m 的水平距离。对于无摩擦表面，①请估算当做功完成时负载的动能，②请估算负载的速度。

3.13 估算在水平道路上在 10s 之内将一辆 1400kg 的小汽车从静止加速到 60Km/h 所需的功率。

3.14 估算在水平道路上在 5s 之内将一辆 2000kg 的小汽车从静止加速到 70Km/h 所需的功率。

3.15 一辆小汽车的质量为 1300kg，行驶速度为 55mile/h。请估算：①小汽车的动能（kJ），②让小汽车停止所需的功。

3.16 一辆小汽车的质量为 1450kg，行驶速度为 65mile/h。请估算：①小汽车的动能（kWh），②让小汽车停止所需的功。

3.17 一辆小汽车的质量为 1800kg，行驶速度为 40mile/h。请估算：①小汽车的动能（Btu），②让小汽车停止所需的功。

3.18 一辆小汽车的质量为 2250kg，行驶速度为 65mile/h。请估算①小汽车的动能（kJ），②让小汽车停止所需的功。

3.19 一辆小汽车的质量为 2700lb，行驶速度为 60mile/h。请估算①小汽车的动能（单位为：Btu），②让小汽车停止所需的功。

3.20 一辆小汽车的质量为 3000lb，行驶速度为 50mile/h。请估算：①小汽车的动能（kJ），②让小汽车停止所需的功。

3.21　一辆小汽车的质量为 4200 lb，行驶速度为 70mile/h。请估算：①小汽车的动能（ft lbf），②让小汽车停止所需的功。

3.22　一个盒子的质量为 6kg。将这个盒子从车库地面提升并放置在一个架子上。如果盒子获得了 200J 的势能，请估算架子的高度。

3.23　某人爬到了 3.4m 高的墙上，并获得了 2400J 的势能。请估算这个人的质量。

3.24　一个 1kg 的球从峭壁的顶部跌落，由于重力作用，它以恒定加速度（9.8m/s^2）下落。假设空气阻力的影响可以忽略不计。①请估算球的重力势能变化，②对球已经做了多少功？

3.25　估算比发电水轮机高 50m 的湖泊表面 1000kg 水的势能。

3.27㊀　考虑一个 1200kg 的小汽车，行驶速度为 25Km/h。如果小汽车必须从水平道路爬上一个 30°斜坡的小山，请估算小汽车如果要保持相同的速度所需的额外功率。

3.28　估算比发电水轮机高 50m 的湖泊表面 10kg 水的势能。

3.29　估算比发电水轮机高 200ft 的湖泊表面 350lb 水的势能。

3.30　水从 80m 高的瀑布流下。假设将 1kg 的水视作一个系统。同时假设该系统并不与外界交换能量。①这些水在瀑布顶部相对于瀑布底部的势能是多少？②水在撞击底部之前它的动能是多少？

3.31　估算比发电水轮机高 100ft 的湖泊表面 1000lb 水的势能。

3.32　一部质量为 3000kg 的电梯停在电梯井底基之上 3m 高处。电梯运行至电梯井底基之上 30m 高处。电梯从这个高度自由地落到底基上，并撞击一个强力弹簧。假设整个过程不计摩擦。请估算：

① 电梯在相对于电梯井底基的原始位置的势能。

② 运行电梯所做的功。

③ 电梯在相对于电梯井底基的最高位置的势能。

④ 电梯在它撞击弹簧之前的速度与动能。

3.33　一部质量为 2000kg 的电梯停在电梯井底基之上 2m 高处。电梯运行至电梯井底基之上 20m 高处。电梯从这个高度自由地落到底基上，并撞击一个强力弹簧。假设整个过程不计摩擦。请估算：

① 电梯在相对于电梯井底基的原始位置的势能。

② 运行电梯所做的功。

③ 电梯在相对于电梯井底基的最高位置的势能。

④ 电梯在它撞击弹簧之前的速度与动能。

3.34　一部质量为 4000lb 的电梯停在电梯井底基之上 5ft 高处。电梯运行至电梯井底基之上 100ft 高处。电梯从这个高度自由地落到底基上，并撞击一个强力弹簧。假设整个过程不计摩擦。请估算：

① 电梯在相对于电梯井底基的原始位置的势能。

② 运行电梯所做的功。

㊀　原书无习题 3.26。——译者注

③ 电梯在相对于电梯井底基的最高位置的势能。

④ 电梯在它撞击弹簧之前的速度与动能。

3.35 一部质量为5000lb的电梯停在电梯井底基之上10ft高处。电梯运行至电梯井底基之上150ft高处。电梯从这个高度自由地落到底基上，并撞击一个强力弹簧。假设整个过程不计摩擦。请估算：

① 电梯在相对于电梯井底基的原始位置的势能。

② 运行电梯所做的功。

③ 电梯在相对于电梯井底基的最高位置的势能。

④ 电梯在它撞击弹簧之前的速度与动能。

3.36 将水从处于0位的开口容器抽到14ft高的开口容器中，当抽水体积流量为3.6ft^3/s时需要消耗7.5hp的功率。请估算损失的能量（水头）。

3.37 将水从处于0位的开口容器抽到24ft高的开口容器中，当抽水体积流量为5ft^3/s时需要消耗16hp的功率。请估算损失的能量（水头）。

3.38 估算压差为12psi（lbf/in^2）的水头当量（ft）与汞柱当量（ft）。

3.39 估算压差为20psi（lbf/in^2）的水头当量（ft）与汞柱当量（ft）。

3.40 一种气体在某个过程期间被压缩，获得的与压强与容积有关的记录数据如下，请估算在这个过程中所做的压缩功：

P/kPa	100	200	300	400	500
V/L	1.1	0.8	0.55	0.4	0.3

3.41 饱和蒸汽在一个气缸之内膨胀。蒸汽初始状态为151.8°C与500kPa，最终压强为200kPa。请确定蒸汽产生的功。

P/kPa	500	450	400	350	300	250	200
V/cm^3	374	413	462	524	605	718	885

3.42 计算以下过程的功：①一种气体在120kPa等压条件下从1m^{3}膨胀到8m^3，②一种气体被压缩，压强从140kPa变化为80kPa，体积从7m^{3}变化到2m^3。

3.43 $V_1 = 1.5\text{m}^3$的二氧化碳（$P_1 = 110\text{kPa}$，$T_1 = 27°\text{C}$），在等温条件下被压缩到$P_2 = 750\text{kPa}$。请计算边界功。

3.44 一个容器充满了200°C、100kPa的理想气体，在等温条件下被压缩到500kPa。请估算压缩功（kJ/mol）。

3.45 空气在100°C等温条件下从100kPa压缩到200kPa。请计算压缩4kg空气所做的净功。

3.46 一个容器充满了6bar、20°C的空气，在等温条件下膨胀到2bar。请估算膨胀功（kJ/mol）。

3.47 一个容器充满了2bar、20°C的10mol空气，在绝热（等熵）条件下被压缩到8bar。请估算压缩功（kJ/mol）。空气的定热容为$C_{v,av} = 20.8\text{J/mol K}$，$C_{p,av} = 29.1\text{J/mol K}$。

3.48　一个活塞-气缸装置包含 2kg 蒸汽在 2MPa 和 450°C下。①如果蒸汽被冷却至 225°C 在等压条件下，请估算系统完成的压缩功，②如果气缸的容积在最终状态下为饱和蒸汽，请估算功和最终状态的温度。

3.49　饱和氨蒸汽进入压缩机时为 -10°C，排出时为 76.2°C。如果过程是绝热和可逆的，请给出每 0.4kg 氨需要的压缩机功。定热容量为 $C_{p,av}=2.64\text{kJ/kg K}$。

3.50　一个气缸中的空气为 110kPa，并从 0.02m^3 多变膨胀到 0.1m^3。多变过程的压强容积关系（$PV^{\gamma}=$常数）中的指数 $\gamma=1.3$。请估算在该过程中所做的功。

3.51　一个气缸中的 1kg 空气为 100kPa 和 30°C。在多变压缩之后空气的温度达到 62°C。多变过程的压强容积关系（$PV^{\gamma}=$常数）中的指数 $\gamma=1.25$。请估算在该过程中所做的功。

3.52　1.0m^3 的空气在 25°C时被等温压缩至最终体积 0.8m^3。请计算边界功。

3.53　60ft^3、80psia 的氮气在 150°F时被等温膨胀到 40psia。请计算边界功。

3.54　500ft^3、30psia 的氢气在 150°F时被等温压缩到 150psia。请计算边界功。

3.55　一个活塞-气缸系统中的 45psia、500°F的过热蒸汽被等压冷却直到它 80% 冷凝。请计算每磅蒸汽的边界功。

3.56　150ft^3、20psia、100°F的二氧化碳被等温压缩到 70psia。请计算边界功。

3.57　一个活塞-气缸装置含有 10kg、350kPa 的饱和蒸汽。该蒸汽被等压加热至 150°C。请估算蒸汽所做的功。

3.58　一个活塞-气缸系统中的 200°C、800kPa 的过热蒸汽被等压冷却到它 70% 冷凝。请计算每 kg 蒸汽的边界功。

3.59　一个活塞-气缸装置含有 0.5kg、1000kPa、400K 的空气。该空气等温膨胀到 300kPa。请估算这种膨胀过程的边界功。

3.60　一个活塞-气缸装置含有 10lb、20psia、500°R的空气。该空气多变压缩到 100psia。请估算压缩过程的边界功。

3.61　一个活塞-气缸装置含有 10lb、100psia、500°R的空气。空气等温膨胀到 20psia。请估算膨胀过程的边界功。

3.62　一个活塞-气缸装置含有 0.5kg、1MPa、400°C的蒸汽。①如果蒸汽被等压冷却至 250°C，请估算系统完成的压缩功，②如果气缸最终状态的容积为初始容积的 50%，最终状态的压强为 0.5MPa，请估算功和最终状态的温度。

3.63　一个活塞-气缸装置的容积为 0.5m^3，而且含有 140kPa、100°C的二氧化碳（CO_2）。最终状态的压强为 90kPa。请估算等熵膨胀功与最终状态的温度值。

3.64　一个活塞-气缸装置的容积为 0.5m^3，而且含有 140kPa、400K 的二氧化碳（CO_2）。最终状态的压强为 90kPa。请估算等熵膨胀功与最终状态的温度值。

3.65　一个活塞-气缸装置的容积为 1.5m^3，而且含有 100kPa、300K 的二氧化碳（CO_2）。最终状态的压强为 200kPa。请估算等熵压缩功与最终状态的温度值。

3.66　一辆小汽车的转矩为 400Nm。这种转矩通过转速为 3000r/min 的轴来传输。请估算通过轴传输的功率。

3.67　一辆小汽车的转矩为 500Nm。这种转矩通过转速为 3200r/min 的轴来传输。请估算通过轴传输的功率。

3.68 一辆180hp小汽车的转速为2600r/min。请估算产生了这种转速的转矩。

3.69 一辆210hp小汽车的转速为3000r/min。请估算产生了这种转速的转矩。

3.70 请确定SI系统的单位①电功率，②电荷，③电势差，④电阻。

3.71 一个2kW电阻加热器用于在淋浴器水箱。如果每天使用淋浴器0.5h，请估算每月的电力成本。单位电力成本为0.10美元/kWh。

3.72 一个5kW的电阻加热器用于房间内的地板供热系统。如果每天平均使用供热系统8h，请估算每年的电力成本。单位电力成本为0.10美元/kWh。

3.73 一个120W的笔记本电脑平均每天使用12h。请估算每年的电力成本。单位电力成本为0.15美元/kWh。

3.74 一个电阻加热器用于一个隔热的水箱之内。电源为120V，通过加热器的电流为1.2A。请估算加热4h所消耗的电能。

3.75 一个电阻加热器用在一个房间之内。电源为120V，通过加热器的电流为0.2A。请估算加热30min所消耗的电能。

3.76 电源为120V，通过一个电阻加热器的电流为0.4A。请估算该加热器使用10h所消耗的电能。

参考文献

1. Çengel YA, Boles MA (2002) Thermodynamics. An engineering approach, 4th edn. McGraw-Hill, NewYork
2. David H, Robert R, Jearl W (1997) Electric potential. Fundamentals of physics, 5th edn. Wiley, New York
3. Himmeblau DM, Riggs JB (2004) Basic principles and calculations in chemical engineering, 7th edn. Prentice Hall, Upper Saddle River
4. Kundu T (2004) Ultrasonic nondestructive evaluation: engineering and biological material characterization. CRC Press, Boca Raton
5. Moran MJ, Shapiro HN (2000) Fundamentals of engineering thermodynamics, 4th edn. Wiley, New York
6. Schroder DK (2006) Semiconductor material and device characterization, 3rd edn. Wiley, New York
7. Smith JM, Van Ness HC, Abbott MM (2005) Introduction to chemical engineering thermodynamics, 7th edn. McGraw-Hill, New York
8. Tugrul AB (1997) Capillarity effect analysis for alternative liquid penetrant chemicals. Elsevier, Oxford

第 4 章　内 能 与 焓

4.1　内能

一个带有明确定义边界的系统或物体的内能是由于分子运动（平移、旋转与振动）所具有的动能与分子内原子的振动运动和电能有关的势能的总和。内能还包括所有的化学键中的能量。从微观的角度来看，内能可以具有多种不同的形式。对于一种气体来说，它几乎可以包括所有的分子动能和这些分子在一个引力场、电场或者磁场内的势能。对于任何材料来说，无论是固态、液态还是气态，它还可以包括在单独的分子之间吸引或排斥的势能。

内能是一个系统的状态函数，而且是一个广延量。一个系统能够具有一个相应的狭义热力学性质：比内能，通常以 u 来表示，这是所说物质单位质量的内能。因此，在国际单位制中，比内能的单位是 J/g。如果在物质“量”的基础上来表示狭义内能，那么，它可以是指摩尔内能，单位是 J/mol。表 4.1 为一个系统内能的不同成分，而表 4.2 为内能的变化。非机械功（比如外部电场，或者通过搅动加入能量）能够改变内能。

表 4.1　内能的组成

热能	显热	一个系统的能量变化与如下有关： 1）分子转化、旋转、振动 2）电子转化与旋转 3）分子的核旋转
	潜热	相变所需或释放的能量；从液态到汽态的相变需要汽化热
化学能	与分子的化学键有关的能量	
核能	与原子的原子核内连接键有关的大量能量	

表 4.2　能够改变系统内能的物理和化学过程

穿过系统边界传递能量的方式	热传递	能量从高温态传递到低温态
	功传递	能量传递由系统的宏观物理性质变化而驱动，比如压缩做功或膨胀做功
	质量传递	能量由穿过系统边界流动的质量来传递
通过内部过程的改变	混合	热量释放给可能会导致内能降低的混合成分
	化学反应	在改变化学能的化学反应期间所需要的或释放的热量
	核反应	在改变核能的核反应期间释放的热量

对于一个闭口系统来说，内能的基本定义为

$$\Delta U = q + W \tag{4.1}$$

式中，ΔU 为一个系统在一个过程期间的内能变化；q 为热能；W 为机械功。

如果由于系统和外界之间温差而产生能量交换，这种能量就表现为热能形式，否则它表现为功的形式。当一个力通过一个距离作用于一个系统，那么，能量就被以功的形式传递。式（4.1）表示能量是守恒的。根据这里采用的符号规约，当向系统传递能量时，热值为正；当能量被从系统传递到外界时，热值为负。类似的，当向系统传递能量时，功为正；当能量被从系统传递到外界时，功为负。式（4.1）的微分方式可以表示为

$$\mathrm{d}U = \delta q + \delta W \tag{4.2}$$

其中，内能函数之前的运算符 d 表明它是状态函数的精确微分。另一方面，其他项之前的 δ 描述了以下能量的增量：这些能量不是状态函数，但都是取决于系统的初始状态和最终状态之间路径的热和功。

考虑温度和容积，内能变化为

$$\mathrm{d}U = C_{\mathrm{v}}\mathrm{d}T + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \mathrm{d}V \tag{4.3}$$

式中，C_{v} 为等容条件下的热容量。

C_{v} 的值为在等容过程中 1g 物质温度提高 1°C所需要的热量。C_{v} 是一个依赖于温度的物理量。气体在压强达到零的条件下变为理想气体，其中气体微粒之间的相互作用小到足以忽略不计。对于理想气体来说，它的内能是与体积无关的。因此，对于理想气体和不可压缩流体的等容过程来说，式（4.3）右侧第二项可以为零。对于低压气体来说，这一项将近似零。当内能与体积无关或在等容条件下时，内能的变化可以估算为

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_{\mathrm{v}}\mathrm{d}T \tag{4.4}$$

如果考虑在温度间隔（$T_2 - T_1$）之内 C_{v} 值恒定不变（比如平均值 $C_{\mathrm{v,av}}$），那么，式（4.4）中的积分变为

$$\Delta U = U_2 - U_1 = C_{\mathrm{v,av}}(T_2 - T_1) \tag{4.5}$$

不过，如果 C_{v} 可以表示为 $C_{\mathrm{v}} = A + BT + CT^2$，可以估算考虑温度的内能变化：

$$\Delta U = \int_{T_1}^{T_2} C_{\mathrm{v}}\mathrm{d}T = A(T_2 - T_1) + \frac{1}{2}B(T_2^2 - T_1^2) + \frac{1}{3}C(T_2^3 - T_1^3) \tag{4.6}$$

一个系统的总内能 U 不能通过直接测量而得。这样，内能的变化（$\Delta U = U_{\mathrm{final}} - U_{\mathrm{initial}}$）比 U 本身更为有用。U_{final} 为内能的终值，而 U_{initial} 为系统内能的初值。

4.2　焓

一个系统的焓 H 被定义为

$$H = U + PV \tag{4.7}$$

式中，U 为内能；P 为系统边界及其环境处的压强；V 为系统的体积。

PV 项相当于保持环境压强恒定不变所需的能量。例如，通过改变气体的体积可以维持等压 P。这种情况是可能的，例如，通过化学反应引起气缸内气体的改变并推动一个活塞。国际单位制中焓的单位为焦，比焓的单位为焦/千克。焓是一个系统的状态的函数，而且是一个广延量。

系统的总焓不能通过直接测量而得，代之以一个系统的焓变来测量。焓变被定义为 $\Delta H = H_{\text{final}} - H_{\text{initial}}$，其中 H_{final} 为系统焓的终值，而 H_{initial} 则为系统焓的初值。

当使用 T 和 P 来表示焓时，可以通过下式得到焓变：

$$\mathrm{d}H = C_{\mathrm{p}}\mathrm{d}T + \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T \mathrm{d}P \tag{4.8}$$

式中，C_{p} 为等压条件下的热容量。

C_{v} 的值为在等压过程中 1g 物质温度提高 1°C所需要的热量。C_{p} 是一个依赖于温度的物理量。对于等压过程来说，式（4.8）右侧第二项可以为零，对于低压气体来说，则是近似为零。对于理想气体来说，物质的焓是与压强无关的。对于低压气体和不可压缩流体来说，物质的焓近似与压强无关。当一种物质的焓与压强无关时，不考虑其过程，或者在等压条件下，焓变可以估算为

$$\Delta H = H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_{\mathrm{p}}\mathrm{d}T \tag{4.9}$$

如果考虑在温度间隔（$T_2 - T_1$）之内 C_{p} 值恒定不变（比如平均值 $C_{\mathrm{p,av}}$），那么，式（4.9）中的积分变为

$$\Delta H = H_2 - H_1 = C_{\mathrm{p,av}}(T_2 - T_1) \tag{4.10}$$

一个系统的 ΔH 等于外界对它所做的非机械功与供给它的热量之和。假定系统处于等压状态，系统焓的增加精确地等于通过热所加入的能量：$\Delta H = q$。因此，有时候一个系统的焓被描述为在给定压强之下的“热含量”。

通过式（4.9）中的积分来计算焓，需要一个依赖于温度的热容量表达式。实际值的这种表达式为

$$C_{\mathrm{p}} = A + BT + CT^2 \tag{4.11}$$

理想气体状态热容量是温度的函数，仅由 $C_{\mathrm{p}}^{\mathrm{ig}}$ 和 $C_{\mathrm{v}}^{\mathrm{ig}}$ 所指定。理想气体与温度的依赖关系可以表示为

$$C_v^{ig}/R = A + BT + CT^2 \tag{4.12}$$

C_p/R 比率是无量纲的，C_p 的单位是由 R 的单位选择所决定的。在附录 B 中，表 B1 列出了用于式（4.12）的各种化学成分的参数。两种理想气体热容量 C_p^{ig} 和 C_v^{ig} 的关系为

$$\frac{C_p^{ig}}{R} - \frac{C_v^{ig}}{R} = 1 \text{ 或 } C_p^{ig} - C_v^{ig} = R \tag{4.13}$$

在几 bar 的压强范围内，实际气体偏离理想行为很不明显，而且 C_p^{ig} 和 C_v^{ig} 通常极为接近它们的真实热容量[10]。

图 4.1 所示为二氧化碳随着压强与温度的焓变。压强较高时，分子之间的相互作用将会很显著，而且二氧化碳的行为将是非理想的。图 4.2 所示为水在不同的温度和压强下的焓值。从这些表示二氧化碳和水的非理想行为压焓图，可以获得高达 1000bar 的焓值。因此，它们可以用于压缩和膨胀过程的工业设计。

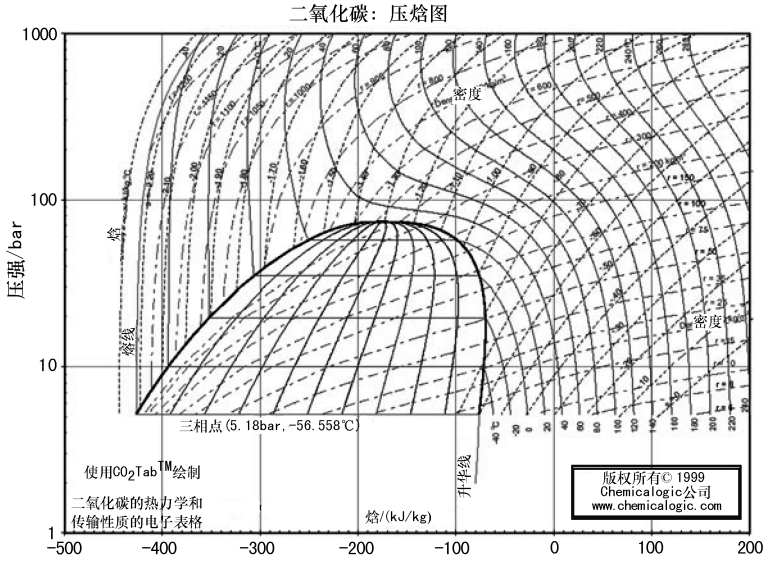


图 4.1　二氧化碳的压焓图（已从 Chemicalogic 公司获得使用授权）

例 4.1　热容量的单位换算

表 B1 中的参数需要使用开尔文温标。表 B1 中的丙烷在理想气体状态下的无量纲热容量可以表示为

$$\frac{C_p^{ig}}{R} = 1.213 + 28.785 \times 10^{-3} T - 8.824 \times 10^{-6} T^2$$

建立 C_p^{ig} 的求解方程（单位为：J/g mol°C）。

解：

两个温标之间的关系：$T\text{K} = T°\text{C} + 273.15$

气体常数：$R = 8.314\text{J/g mol K} = 8.314\text{J/g mol}°\text{C}$[⊖]

$$C_p^{ig} = R(1.213 + 28.785 \times 10^{-3}(T + 273.15) - 8.824 \times 10^{-6}(T + 273.15)^2)$$

$$C_p^{ig} = 69.981 + 199.24 \times 10^{-3}T - 73.362 \times 10^{-6}T^2\text{（单位：J/g mol°C）}$$

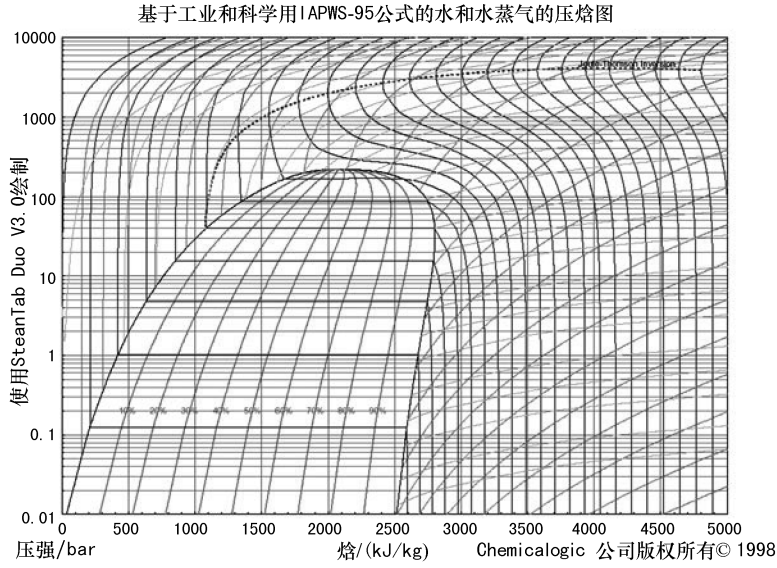


图 4.2　水的压焓图（已从 Chemicalogic 公司获得使用授权）

注：IAPWS 是指国际水和水蒸气性质委员会。——译者注

例 4.2　内能变化的计算

计算 0.5m³ 压强为 200kPa 的空气在等容过程中，被从 25°C加热到 120°C的内能变化。

解：

假设该过程期间气体将保持近乎理想气体状态。

数据：$V = 0.5\text{m}^3$，$P = 200\text{kPa}$，$T_1 = 25°\text{C}(298.15\text{K})$；$T_2 = 120°\text{C}(393.15\text{K})$。

两个温标之间的关系：$T\ \text{K} = T°\text{C} + 273.15°\text{C}$，$R = 8.314\text{Pa m}^3\text{/g mol K}$

空气的摩尔数：

$$n_{air} = \frac{PV}{RT} = \frac{(200 \times 10^3\text{Pa})(0.5\text{m}^3)}{8.314(\text{Pa m}^3\text{/g mol K})(298.15\text{K})} = 40.3\text{g mol}$$

⊖　此处原书似有误。—译者注

表 B1 中的热容量参数需要使用开尔文温标。

理想气体状态下的空气在等压条件下的热容量为（见表 B1）

$$\frac{C_p^{ig}}{R} = 3.355 + 0.575 \times 10^{-3} \quad (T \text{ 的单位：K})$$

根据式（4.12），可以得到

$$\frac{C_v^{ig}}{R} = \frac{C_p^{ig}}{R} - 1 \text{ 或 } C_v^{ig} = C_p^{ig} - R$$

$$\frac{C_v^{ig}}{R} = (3.355 + 0.575 \times 10^{-3} T) - 1$$

气体常数：$R = 8.314\text{J/g mol K} = 8.314\text{J/g mol °C}$

$$\Delta U = n_{air} R \int_{298K}^{393K} C_v^{ig} dT$$

$$= (40.3\text{g mol})(8.314\text{J/g mol K})\left(2.355(T_2 - T_1) + \frac{1}{2}0.575 \times 10^{-3}(T_2^2 - T_1^2)\right)$$

$$= 78.10\text{kJ}$$

因为热被传递给系统（空气），内能变化为正。

例 4.3 状态性质的计算

填写下表中未给出的水的状态性质。

解：

T/°F	P/psia	ΔU/（Btu/lb）	状态
250	27	550	
213.03		181.16	饱和液体
213.03	15	1.077.9	
350	30	1.125.5	
298	100		压缩液体

根据表 F1 和表 F2 可得其性质如下：

T/°F	P/psia	ΔU/（Btu/lb）	状态
250	27	550	饱和混合物
213.03	15	181.16	饱和液体
213.03	15	1077.9	压缩液体
350	30	1125.5	过热蒸汽
298	100	267.42	压缩液体

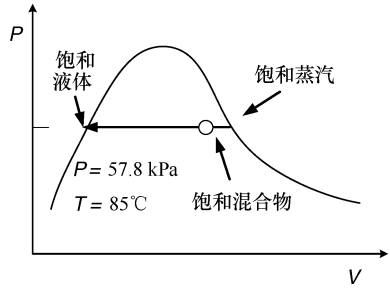
例 4.4 饱和液体和蒸汽的蒸气混合物中的热值

一个刚性容器中含有 15kg 85 °C的饱和水蒸气。如果蒸汽部分冷凝，形成

2kg 的液态水，请估算饱和液-汽混合物的焓以及通过冷凝损失的热量。

解：

饱和液态水-气态水的混合物 $T_{sat}=85\,^{\circ}\mathrm{C}$（57.8kPa）（见表 F3）



饱和蒸汽：$H_{sat\ vap}=2652.0\mathrm{kJ/kg}$

饱和液态水：$H_{sat\ liq}=355.9\mathrm{kJ/kg}$

液态水质量 $=2\mathrm{kg}$

蒸汽质量 $=(15-2)\mathrm{kg}=13\mathrm{kg}$

饱和混合物的蒸汽干度：$x=\dfrac{m_{vap}}{m_{total}}=\dfrac{13\mathrm{kg}}{15\mathrm{kg}}=0.87$

液体蒸汽混合物的焓：

$$H_{mix}=(1-x)H_{sat\ liq}+xH_{sat\ vap}=(1-0.87)355.9\mathrm{kJ/kg}+(0.87)2652.0\mathrm{kJ/kg}$$
$$=2353.5\mathrm{kJ/kg}$$

85°C时的冷凝热：

$$\Delta H_{cond}=H_{sat\ vap}-H_{sat\ liq}=(2652.0-355.9)\mathrm{kJ/kg}=2296.1\mathrm{kJ/kg}$$

在形成了 2kg 液态水之后的热损失：$(2\mathrm{kg})(\Delta H_{cond})=4592.2\mathrm{kJ}$

饱和混合物的焓取决于混合物的蒸汽干度 x，并且有

$$H_{sat\ vap}>H_{mix}>H_{sat\ liq}$$

4.3　热量

热量是穿过一个系统边界流动的总能量的一部分，它是由系统和外界之间或两个系统之间的温差所引起的。热量从高温区流向低温区。因此，热量不是储存的，而是被定义为传递的热能。尽管 Btu 与卡路里仍在使用，但是热在国际单位制中的单位为焦（J）。当一种物质的热容量恒定不变时（比如 $C_{p,av}$），如果它的温度从 T_1 变化到另一个温度 T_2，那么其热量的变化可以估算为

$$q=mC_{p,av}(T_2-T_1) \tag{4.14}$$

式中，q 为热量；m 为质量。

对于等容过程，比热容可以表示为 C_v。各种物质在等压条件下的比热容值 C_p 如附录 B 所示。对流体流动来说，速率形式的热量变为

$$\dot{q}=\dot{m}C_{p,av}(T_2-T_1) \tag{4.15}$$

式中，$\dot{q}$ 为热传递率（J/s 或 Btu/s）；$\dot{m}$ 为质量流量（kg/s 或 lb/s）。

当向系统传热时，热量的符号为正；而当系统向外界传热时，热量的符号为负。在一个绝热过程中由于系统和外界具有相同的温度，就没有热量流过边界。

如果一个质量体 m 被从 T_1 加热到 T_2，它将获得热量。例如，水的比热为 4.18kJ/kg K，将 1.0kg 水从 0 °C加热到 100 °C所需的能量变为 q = (1.0kg)(4.18kJ/kgK)(100 −0) °C =418kJ。不过，如果将一个质量体 m 从 T_1 冷却到 T_2 时，它将损失热量。热量值是一个依赖于路径的函数。例如，等压过程中的热量值将不同于等容过程所需要的值。

当一个闭口系统和外界之间无相互作用功时，热量可以估算为

$$q = \int_{T_1}^{T_2} C_p \mathrm{d}T \tag{4.16}$$

使用式（4.11）中给出的依赖于温度的热容量表达式，热量在 T_1 和 T_2 之间的变化可以估算为

$$q = \int_{T_1}^{T_2} C_p \mathrm{d}T = A(T_2 - T_1) + \frac{1}{2}B(T_2^2 - T_1^2) + \frac{1}{3}C(T_2^3 - T_1^3) \tag{4.17}$$

当处于相互热接触的两个系统停止热能量交换时，即达到了热平衡状态。

- 如果两种系统处于热平衡状态，那么，它们的温度是相同的。
- 对于一个独立系统，无能量必须被传递给外界或从外界传入系统。
- 一个完全理想的隔热系统无通过边界的热交换。

4.3.1 显热

利用显热效应可以计算引起一个无相变、无化学反应而且无组成成分变化的系统温度变化的热传递总量。对于机械地可逆、等压的闭口系统，被传递的总热量为

$$q = \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p \mathrm{d}T \tag{4.18}$$

当 $C_{p,av}$ = 常数时，可以得到

$$q = \Delta H = C_{p,av}(T_2 - T_1) \tag{4.19}$$

根据此处采用的符号规约，热量的符号为负；当系统向外界传递热量，以及当外界向系统传递热量时，热量的符号为正。

在各种各样的情况下，通过从一个系统释放的能量有可能提高另一个系统的温度。卡路里最初定义为将 1g 水的温度提高 1°C(约为 4.1855 J) 所需要的能量值，而英制热力单位则被定义为将 1lb 水的温度提高 1°F所需要的能量值（随后固定为 1055.06 J)。

表 4.3 和表 4.4 分别列出了不同的能量和功率单位之间的换算系数。

表 4.3 热量、能量或功的换算关系

	ft lb	kWh	hp h	Btu	Cal	J
ft lb	1	3.766×10^{-7}	5.050×10^{-7}	1.285×10^{-3}	0.324	1.356
kWh	2.655×10^{6}	1	1.341	3.413×10^{3}	8.606×10^{5}	3.6×10^{6}
hp h	1.98×10^{6}	0.745	1	2.545×10^{3}	6.416×10^{5}	2.684×10^{6}

（续）

	ft lb	kWh	hp h	Btu	Cal	J
Btu	778.16	2.930×10^{-4}	3.930×10^{-4}	1	252	1.055×10^{3}
Cal	3.086	1.162×10^{-6}	1.558×10^{-6}	3.97×10^{-3}	1	4.184
J	0.737	2.773×10^{-7}	3.725×10^{-7}	9.484×10^{-4}	0.2390	1

注：Himmelblau 和 Riggs [5]。

表 4.4　功率的换算关系

	hp	kW	ft lb_f/s	Btu/s	J/s
hp	1	0.745	550	0.707	745.7
kW	1.341	1	737.56	0.948	1000
ft lb_f/s	1.818×10^{-3}	1.356×10^{-3}	1	1.285×10^{-3}	1.356
Btu/s	1.415	1.055	778.16	1	1055
J/s	1.341×10^{-3}	1000	0.737	9.478×10^{-3}	1

注：Himmelblau 和 Riggs[5]。

4.3.2　潜热

考虑一种纯物质在等压条件下从固态液化或从液态汽化所需的热量。这些热效应分别称为融化潜热和汽化潜热。在这两种情况下，不会发生温度变化，但是需要向系统传入有限的热量。类似地，如果从液体向外界传递一个有限的热量，这种物质可以从液态变化为固态，这种热量称为凝结潜热。当从蒸汽向外界传递一个有限的热量，这种物质可以从汽态变化为液态，这种热量为冷凝潜热。还有，一种物质从一种固态变化到另一种固态也会伴随着转化热的出现。例如，当斜方晶硫在 95°C和 1bar 的条件下转化为单斜结构时，转化热为 360 J/g-原子。

对于一种纯物质，汽化热 ΔH_{vap}只是一个温度的函数，而且它与一个理想气体在温度 T 时的其他系统性质有关，具体关系可用克劳休斯-克拉贝龙（Clausius-Clapeyron）方程来表示：

$$\frac{\mathrm{d}\ln P_{sat}}{\mathrm{d}T}\simeq\frac{\Delta H_{vap}}{RT^2} \tag{4.20}$$

式中，P_{sat}为纯物质的饱和压强。

饱和压强 P_{sat}的值可以根据式（1.14）给出的安托尼（Antoine）方程来计算。表 1.15 中列出了安托尼参数 A、B 和 C。如果能够假定 ΔH_{vap}在温度间隔（T_2-T_1）之内恒定不变，式（4.20）就可以被改写为

$$\ln\left(\frac{P_{2sat}}{P_{1sat}}\right)=-\frac{\Delta H_{vap}}{R}\left(\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}\right) \tag{4.21}$$

式（4.21）将两种不同的温度下的流体饱和压强与汽化热关联起来。这里假定当温差（T_2-T_1）很小时，汽化热与温度无关[10]。

潜热也可以使用量热计来测量，而且实验值可以用于多种物质（见表 A1）。可以使用特鲁顿规则（Trouton's rule）来预测标准沸点时的汽化热 ΔH_n，它的压强为 1 个标准大气压（101.32kPa）。

$$\frac{\Delta H_n}{RT_n} \simeq 10 \tag{4.22}$$

式中，T_n 为标准沸点的绝对温度；R 为气体常数。

必须选择 ΔH_n、T_n 与 R 的单位以使得式（4.22）中的比值为无量纲值。里德尔（Riedel）提出了另一种近似模型[9]，它可以表示为

$$\frac{\Delta H_n}{RT_n} \simeq \frac{1.092(\ln P_c - 1.013)}{0.930 - T_n/T_c} \tag{4.23}$$

式中，P_c 和 T_c 分别为临界压强和临界温度。

这个方程得出的预测值是非常令人满意的[11]。例如，对水应用式（4.23）：

$$\frac{\Delta H_n}{RT_n} \simeq \frac{1.092(\ln 220.55 - 1.013)}{0.930 - 0.577} = 13.56$$

$$\Delta H_n = [13.56(8.314)(373.15)]\text{kJ/mol} = 42.065\text{kJ/mol}$$

式中，R = 8.134J/mol K；T_n = 373.15K；P_c = 220.55bar；T_c = 646.71K（见表 A2）。

从表 A1 中得到的实验值为 40.65kJ，该值只比上述计算值低了 3.4%。

沃森（Watson）提出的方法[12]可用于：根据一种纯物质在某个温度下的已知潜热值来估算任何温度下的汽化潜热：

$$\frac{\Delta H_2}{\Delta H_1} \simeq \left(\frac{1 - T_{r_2}}{1 - T_{r_1}}\right)^{0.38} \tag{4.24}$$

式中，T_{r_i} 为根据 T_i/T_c 之比获得的下降的温度值。这个方程是相当精确的。

4.3.3　发生相变的加热过程

水在 25～200°C的加热过程如图 4.3 中的温度-体积图所示。

发生相变的加热过程具有下列显热和潜热加热子过程：

过程 a：液态水在 25（298）～100°C(373K）的显热加热。

过程 b：在 100°C(373K）时的汽化潜热加热。

过程 c：在 100（373）～200°C(473K）的水蒸气显热加热。

总热每单位量水计算公式如下：

$$\Delta H_{total} = \Delta H_a + \Delta H_b + \Delta H_c = \left(\int_{298K}^{373K} C_{p,liq}\mathrm{d}T + \Delta H_{vap} + \int_{373K}^{473K} C_{p,vap}^{ig}\mathrm{d}T\right) \tag{4.25}$$

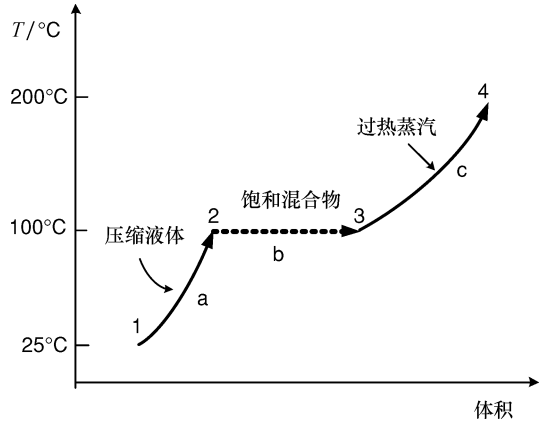


图 4.3　发生相变的水加热过程在 25 ~ 200°C的温度-体积图

需要在积分之内使用依赖于温度的热容量方程来估算液态和汽态的显热加热。

例 4.5　使用安托尼方程和克劳修斯-克拉贝龙方程的汽化热计算

使用安托尼方程来确定苯在其标准沸点 T_b 的汽化热，并与实验值进行比较。

解：

使用安托尼方程和下列常量来计算苯的蒸汽压：

$T = T_b = 80.11°C = 353.26K$（根据表 A1 查得），$R = 8.314J/g\ mol\ K$

表 1.13：

$A = 13.7819$，$B = 2726.81$，$C = 217.57$

$\ln P_{sat} = 13.7819 - \dfrac{2726.81}{T + 217.57}$（$P_{sat}$ 的单位为 kPa，T 的单位为°C）［式(1.27)］。

克劳休斯-克拉贝龙方程：

$$\frac{d\ln P_{sat}}{dT} \simeq \frac{\Delta H_{vap}}{RT^2}$$

使用安托尼方程对温度 T 求导，可得

$$\frac{d\ln P_{sat}}{dT} = -\frac{2726.81}{(80 + 217.57)^2} \simeq \frac{\Delta H_{vap}}{8.314(353.15)^2}$$

$\Delta H_{vap} = 31.95kJ/g\ mol$

来自表 A1 的实验数据为 30.76kJ/mol，两者偏差为

$\dfrac{31.95 - 30.76}{30.76} = 0.038 = 3.8\%$（对于许多工程计算来说，这个偏差已经足够小了）。

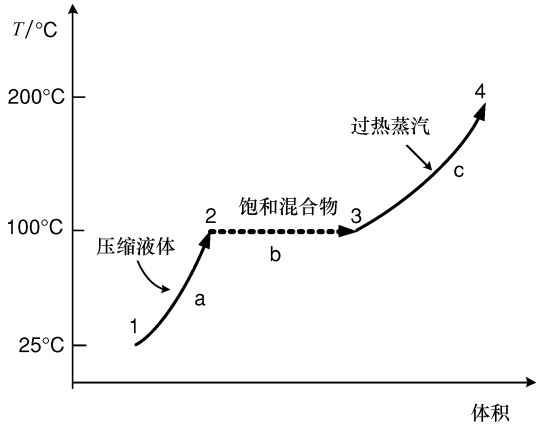
例 4.6　估算带有显热和潜热的焓变

水的流速为 4.5kg/s，在大气压下，从 25°C升温到 200°C，请估算水的焓变。

解：

假设水从初始温度和最终温度将保持理想状态。

加热过程如下面温度-体积图所示：



$T_1 = 298\text{K}$，$T_{\text{sat}} = 373\text{K}$，$T_2 = 473\text{K}$

总热量的计算公式如下：

$$\Delta H_{\text{total}} = \Delta H_{\text{a}} + \Delta H_{\text{b}} + \Delta H_{\text{c}} = \dot{m}\left(\int_{298\text{K}}^{373\text{K}} C_{\text{p,liq}}\,\mathrm{d}T + \Delta H_{\text{vap}} + \int_{373\text{K}}^{473\text{K}} C_{\text{p,vap}}\,\mathrm{d}T\right)$$

式中，$\dot{m}$为水的质量流量：4.5kg/s。

$R = 8.314\text{J/g mol K}$，$\text{MW} = 18.02\text{g/g mol}$，$R = 0.4615\text{kJ/kg K}$。

在 $T_{\text{sat}} = 373\text{K}$ 时：$\Delta H_{\text{vap}} = \Delta H_{\text{sat vap}} - \Delta H_{\text{sat liq}} = 2257\text{kJ/kg}$（见表 F3）

根据表 B1 可得，在等压条件下，无量纲热容量为

$C_{\text{p,liq}} = R(A + BT) = R(8.712 + 1.25 \times 10^{-3}T)$（$T$ 的单位为 K）

$C_{\text{p,vap}} = C_{\text{p}}^{\text{ig}} = R(A + BT) = R(3.47 + 1.45 \times 10^{-3}T)$（$T$ 的单位为 K）

过程 a：

$$\dot{m}\left(\int_{298\text{K}}^{373\text{K}} C_{\text{p,liq}}\,\mathrm{d}T\right) = \dot{m}R\left[8.712(373 - 298) + \frac{1}{2}1.25 \times 10^{-3}(373^2 - 298^2)\right]$$

$$= 1422.3\text{kJ/s} = 1422.3\text{kW}$$

过程 b：$\dot{m}(\Delta H_{\text{vap}}) = 10256.3\text{kJ/s} = 10256.3\text{kW}$

过程 c：

$$\dot{m}\left(\int_{373\text{K}}^{473\text{K}} C_{\text{p,liq}}\,\mathrm{d}T\right) = \dot{m}R\left[3.47(473 - 373) + \frac{1}{2}1.45 \times 10^{-3}(473^2 - 373^2)\right]$$

$$= 848.0\text{kJ/s} = 848\text{kW}$$

所需的总能量值（功率）= 12426.8kJ/s = 12426.8kW

使用表 F3 和表 F4 中的蒸汽表可得

过程 a：$\dot{m}(H_2 - H_1)$ = (4.5kg/s)(419.06 − 104.8)kJ/kg = 1417.5kW

过程 b：$\dot{m}\Delta H_{vap}$(4.5kg/s)(2676.0 − 419.06)kJ/kg = 10156.5kW

过程 c：$\dot{m}(H_4 - H_3)$(4.5kg/s)(2875.3 − 2676.0)kJ/kg = 898.8kW

总能量值 = (1417.5 + 10156.5 + 898.8)kW = 12470.8kW

在蒸汽表中查到的结果与估算的结果略有不同，这是由于水在高温和高压下的非理想行为造成的。

例 4.7　估算另一种温度下的汽化热

水的汽化潜热在 100°C为 2253.0kJ/kg（见表 A1）。估算水在 150°C的汽化潜热。

解：

对于水来说：T_c = 646.71K；ΔH_1 = 2253.0kJ/kg（从表 A1 查得）

T_1 = 373.15K，T_2 = 423.15K

用于式（4.24）的降低的温度为

$$T_{r_1} = 373.15/647.1 = 0.577$$

$$T_{r_2} = 423.15/647.1 = 0.654$$

$$\Delta H_2 \simeq (2253.0\text{kJ/kg})\left(\frac{1-0.654}{1-0.577}\right)^{0.38} = 2087.4\text{kJ/kg}$$

蒸汽表中给出的值为 2113.2kJ/kg（从表 F3 查得）

两者偏差：

$$\frac{2113.2 - 2087.4}{2113.2} = 0.012 \text{ 或 } 1.2\%$$

估算值与表列值两者的偏差很小。

4.3.4　反应热

发生化学反应的系统会与外界交换热量，而且其温度也可以变化。这些影响来源于分子结构的差异，因此也会影响到产物和反应物的能量。与特定的化学反应有关的热量取决于反应物和产物的温度。一个通用化学反应可以表示如下：

$$v_A A + v_B B \rightarrow v_C C + v_D D \qquad (4.26)$$

式中，v_i 为物质 A、B、C 和 D 的化学计量系数，对于一个产物来说，该系数为正，而对一个反应物来说，该系数为负。

当反应物和产物处于相同的温度时，就会产生一个反应热估算的标准基。对

于式（4.26）中给出的反应，标准反应热为焓变当处于标准状态的 v_A 摩尔 A 与 v_B 摩尔 B 在温度 T 时反应生成相同温度 T 的标准状态的 v_C 摩尔 C 与 v_D 摩尔 D。气体的标准状态是在 1atm 下的纯物质的理想气体状态。对于液体与固体，标准状态为在 1atm 下的实际纯液体或固体。因此，标准状态性质是温度的函数。基于这种符号规约，一个标准反应热可以表示为

$$\Delta H_r^\circ = \sum_i v_i \Delta H_{fi}^\circ \tag{4.27}$$

式中，H_{fi}°为标准生成热。

表 C1 以表的形式列出了在 298.15K 或 25°C下的一些标准生成热的值，并被记作 ΔH_{f298}°。

一个生成反应被定义为由处于 298.15K（25°C）标准状态下的单一化合物组成元素单质形成 1mol 该单一化合物的反应。标准状态为：①气体（g）：在 1atm 和 25°C下的纯理想气体；液体（l）与固体（s）。②在 1atm 和 25°C下的纯物质。③在 1atm 和 25°C下的 1mol 水成理想溶液中的溶质。标准生成热对于标准状态下的稳定单质为零，因为它们是自然存在的。例如，氨的生成反应为 $N_2 + 3H_2 = NH_3$，因为所有的反应物均为单质。不过，反应 $H_2O + SO_3 = H_2SO_4$ 不是一个生成反应，因为它是通过其他化合物而不是单质形成的硫酸。

式（4.27）中的总和涵盖了所有的产物和反应物。例如，对于反应：

$$4HCl(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(g) + 2Cl_2(g) \tag{4.28}$$

化学计量系数为 $v_{HCl} = -4$，$v_{O_2} = -1$，$v_{H_2O} = 2$，$v_{Cl_2} = 2$，根据式（4.27），标准反应热则变为

$$\Delta H_r^\circ = \sum_i v_i \Delta H_{fi}^\circ = v_{H_2O}\Delta H_{fH_2O}^\circ + v_{Cl_2}\Delta H_{fCl_2}^\circ + v_{HCl}\Delta H_{fHCl}^\circ + v_{O_2}\Delta H_{fO_2}^\circ \tag{4.29}$$

其中，$\Delta H_{fCl_2}^\circ = 0$，$\Delta H_{fO_2}^\circ = 0$，因为它们是自然产生的稳定单质。

热效应因化学反应的自然性质而变。释放热量的反应称为放热反应，需要热量的反应称为吸热反应。对于一个等压条件下的放热反应，系统的焓变等于反应中释放的能量，包括系统中储存的能量与通过膨胀损耗到外界的能量。

与此类似，对于一个吸热反应来说，系统的焓变等于在反应中吸收的能量。如果 ΔH_r 为正，反应是吸热的，也就是说，由于反应产物的焓要大于反应物的焓，系统是吸收了热量。另一方面，如果 ΔH_r 为负，反应是放热的，也就是说，因为产生了热量使得总焓降低了（见图 4.4）。

对于一个特定的反应如果给出了反应热，这就要求使用目前的化学计量系数。如果化学计量系数是双倍增加的，那么反应热也是双倍增加的。例如，考虑下列反应：

$$\frac{1}{2}N_2 + \frac{3}{2}H_2 \rightarrow NH_3 \quad \Delta H_r^\circ = -46.11\text{kJ}$$

$$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3 \quad \Delta H_r^\circ = -92.22\text{kJ}$$

当化学反应通过增加而组合起来，也可以增加标准热反应来估算所导致反应的标准热。这是可能的，因为焓是一个状态函数，对于给定的初始和最终状态，它的值是与路径无关的。考虑到这种目的的化学反应方程通常会包括每个反应物和产物的物理状态的一个标识，符号 g、l 或者 s 分别表示气态、液态或者固态。

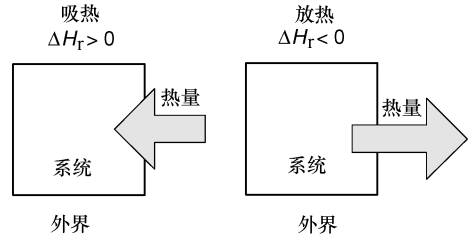


图 4.4　化学反应中的热相互作用：吸热反应需要来自外界的能量，而放热反应则向外界释放能量

例 4.8　估算标准反应热

估算反应 $4HCl(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(g) + 2Cl_2(g)$ 在 298.15K 时的反应热。

解：

$$4HCl(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(g) + 2Cl_2(g)$$

化学计量系数 v_i 对产物来说为正，而对一个反应物来说则为负。

反应的化学计量系数为 $v_{HCl} = -4$，$v_{O_2} = -1$，$v_{H_2O} = 2$，$v_{Cl_2} = 2$。

基于这种符号规约，一个标准反应热可以表示为

$$\Delta H_r^\circ = \sum_i v_i \Delta H_{fi}^\circ$$

式中，H_{fi}° 为标准生成热。总和涵盖了所有的产物和反应物（使用表 C1 中的标准生成热）。

$$\Delta H_r^\circ = 2\Delta H_{fH_2O}^\circ - 4\Delta H_{fHCl}^\circ = (2)(-241.82) + (-4)(-92.31) = -114.41 kJ/mol$$

自然产生的稳定单质 O_2 与 Cl_2 的生成热为零。

例 4.9　使用标准生成热估算标准反应热

估算水-汽转化反应的标准反应热：

$$CO_2(g) + H_2(g) \rightarrow CO(g) + H_2O(g)$$

解：

尽管这种反应发生的温度远远高于 25 °C，标准反应热仍使用 25 °C来计算。

化学计量系数 v_i 对产物来说为正，对一个反应物来说则为负。根据表 C1 可得有关的生成反应及其生成热为

CO_2: $C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$　　$\Delta H_{f298}^\circ = -393.51 kJ/mol, v = -1$

H_2: $H_2(g)$　　$\Delta H_{f298}^\circ = 0$，由于氢气是一种稳定单质

CO: $C(s) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow CO(g)$　　$\Delta H_{f298}^\circ = -110.52 kJ/mol$，$v = 1$

$$H_2O: H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(g) \qquad \Delta H^{o}_{f\,298} = -241.82\text{kJ/mol},\ v = 1$$

其中，所有的产物和反应物均处于它们的标准状态：在1atm和25°C下的理想气体状态。基于这种符号规约，标准反应热可以用式（4.27）来表示：

$$\Delta H^{o}_{r} = \sum_i v_i \Delta H^{o}_{fi} = -110.52 - 241.82 - (-393.51) = 41.16\text{kJ/mol}$$

这个结果表示，当所有的成分均处于标准状态时，1mol CO加上1mol H_2O的焓比1mol CO_2加上1mol H_2的焓大41.16kJ。因此，水-汽转化反应是一个吸热反应，需要从外界吸收热量。

4.3.5　标准燃烧热

考虑煤燃烧反应：$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + \Delta H_r$；其中，纯碳表明煤是固态，而氧气和二氧化碳均是气态。在一个燃烧反应中反应物比产物拥有更大的能量，而且这些能量被以热量的形式传递给外界，因此该反应是放热的。燃料的燃烧热可以通过一个流动量热计来测量。燃料与空气在环境温度下混合，混合物流入一个量热计的燃烧室发生反应。燃烧产物进入一个水冷部件，并被冷却至反应物的温度。由于在该过程中无轴功产生，而且势能和动能可以忽略不计，由燃烧反应引起的焓变成为热流动量热计中的热量流动：

$$q = \Delta H = \text{反应热} \tag{4.30}$$

例如，汽油中广泛使用的2，2，4-三甲基戊烷（异辛烷），化学分子式为C_8H_{18}，它与氧气发生放热反应，每摩尔异辛烷产生10.86MJ的热量：

$$2C_8H_{18}(l) + 25O_2(g) \rightarrow 16CO_2(g) + 18H_2O(g) + 10.86\text{MJ/mol} \tag{4.31}$$

石油或汽油产品的不完全燃烧会产生一氧化碳。在体积相等的条件下，石油产品的燃烧热可以近似表示为

$$q_v = 12400 - 2100d^2 \tag{4.32}$$

式中，q_v的测量单位为cal/g；d为60°F（16°C）时的比重。

乙烷C_2H_6是一个脂肪族碳氢化合物。根据化学方程，乙烷完全燃烧释放1561kJ/g mol或者51.9kJ/g的热量并生成二氧化碳和水：

$$C_2H_6 + 3/2O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 1.561\text{kJ/g mol} \tag{4.33}$$

汽油含有大约35MJ/L(132MJ/US gal)(高热值）的热量，这是一个平均值。汽油的混合成分不同，因此，汽油的实际含能量根据季节与批次的不同而变化，可以高于或低于平均值4%。

例4.10　标准反应热的计算

请确定正戊烷的标准生成热：$5C(s) + 6H_2 \rightarrow C_5H_{12}(g)$：

解：

许多标准生成热来自量热计测得的标准燃烧热。燃烧反应发生在一种元素或化合物与氧气之间生成特定的燃烧产物。当有机化合物只是由碳、氢气以及氧气组成时，燃烧产物为二氧化碳和水。生成的水的物态可以是蒸汽或液体。

在实践中，生成正戊烷的反应可以来自下列燃烧反应的组合。

对产物来说，化学计量系数 v_i 为正，对一个反应物来说，该系数为负。

$5C(s) + 5O_2(g) \rightarrow 5CO_2(g)$　　$\Delta H^{\circ}_{f298} = (5)(-393.51)\text{kJ/mol}$

$6H_2(g) + 3O_2(g) \rightarrow 6H_2O(l)$　　$\Delta H^{\circ}_{f298} = (6)(-285.83)\text{kJ/mol}$

$5CO_2(g) + 6H_2O(l) \rightarrow C_5H_{12}(g) + 8O_2(g)$　　$\Delta H^{\circ}_{f298} = 3535.77\text{kJ/mol}$

$5C(s) + 6H_2 \rightarrow C_5H_{12}$　　$\Delta H^{\circ}_{f298} = -146.76\text{kJ/mol}$

考虑到产物，化学计量系数 v_i 为正，对一个反应物来说，该系数为负，净反应可以根据前三个方程的总和而获得。这个结果就是表 C1 中列出的生成正戊烷的标准热。

例 4.11　根据标准生成热估算标准燃烧热

估算甲烷燃烧的标准反应热：

$$CH_4(g) + 2O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 2H_2O(l)$$

解：

根据表 C1 可得有关的生成反应及其生成热如下：

CH_4：$C(s) + 2H_2(g) \rightarrow CH_4(g)$　　$\Delta H^{\circ}_{f298} = -74.52\text{kJ/mol}, v = -1$

O_2：$O_2(g)$　　$\Delta H^{\circ}_{f298} = 0$ 由于氧气是一种稳定单质

CO_2：$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$　　$\Delta H^{\circ}_{f298} = -393.51\text{kJ/mol}, v = 1$

H_2O：$H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(l)$　　$\Delta H^{\circ}_{f298} = -285.83\text{kJ/mol}, v = 2$

化学计量系数 v_i 对产物来说为正，对一个反应物来说为负。一个标准反应热可以表示为

$$\Delta H^{\circ}_{r} = \sum_i v_i \Delta H^{\circ}_{fi}$$

$$\Delta H^{\circ}_{298} = -393.51 + 2(-285.83) - (-74.52) = -890.65\text{kJ/mol}$$

这个结果表示，当所有的成分均处于标准状态时，1mol CH_4 加上 2mol O_2 的焓比 1mol CO_2 加上 2mol H_2O 的焓小 890.65kJ。因此，该反应是一个放热反应，向外界排放热量。

4.4　温度对反应热的影响

生成焓的标准状态仅为温度的函数：

$$\mathrm{d}H_{\mathrm{f}i}^{\circ} = C_{\mathrm{p}i}^{\circ}\mathrm{d}T \tag{4.34}$$

乘以 v_i 并对所有的产物和反应物求和，得出：

$$\mathrm{d}\Delta H^{\circ} = \sum_i \mathrm{d}v_i H_{\mathrm{f}i}^{\circ} = \sum_i v_i C_{\mathrm{p}i}^{\circ}\mathrm{d}T \tag{4.35}$$

一个反应的标准热容量变化为

$$\Delta C_{\mathrm{p}}^{\circ} = \sum_i v_i C_{\mathrm{p}i}^{\circ} \tag{4.36}$$

或

$$\Delta C_{\mathrm{p}}^{\circ} = \Delta A + \Delta B \times 10^{-3} T + \Delta C \times 10^{-6} T^2$$

其中，$\Delta A = \sum_i v_i \mathrm{A}_i$；$\Delta B = \sum_i v_i B_i$；$\Delta C = \sum_i v_i C_i$

因此，温度对反应热的影响可以根据下式获得：

$$\begin{aligned}\Delta H_{\mathrm{r}_2}^{\circ} &= \Delta H_{\mathrm{r}_1}^{\circ} + \int_{T_1}^{T_2} \Delta C_{\mathrm{p}}^{\circ}\mathrm{d}T \\ &= \Delta H_{\mathrm{r}_1}^{\circ} + \int_{T_1}^{T_2} (\Delta A + \Delta B \times 10^{-3} T + \Delta C \times 10^{-6} T^2)\,\mathrm{d}T\end{aligned} \tag{4.37}$$

式中，ΔH_1°为已知值，比如标准反应热（$T_1 = 25^{\circ}\mathrm{C}$）；$\Delta H_2^{\circ}$为另一个温度 T_2 下的标准反应热。

工业反应通常不是在标准状态条件下实现的。在实际应用中，这几种反应可以同时发生，实际的反应也可以不进行到底，而且最终温度也可以不同于初始温度。另外，一些惰性成分可以在反应中出现。不过，热效应的计算依然是基于上面给出的准则。

例 4.12　非 298K 温度时的标准反应热的估算

估算在 800°C时合成甲醇的标准反应热。

$$\mathrm{CO(g)} + 2\mathrm{H_2(g)} \rightarrow \mathrm{CH_3OH(g)}$$

解：

通过使用式（4.27）中的标准生成热数据，可以得到

$$\Delta H_{\mathrm{r},298}^{\circ} = -200.66 - (-110.52) = -90.13\mathrm{kJ} = -110.52\mathrm{kJ/mol}$$

化学计量系数 v_i对产物来说为正，对一个反应物来说为负。

氢气生成热为零，因为它是自然产生的稳定单质。从表 B1 中查得的所有成分的理想气体热容量参数如下：

成分	v_i	A	$10^3 B$	$10^6 C$
CO	-1	3.376	0.557	0.0
H_2	-2	3.249	0.422	0.0
CH_3OH	1	2.211	12.216	-3.45

$$\Delta A = (1)(2.211) + (-1)(3.376) + (-2)(3.249) = -7.663$$

$$\Delta B = [(1)(12.216) + (-1)(0.557) + (-2)(0.422)] \times 10^{-3} = 10.815 \times 10^{-3}$$

$$\Delta C = [(1)(-3.45) + (-1)(0.0) + (-2)(0.0)] \times 10^{-6} = -3.45 \times 10^{-6}$$

$$T_1 = 298.15\text{K}$$

$$T_2 = (800 + 273.15)^\circ\text{C} = 1073.15\text{K}$$

$$R = 8.314\text{J/g mol K}$$

$$\Delta H^\circ_{r_2} = \Delta H^\circ_{r_1} + R\int_{T_1}^{T_2} (\Delta A + \Delta B \times 10^{-3} T + \Delta C \times 10^{-6} T^2)\,\mathrm{d}T$$

$$= -90.13 + R\int_{298.15}^{1073.15} (-7.663 + 10.815 \times 10^{-3} T - 3.45 \times 10^{6} T^2)\,\mathrm{d}T$$

$$= -13249.2\text{kJ}$$

该反应放热并释放出能量。反应热随着温度的升高而增加。

稳定燃烧反应需要合适的燃料和氧气量。理论上，给定的燃料量完全燃烧需要一个理论上的氧气量（称为化学计量量）。在实践中，燃烧条件从来都不是理想的。因此，所有的燃料要完全燃烧必须要提供比化学计量量更多的空气。超过理论所需的空气量称为过量空气。例如，发电厂锅炉的运行通常需要大约10%～20%的过量空气。天然气发电锅炉的运行所需的过量空气可以低至5%。粉状燃煤锅炉的运行需要20%的过量空气。燃气轮机运行则需要高达300%的过量空气。如果未给燃烧炉提供充分的空气量，未燃烧的燃料、烟尘、烟雾以及一氧化碳就被排出锅炉之外。结果就会导致传热表面污垢、污染、较低的燃烧效率、火焰不稳定以及潜在的爆炸可能。为了避免低效和不完全的工况，锅炉通常会运行于一个过量的空气水平。

4.5　标准焓变

标准焓变描述了在一个系统在标准条件下的不同状态之间所测到的焓的变化。一些标准焓变如下：

- 标准生成焓为由其基本组成元素在标准条件下生成1mol的化合物所测到的焓的变化。任何反应在任何条件下的焓变都可以所有反应物和产物的标准生成焓来计算。
- 标准反应焓的定义为1mol物质在标准条件下完全反应所测到的焓。
- 标准燃烧焓为1mol物质在标准条件下与氧气完全燃烧所测到的焓。
- 标准中和焓为酸与碱在标准条件下反应生成1mol水所测到的焓。
- 标准熔化焓为在标准条件下1mol物质在固态和液态之间完全改变物态所需要的焓。
- 标准汽化焓为在标准条件下1mol物质在液态和汽态之间完全改变物态所

需要的焓。

- 标准升华焓为在标准条件下 1mol 物质在固态和固态之间完全改变物态所需要的焓。
- 水合焓为 1mol 汽态离子完全溶于水形成 1mol 水离子所测到的焓。

4.6　绝热火焰温度

绝热火焰温度有两种：等容条件下的绝热火焰温度和等压条件下的绝热火焰温度，描述的是一个燃烧反应产物在没有向外部环境损失能量时理论上能够达到的温度。等压绝热火焰温度产生于没有任何热传递或动能和势能变化的完全燃烧过程。等压过程的绝热火焰温度低于等容过程的绝热火焰温度。这是由于在燃烧期间释放的一些能量改变了控制系统的体积。许多燃料的等压绝热火焰温度（比如木材、丙烷以及汽油等）在空气中大约为 1950°C[7,10]。假设初始为大气条件（1atm 和 25°C），表 4.5 列出了各种气体的化学计量燃料-空气混合物的绝热火焰温度。

表 4.5　常用气体/材料的绝热等压火焰温度 T_{ad}

燃料	T_{ad}/°C	T_{ad}/°F
乙炔（C_2H_2）	2500	4532
丁烷（C_4H_{10}）	1970	3578
乙烷（C_2H_6）	1955	3551
氢气（H_2）	2210	4010
甲烷（CH_4）	1950	3542
天然气	1960	3562
丙烷（C_3H_8）	1980	3596
木材	1980	3596
煤油	2093	3801
轻质燃料油	2104	3820
中质燃料油	2101	3815
重质燃料油	2102	3817
烟煤	2172	3943
无烟煤	2180	3957

注：Jarosinski 和 Veyssiere[7]；Griffiths 和 Barnard [3]。

例 4.13　最高火焰温度

估算甲烷与空气在等压条件下燃烧能够达到的最高温度。甲烷和空气进入燃烧室时均为 25°C和 1atm。燃烧反应为

$$CH_4(g) + 2O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 2H_2O(g)$$

解：

化学计量系数 v_i对产物来说为正，对一个反应物来说为负。

从表 C1 查得的生成热为

$\Delta H^{\circ}_{f\,298}(CH_4) = -74.52\text{kJ/mol}, v = -1$

$\Delta H^{\circ}_{f\,298}(O_2) = 0$，由于氧气是一种单质，$v = -2$

$\Delta H^{\circ}_{f\,298}(CO_2) = -393.51\text{kJ/mol}$，$v = 1$

$\Delta H^{\circ}_{f\,298}(H_2O) = -241.82\text{kJ/mol}$（汽态），$v = 2$

$R = 8.314\text{J/g mol K}$

一个标准反应热可以表示为 $\Delta H^{\circ}_{r} = \sum_i v_i \Delta H^{\circ}_{fi}$

$$\Delta H^{\circ}_{f\,298} = -393.51 + 2(-241.82) - (-74.52) = -802.62\text{kJ/mol}$$

燃烧 1mol 甲烷释放的热量为 802.62kJ。在空气中，3.76mol N_2 对应着 1mol O_2。燃烧反应释放的热将只被用于加热产物：1mol 二氧化碳，2mol 水蒸气与 7.52mol 氮气：

$$\Delta H^{\circ}_{r298} = \int_{298.15}^{T} C_{p,mix}\,dT$$

式中，n_i 为 i 的摩尔数成分；T 为最高火焰温度（单位：K）。

$C_{p,mix} = \sum n_i C^{\circ}_{pi}$，使用下式估算：

$$\frac{C^{\circ}_{pi}}{R} = A_i + B_i \times 10^{-3} T \text{ 和} \frac{C^{\circ}_{p,mix}}{R} = A' + BA' \times 10^{-3} T$$

从表 B1 可查得热容量：

	CO_2	$H_2O(g)$	N_2
A	5.457	3.47	3.280
$B\ 10^{-3}$	1.045	1.450	0.593
n_i	1	2	7.52

$$A' = \sum_i n_i A_i = 5.457 + 2(3.47) + 7.52(3.280) = 37.06$$

$$B' = \sum_i n_i B_i [1.045 + 2(1.45) + 7.52(0.593)]10^{-3} = 8.40 \times 10^{-3}$$

$$802620\text{J/mol} = R\int_{298.15}^{T} C^{\circ}_{p,mix}\,dT$$

$$= 8.314[37.06(T - 298.15) + (1/2)8.40 \times 10^{-3}(T^2 - 298.15)^2]$$

$$T = 2309\text{K}$$

4.7　来自燃烧过程的空气污染

碳燃料的燃烧过程排放会导致空气污染。该过程的主要衍生物是二氧化碳、

水、颗粒物、氮氧化物、二氧化硫以及一些未燃烧的碳氢化合物，这要取决于工况和燃料-空气比。并非所有的燃料将被燃烧过程完全消耗掉；少量燃料将会在燃烧之后留下，一些燃料反应会生成在最初的燃料混合物中并没有的含氧化合物或碳氢化合物。增加燃烧过程中的空气量将会减少前两种污染物的排放量，但是它会提高氮氧化物（NO_x）的排放，而氮氧化物已被证明对植物和动物健康都有害。而且，释放的化学物质为苯和1，3-丁二烯，这些也是特别是有害的。当发生不完全燃烧时，还会产生一氧化碳（CO）[6,8]。

4.8　混合热

基于纯成分的混合，热力学性质变化用符号 Δ 表示。图4.5所示为乙醇-水混合物中的混合热与汽-液平衡图。混合物的焓取决于它的组成成分。如图4.5所示，在197.2°F（等温线）处，$H_{\text{sat liq}}$约等于155Btu/lb，而则 $H_{\text{sat vap}}$则约等于775Btu/lb。在197.2°F时乙醇质量分数 $w_e = 0.4$，混合物的焓约为600Btu/lb。混合物的性质变化为

$$\Delta H = H - \sum_i x_i H_i \tag{4.38}$$

根据下面的关系式可求得偏焓：

$$\Delta H_1 = \Delta H + (1 - x_1)\frac{\mathrm{d}\Delta H}{\mathrm{d}x_1} \tag{4.39}$$

$$\Delta H_2 = \Delta H - x_1 \frac{\mathrm{d}\Delta H}{\mathrm{d}x_1} \tag{4.40}$$

例4.14　偏焓的估算

一种二元混合物的混合热（过量焓）$H = x_1 x_2(2ax_1 + ax_2)$，其中 a 是单位为J/mol的参数，x_1 和 x_2 分别为成分1和成分2的摩尔分数。根据 x_1 导出偏焓 H_1 和 H_2 的方程。

解：

根据式（4.35）和式（4.36）得出偏性质：

$$H_1 = H + (1 - x_1)\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}x_1}$$

$$H_2 = H - x_1 \frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}x_1}$$

根据 $\sum x_j = 1 : x_2 = 1 - x_1$，混合热 H 的方程变为

$$H = ax_1 - ax_1^3$$

求导数：$\dfrac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}x_1} = a - 3ax_1^2$

因此，偏摩尔过量焓为

$$H_1 = ax_1 - ax_1^3 + (1 - x_1)(a - 3ax_1^2) = a - 3ax_1^2 + 2ax_1^3$$

$$H_2 = ax_1 - ax_1^3 - x_1(a - 3ax_1^2) = 2ax_1^3$$

$$H = x_1 H_1 + x_2 H_2$$

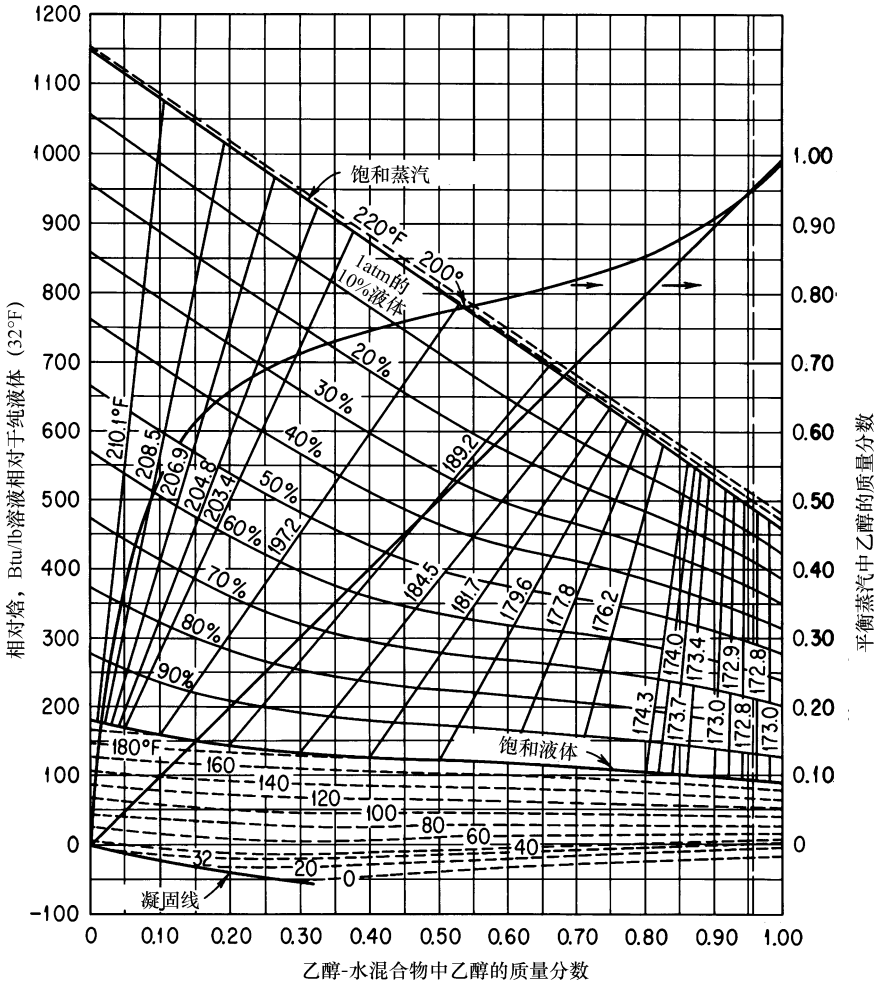


图 4.5　混合热[5]

4.9　使用量热计进行热量测量

只有在一个系统从一种状态转变为另一种状态期间的能量变化能够被定义并这样测量。传统地，这种热量是使用量热计来测量的。图 4.6 所示为一个典型的

流动量热计，其中的温度变化与通过加热器提供的电能有关。系统的热损失等于放热系统中外界获得的热量。类似地，通过系统从外界获得的热量等于吸热过程中外界的热损失。在一个典型的量热计中，一个热物质（系统）及其外界允许某些最终温度点达到平衡。热量从系统（热）流入外界（冷）。如果没有来自外界的热损失，系统的热损失必须等于外界获得的热量。没有完全理想的量热计能够避免热损失。一旦量热计已经标定以确定量热计常量，就能够使用它来确定比热效应。

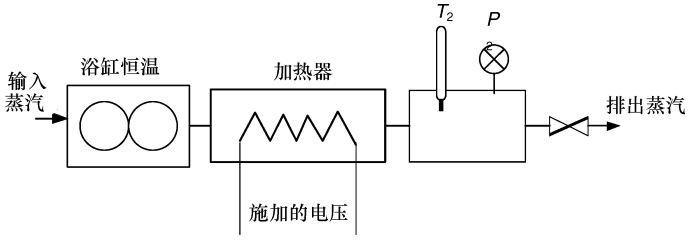


图 4.6　典型的流动量热计

例 4.15　测量量热计中的金属热容量

28.2g 的未知金属被加热到 99.8°C，并放入一个盛有 150.0g 温度为 23.5°C 的水的量热计中。温度被允许为等温，最终的测量温度为 25°C。量热计常量已经确定为 19.2J/°C。请估算该金属的比热容。

解：

热传递可以表示为

热金属的热损失 = 水获得的热量 + 量热计获得的热量

$$(28.2\text{g})(C_{\text{p,m}})(99.8-25.0)^{\circ}\text{C} = (150.0\text{g})(4.184\text{J/g}^{\circ}\text{C})(25.0-23.5)^{\circ}\text{C} + 19.2\text{J/}^{\circ}\text{C}(25.0-23.5)^{\circ}\text{C}$$

求解比热容：

$$C_{\text{p,m}} = 969\text{J}/(2.11\times10^{3}\text{g}^{\circ}\text{C}) = 0.459\text{J/g}^{\circ}\text{C}$$

金属的比热容总是较低，而水则具有一个相对较高的热容量。

弹式量热计是一个隔热容器，它带有在一个水槽中的一个小型燃烧室，用于测量一个特定反应的燃烧热。在测量反应热时，弹式量热计不得不承受量热计之内较大的压强。电能用于点燃燃料。燃烧释放的能量提高了钢弹及其内容物以及外界水套的温度。这样，水温的变化就可以准确地测得。这种温升与弹式量热计常量（该值取决于金属弹部分的热容量）一起用于计算样品提供的能量。

在一个示差扫描热量计中，传导热量流入一个小铝囊或“盘”中的样品，并通过流入一个空的参考盘相比较来测量。流入样品的热量更大，由于它是该样品的热容量 C_{p}。热流的差异产生了穿过厚板的一个小温差 ΔT，这个温差使用一个热电偶来测量。类似地，样品物质的溶解热也可以使用这样的量热计来测量。

4.10　焓湿图

图 4.7 所示为一个焓湿图，它以图形的形式给出了湿空气的物理性质和热性质。焓湿图有助于确定环境控制概念，比如空气的湿度以及导致水分凝结的焓变。

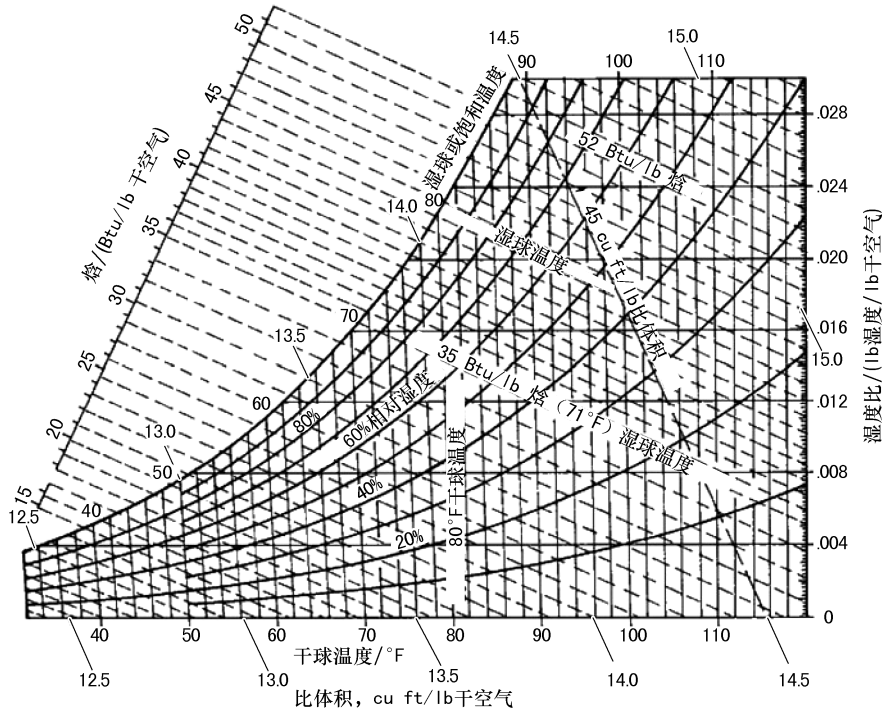


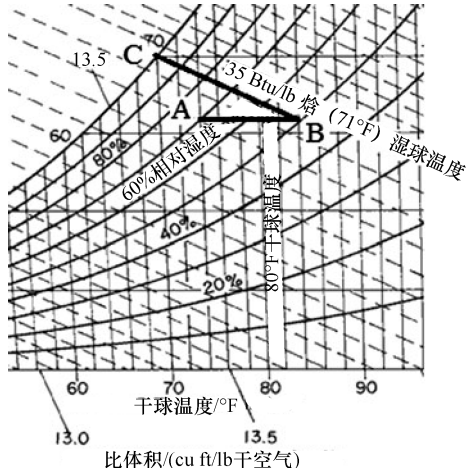
图 4.7　焓湿图[2]（已获得使用授权）

- 干球温度 T_{db}为环境气温，它可以使用自由暴露在空气中的常规温度计来测量，不过该温度计要屏蔽掉辐射和水分的影响。干球温度表现为焓湿图中的垂直线。
- 湿球温度 T_{wb}通过一个暴露在空气流当中的湿润温度计球来表示。湿球温度可以使用带有用湿布包裹的温度计球的温度计来测量。来自温度计的水的绝热蒸发与冷却效应通过低于空气中的“干球温度”的“湿球温度”来表示。

温度计球上湿绷带的蒸发率取决于空气的湿度。当空气含有更多的水蒸气时，蒸发量减少。湿球温度与干球温度在 100% 的相对空气湿度下是相同的（空气湿度处于饱和线）。结合一个焓湿图中的干球温度与湿球温度（也称为焓熵图）来确定湿空气的状态。在焓湿图上，湿球温度恒量线从左上部到右下部呈现出对角线形式。

露点为水蒸气开始从空气中冷凝出来的温度（在此温度下空气变为完全饱和）。超出这个温度，水分将保留在空气中。例如，如果湿气冷凝在取自冰箱的一个冷瓶子上，气体的露点温度为高于冰箱里面的温度。露点可以表示为焓湿图中的饱和线。

焓熵图是焓湿图的一个变体，它以图形化的方式给出了气温、水分含量与焓之间的关系。焓熵图是工程师与设计师的一个基本设计工具[2]。图4.8所示为焓熵图。



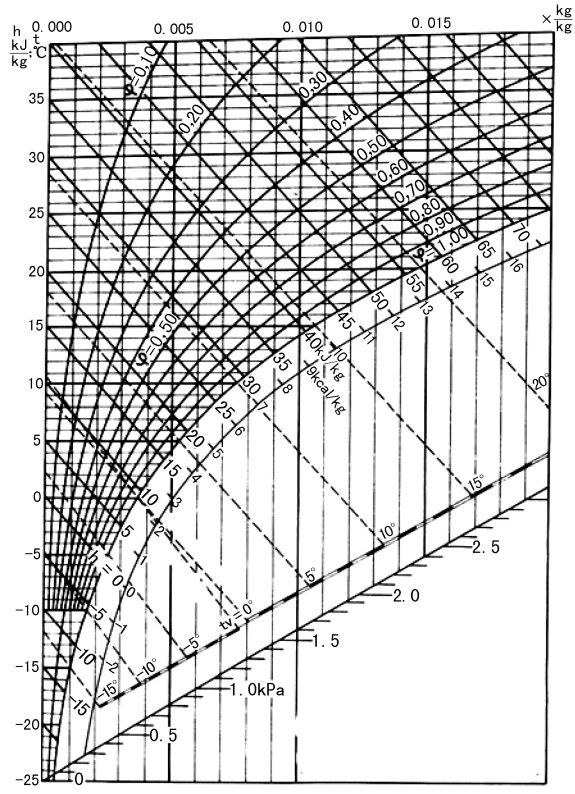


图4.8　焓熵图。焓熵图是焓湿图的一个变体，它以图形化的方式给出了气温、水分含量与焓之间的关系（ETB[2]已获得使用授权）

例 4.16　计算焓湿图中的空气性质

对于干球温度为 74°F与湿球温度为 67°F：

① 请估算空气的性质及它的焓。

② 如果以恒定的湿度比将气体加热至 84°F干球温度，请估算需要提供的热量。

③ 请估算从②中达到的状态点开始蒸发冷却的干球温度。

解：

① 在下面所示的焓湿图中找到干球温度 74°F与湿球温度 67°F的交点（A）。这个交点（A）是空气的一个“状态点”。

读图得出相对湿度为 70%，露点温度近似为 63.2°F（沿着水平线，向左运动，对着饱和温度的上边界曲线）。焓为 31.7 Btu/lb 干空气。

② 加热过程沿着恒定的湿度比线，水平地向右移动（B），读图得出焓近似为 34.2Btu/lb 干空气，相对湿度为 50%。

必需的热量：$q = (34.2 - 31.7)$ Btu/lb 干空气 = 2.5Btu/lb 干空气。

③ 在蒸发冷却期间，空气中含有的热量将水蒸发出来。该过程沿着恒定焓或恒定湿球温度线向上移动。当水含量（湿度）上升至相对湿度为 100% 的饱和点（C）时，气温（干球）降至 70°F。蒸发通常用于在热天冷却通风空气。

4.11　热传递

在以功的形式传递能量时，涉及的某些能量可以以热的形式消散掉。热和功是能量能够被传递的两种机制。根据定义，作用在一个物体上的功是由于物体外部参数的变化而传递给物体的能量（比如体积、磁化强度以及引力场中的质心）。热量是以其他任何方式传递给物体的能量。

热量通过传导、对流与辐射来传递。通过传导方式实现的热传递是基于分子的直接接触，多见于固体，而对流则是基于液体与气体的颗粒运动。通过辐射方式实现的热传递是基于温热物体向外界发散的电磁波。

传导方式的热传递率可以估算为

$$\dot{q} = -kA\frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x} \tag{4.41}$$

式中，$\dot{q}$ 为热传递率[J/s(W) 或 Btu/h]；k 为导热系数（单位为 J/ms°C或 Btu/fts°F）；A 为热传递的面积；$(T_2 - T_1)$ 为状态 2 与状态 1 之间的温差；Δx

为距离。

当热量从高温体向低温体流动时，（$T_2 - T_1$）的值为负。表 A1 列出了各种物质的导热系数值。表 4.6 为部分气体（在 1atm）、液体与固体的导热系数和热容量。

表 4.6 部分气体（在 1atm）、液体与固体的导热系数和热容量

物质	T/K	k/(W/m K)
气体		
氢气，H_2	300	0.1779
氧气，O_2	300	0.0265
二氧化碳，CO_2	300	0.0166
甲烷，CH_4	300	0.0342
NO	300	0.0259
液体		
水 H_2O	300	0.6089
乙醇，C_2H_5OH	300	0.1676
四氯化碳，CCl_4	350	0.0893
丙酮，$(CH_3)_2CO$	300	0.1274
汞，Hg	372.2	10.50
固体		
铅，Pb	977.2	15.1
铝，Al	373.2	205.9
铜，Cu	291.2	384.1
铸铁，Fe	373.2	51.9
钢	291.2	46.9
银	373.2	411.9

注：Bird 等人[1]；Griskey[4]。

对流方式的热传递率可以估算为

$$\dot{q} = hA(T_2 - T_1) \tag{4.42}$$

式中，h 为热传递系数（J/m^{2}s°C或 Btu/ft^{2}s°F）；热通量 $\dot{q}/A$ 为每单位截面积的热传递率。

所有物体均以光子在自由方向上以自由频率运动的形式来辐射能量。当光子达到另一个表面时，它们就可以被吸收、被反射或者被传输：

α = 吸收率——入射辐射吸收的分数比；

τ = 透光率——入射辐射传输的分数比；

ρ = 反射率——入射辐射反射的分数比。

从能量的角度考虑，这三个系数的总和必须归一：$\alpha + \tau + \rho = 1$。实际物体的辐射事实上要小于黑体。这要用辐射强度 ε 来测量，其定义为

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \tag{4.43}$$

式中，E 为来自实际物体的辐射量；E_b 是黑体在温度 T 时的辐射量。

陶瓷或氧化金属等粗糙表面的辐射强度值接近 1，而抛光金属或镀银反射体的辐射强度值则是 0.02 左右。黑体每单位面积的辐射能量可以估算为

$$E_b = \sigma T^4$$

其中，σ 为斯特藩-玻尔兹曼（Stefan-Boltzmann）常数，$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2K^4}$。

辐射强度的水平与吸收率的关系为

$$\frac{E}{E_b} = \varepsilon = \alpha \tag{4.44}$$

关系 $\varepsilon = \alpha$ 称为基尔霍夫（Kirchhoff）定律。它表明良好的辐射体同时也是良好的吸收体。灰色和平坦表面之间的热传递可以估算为

$$\dot{q} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1} \tag{4.45}$$

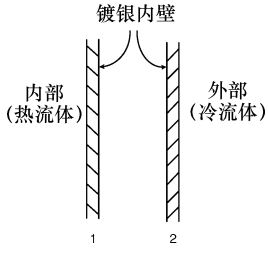
例 4.17　估算辐射热传递

使用一个热水瓶来估算保温瓶镀银内壁之间的热传递。镀银内壁温度为 $T_1 = 100\,^\circ\mathrm{C} = 373\mathrm{K}$，外界温度为 $T_2 = 20\,^\circ\mathrm{C} = 293\mathrm{K}$。辐射强度的值为 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.02$。

解：

斯特藩-玻尔兹曼常数，$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2K^4}$，$T_1 = 100\,^\circ\mathrm{C} = 373\mathrm{K}$，$T_2 = 20\,^\circ\mathrm{C} = 293.15\mathrm{K}$，$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.02$。

根据式（4.45）：$\dot{q} = \dfrac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1} = 6.9\ \mathrm{W/m^2}$



由于从内侧热壁到外侧冷壁的热传递很少，因此保温瓶是一个很好的绝热体。

4.12　熵

熵变可以根据下式来确定：

$$\mathrm{d}S = \frac{\delta q_{\mathrm{rev}}}{T} \tag{4.46}$$

式中，δq_{rev}为可逆热流动。

以积分的形式，热流动的可逆变化可以估算为

$$q_{\mathrm{rev}} = T\Delta S \tag{4.47}$$

当流体系统通过一个不可逆过程从状态 A 变化为状态 B 时，它的熵变就是 $\Delta S = S_{\mathrm{B}} - S_{\mathrm{A}}$。熵的一些重要性质如下：

- 熵是一个状态函数，而且是一种广延性质。
- $\mathrm{d}S \geqslant q/T$：不等式适用于一个自然（不可逆）变化，而等式则适用于一个可逆变化。
- 总熵变可以表示为 $\Delta S = \Delta S_{\mathrm{boundary}} + \Delta S_{\mathrm{internal}}$，其中 $\Delta S_{\mathrm{boundary}}$是由于系统与其外界的相互作用而产生的变化，$\Delta S_{\mathrm{internal}}$是由于系统之内的自然变化（比如一个化学反应）而产生的增加量，而且，对于不可逆变化它总是正值，而对于平衡态，该值则为零。
- 一个系统的熵为系统之内所有变化的熵之和。
- 一个隔热的闭口系统的熵在任何可逆变化中均保持恒定，在任何自然变化中均是增加，并在平衡时达到最大值。
- 对于任何可逆绝热变化，熵均保持恒定，因此 $\Delta S = 0$。
- 对于任何完全循环，熵变为零。

根据温度和压强，熵变可以估算为

$$\mathrm{d}S = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P \mathrm{d}T + \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T \mathrm{d}P = C_{\mathrm{p}} \frac{\mathrm{d}T}{T} - \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \mathrm{d}P \tag{4.48}$$

对于理想气体（$PV = RT$，而且 $\mathrm{d}V/\mathrm{d}T = R/P$），式（4.48）变为

$$\mathrm{d}S = C_{\mathrm{p}} \frac{\mathrm{d}T}{T} - R \frac{\mathrm{d}P}{P} \tag{4.49}$$

理想气体的熵变可以使用定热容量 $C_{\mathrm{p,av}}$对式（4.49）积分来估算：

$$\Delta S = \int_1^2 C_{\mathrm{p,av}} \frac{\mathrm{d}T}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = C_{\mathrm{p,av}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \tag{4.50}$$

对于不可压缩流体，式（4.49）变为

$$\mathrm{d}S = C_{\mathrm{p,av}} \frac{\mathrm{d}T}{T} \tag{4.51}$$

伴有熵传递的能量交换为热传递，不伴有熵传递的能量交换为功传递。

4.13　火用

一种能量来源伴随着它的能量值以及它的做功潜能（即有用能）。在一种能源中，能量的数量和质量能够用火用（Ex，Exergy）的概念来区分。火用为通过一个可逆过程使该能源与其外界达到平衡的最大理论可用功。火用也被称为可用性。能量的质量是在被称为基准状态的自然环境所确定的条件下产生功的能力。自然环境的温度和压强通常是标准状态值，比如 298.15K 和 101.31kPa。

在一个过程中所做的功取决于初始状态、最终状态以及在这些初始和最终状态之间的过程路径选择。在一个分析中，初始状态不是一个变量。在最终状态中，一个过程与环境达到热力学平衡，而且系统的温度和压强变得与环境相同。因此，该系统没有相对于环境的动能和势能。当一个过程以一种可逆的方式发生在初始状态和最终状态之间时，输出功达到最大化。在实际过程中，当该过程通过在初始状态和最终状态之间的熵增益最低的路径进行时，这就意味着它的输出功是最大化的。

动能和势能可以被完全转化为功，因此，一个系统动能和势能的火用等于下列动能和势能：

$$\Delta \mathrm{Ex}_{\mathrm{KE}} = m\frac{\Delta v^2}{2} \tag{4.52}$$

$$\Delta \mathrm{Ex}_{\mathrm{PE}} = mg\Delta z \tag{4.53}$$

不过，一个系统的焓 H 和内能 U 不是完全可用的。在一个过程中，闭口系统的火用变化为

$$\Delta \mathrm{Ex} = \Delta H - T_{\mathrm{o}}\Delta S \tag{4.54}$$

式中，Δ 表示初始状态和最终状态之间（基准状态）的差值；T_{o} 为参考温度。

流体流动的火用为

$$\dot{\mathrm{E}}\mathrm{x} = \dot{m}\left((H - H_{\mathrm{o}}) - T_{\mathrm{o}}(S - S_{\mathrm{o}}) + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z\right) \tag{4.55}$$

在一个开口系统中，流体流动的火用变化可以表示为

$$\Delta\dot{\mathrm{E}}\mathrm{x} = \dot{m}\left(\Delta H - T_{\mathrm{o}}\Delta S + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z\right) \tag{4.56}$$

同上，这里的标识符上加点表示每单位时间的数量。如果忽略动能和势能火用变化，那么式（4.56）就变为

$$\Delta\dot{\mathrm{E}}\mathrm{x} = \dot{m}(\Delta H - T_{\mathrm{o}}\Delta S) \tag{4.57}$$

热量（特别是在低温时）在火用中非常低，这是因为它转化为其他形式能量的效率很低。热量的有用（可用）功含量受限于卡诺（Carnot）因数 η_{Carnot}，

因此，可用的热量 $q_{\text{available}}$ 变为

$$\text{Ex}_{\text{heat}} = q_{\text{available}} = q\eta_{\text{Carnot}} = q\left(1 - \frac{T_{\text{C}}}{T_{\text{H}}}\right) \tag{4.58}$$

式中，T_{H} 和 T_{C} 分别为热区和冷区的温度。

式（4.58）表明基于热量的发电机的效率不会高于在热源 T_{H} 和冷源 T_{C} 之间的卡诺循环做功的效率。它可能会提高或者降低火用，因为火用不是一个守恒参数。

4.14　流体流动功

开口系统涉及跨边界的质量流动。维持连续流入或流出控制体积所需的功称为流体流动功。如果流体压强为 P，截面积为 A（见图4.9），施加于流体元之上的力为

$$F = PA \tag{4.59}$$

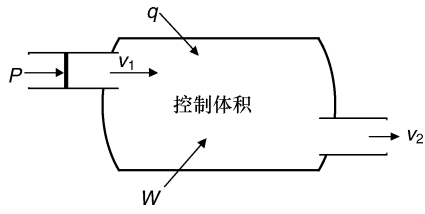


图4.9　热和功在控制体积与外界之间相互作用的流体流动：

$$\dot{m}\left(\Delta H + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z\right) = \dot{q} + \dot{W}_{\text{s}}\text{（在等压条件下）}$$

当力通过距离 L 作用时，流体流动功变为

$$W_{\text{f}} = FL = PAL = PV \tag{4.60}$$

在大多数实际过程中，流动可以近似为稳态的和一维的，那么，流体在稳态下进入或离开一个系统的总能量 E_{fluid} 可以估算为

$$\dot{E}_{\text{fluid}} = \dot{m}\left(\Delta U + PV + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z\right) \tag{4.61}$$

标识符上加点表示每单位时间的数量。在将 $U + PV$ 加起来之后可以得到焓 H，如式（4.7）所示：

$$\Delta H = \Delta U + PV$$

式（4.61）变为

$$\dot{E}_{\text{fluid}} = \dot{m}\left(\Delta H + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z\right) \tag{4.62}$$

对于流体流动系统来说，它的焓在工程中要比它的内能更为重要，因为流体

流动功被考虑在焓之内。流体流动的热和功之间的关系一般可以估算为

$$\dot{m}\left(\Delta H+\frac{\Delta v^2}{2}+g\Delta z\right)=\dot{q}+\dot{W}_s \tag{4.63}$$

习　　题

4.1　使用蒸汽表，请确定含水系统在以下条件下的状态。

T/°C	P/kPa	H_{vap}/(kJ/kg)	U_{vap}/(kJ/kg)	状态
175	30	2830.0	2623.6	
45.83	10	2584.8	2438.0	
450	2400	3352.6	3027.1	
100	98	2676.0	2506.5	

4.2　使用蒸汽表，请确定含水系统在以下条件下的状态。

T/°F	P/psia	H_{vap}/(Btu/lb)	U_{vap}/(Btu/lb)	状态
164	5.99	1134.2	1065.4	
500	20	1286.9	1181.6	
600	1000	1517.4	1360.9	
331.37	105	1188.0	1105.8	

4.3　使用蒸汽表，请确定含水系统在以下条件下的状态。

T/°C	P/kPa	V/(m^3/kg)	$H_{sat\ vap}$/(kJ/kg)	状态
60	19.92	5.50	2609.7	
110	143.27	1.21	2691.3	
340	8200	0.0280	—	
40	47.36	0.001	—	

4.4　使用蒸汽表，请确定含水系统在以下条件下的状态。

T/°C	P/kPa	x	H/(kJ/kg)	状态
120.2	200	0.7	2045.8	
80	47.36	1	2643.8	
150	476	0	632.1	
325	500	—	3116.4	

4.5 请确定含制冷剂 R-134a 的系统在以下条件下的状态。

T/°F	P/psia	H/(Btu/lbm)	状态
-10	16.67	95.0	
5	23.8	102.47	
30	40.78	20.87	
60	70	110.23	

4.6 使用蒸汽表，请确定含水系统在以下条件下的状态。

T/°C	P/kPa	V/(m^3/kg)	U/(kJ/kg)	状态
133.5	300	0.50	2196.4	
300	725	0.358	2799.3	
400	6500	0.043	2888.9	
211.1	1950	0.001	90046	

4.7 请确定一个含水系统在下表中缺失的性质值。

P/kPa	V/(m^3/kg)	U/(kJ/kg)	H/(kJ/kg)	x/(kg vap/kg tot)	状态
9.1		2250			
200				0.85	

4.8 请确定一个含纯 R-134a 的系统在下表中缺失的性质值。

T/°C	P/kPa	V/(m^3/kg)	U/(kJ/kg)	H/(kJ/kg)	x
30	836				
-45			204.51		
	300	0.054			
	1124			244.0	
65	1550				

4.9 将一个 50kg 的 0°C铜块（Cu）和一个 100kg 的 200°C铁块（Fe）放入在一个隔热空间中并相互接触，预测最终的平衡温度。

4.10 估算 100lb 水在 220psia 和 500°F下的内能与焓。

4.11 一个刚性容器中含有 500lb 的 230°F饱和蒸汽，请估算它的内能与焓。

4.12 请确定 100L 氢气在 600K 和 1atm 下的比内能。氢气的总焓为 19416J。假设氢气为理想气体。

4.13 当压强为 200kPa 的 0.75m^3 空气在一个等容过程中被从 20°C加热到 250°C时，请计算其内能变化。

4.14　当压强为 110kPa 的 15m^3 空气在一个等容过程中被从 30°C加热到 400°C时，请计算其内能变化。

4.15　当压强为 275kPa 的 1.5m^3 空气在一个等容过程中被从 150°C冷却到 20°C时，请计算其内能变化。

4.16　当压强为 150kPa 的 10m^3 空气在一个等容过程中被从 300°C冷却到 50°C，请计算其内能变化。

4.17　当压强为 250kPa 的 25.1m^3 二氧化碳在一个等容过程中被从 30°C加热到 350°C时，请计算其内能变化。

4.18　当压强为 150kPa 的 100m^3 二氧化碳在一个等容过程中被从 0°C加热到 500°C时，请计算其内能变化。

4.19　当压强为 250kPa 的 5m^3 二氧化碳在一个等容过程中被从 270°C冷却到 20°C时，请计算其内能变化。

4.20　当压强为 200kPa 的 52.8m^3 氮气在一个等容过程中被从 15°C加热到 700°C时，请计算其内能变化。

4.21　当压强为 200kPa 的 0.92m^3 氮气在一个等容过程中被从 300°C冷却到 30°C时，请计算其内能变化。

4.22　当压强为 20psia 的 32.5ft^3 氮气在一个等容过程中被从 75°F°C加热到 300°F，请计算其内能变化。

4.23　一个活塞-气缸装置中的过热水蒸气在 400°C等温条件下膨胀，压强从 1350kPa 变为 770kPa。请计算它的摩尔焓和摩尔内能的变化（单位为：kJ/mol）。

4.24　1mol 气体在一个等压过程（2atm）中从 0.03m^3 膨胀到 0.06m^3，请估算其内能变化（如果 $C_{v,av}=12.5$J/mol K）。

4.25　1mol 气体在 300K 的等温条件下从 0.03 膨胀到 0.06m^3，请估算气体的内能变化。

4.26　一个刚性大容器中盛有温度为 80°C的 70kg 水。如果其中 14kg 的水为液态，请估算该容器中水的压强与焓。

4.27　一个刚性大容器中盛有温度为 200°F的 40lb 水。如果其中 2.8lb 的水为液态，请估算该容器中水的内能与焓。

4.28　一个刚性容器充满 0.5lb 制冷剂 R-134a 在 $T=79.2$°F。如果 0.06lb 的制冷剂为液态，请估算制冷剂的内能与焓。

4.29　甲苯的热容量（单位为：Btu/lb mol°F）可以表示为 $C_p=20.869+5.293\times10^{-2}$T。请估算热容量（单位为：cal/g mol K），并估算如果 400g 甲苯被从 17°C加热到 48°C所必需的热量。

4.30　当氨被从 30°C加热到 150°C时，使用下面给出的理想气体热容量方程，请确定它的焓变和内能的变化（单位为：J/g mol）：$C_p^{ig}=R$（$3.578+3.02\times10^{-3}T$）（T 的单位为：K）（见表 B1）。

4.31　当空气被从 300K 加热到 750K 时，使用下面给出的 C_p 方程，请确定它的焓变和内能的变化（单位为：kJ/kg），$C_p^{ig}=R(3.355+0.575\times10^{-3}T)$（$T$ 的单位为：K）（见表 B1）

4.32　一个压强为 200kPa、温度为 300°C的二氧化碳（CO_2）、氮气（N_2）与氧气（O_2）

的理想气体混合物，CO_2、N_2 与 O_2 的摩尔含量分别为 10%、60% 与 30%。该混合物被加热至 600°C，请计算混合物的摩尔内能的变化。

4.33 12kg 苯被从过冷液态（$P_1 = 100\text{kPa}$，$T_1 = 300\text{K}$）加热到过热蒸汽态（$T_2 = 450\text{K}$，$P_2 = 100\text{kPa}$）。加热过程处于等压条件，请计算总焓 ΔH（单位为：kJ/kg）。假设正庚烷蒸汽是理想气体行为，恒定热容量为 85.29J/g mol K。使用安托尼和克劳休斯-克拉贝龙方程来估算正庚烷在 T_1 时的汽化热。

4.34 水被从过冷液态（$P_1 = 200\text{kPa}$，$T_1 = 300\text{K}$）加热到过热蒸汽态（$P_2 = 2400\text{kPa}$，$T_2 = 573\text{K}$），请计算该路径中各个步骤的摩尔 ΔH（单位为：kJ/kg）。

4.35 水被从过热蒸汽态（$P_1 = 250\text{psia}$，$T_1 = 460\,°\text{F}$）冷却到过冷液态（$P_2 = 15\text{psia}$，$T_2 = 140\,°\text{F}$），请计算该路径中各个步骤的摩尔 ΔH（单位为：Btu/lb）。

4.36 在一个稳态流动加热过程中，50kmol 甲醇被从过冷液态（300K，3bar）加热到过热状态（500kPa），请估算该过程的热流量。甲醇在 3bar 时的饱和温度为 368.0K。

4.37 1mol 气体在 300K 的绝热条件下，从 0.03m^3 膨胀到 0.06m^3，请估算该气体的内能变化。$C_{v,av} = 12.5\text{J/mol K}$。

4.38 一个活塞-气缸式装置含有 0.3kg 的制冷剂 R-134a 蒸汽（12°C）。该蒸汽在一个本质可逆的绝热过程中膨胀，直到温度达到 −3°C，请确定这个过程的功。制冷剂 R-134a 的恒定热容量 $C_{v,av} = 1.7\text{kJ/kg°C}$。

4.39 一个活塞-气缸式装置含有 0.5kg 的氮气（30°C）。该氮气在一个本质可逆的绝热过程中压缩，直到温度达到 42°C，请确定这个过程的功。氮气的恒热容量比 $\gamma = C_p/C_v = 1.4$。

4.40 10k mol 氢气从 25°C加热到 275°C，请估算其焓变（单位为：kJ）。

4.41 50kg 氢气从 −10°C加热到 100°C，请估算其焓变（单位为：kJ）。

4.42 25kg 氢气从 20°C冷却到 −50°C，请估算其焓变 ΔH（单位为：Btu）。

4.43 10kg 二氧化碳在一个稳态流动过程中以一个足够低的压强从 30°C加热到 300°C，在该压强下二氧化碳可以看成是理想气体。①请估算所需要的热量值，②请估算该过程的平均热容量（单位为：J/g mol K）。

4.44 在理想气体状态下，丙烷气体的摩尔热容量是温度（单位为：K）的函数：$C_p^{ig}/R = 1.213 + 28.785 \times 10^{-3}T - 8.824T \times 10^{-6}$（见表 B1）。将这个方程转化成 C_p 中温度单位为°C的方程。

4.45 在理想气体状态下，甲烷气体的摩尔热容量是温度（单位为：K）的函数：$C_p^{ig}/R = 1.702 + 9.082 \times 10^{-3}T - 2.164T \times 10^{-6}$（见表 B1）。将这个方程转化成 C_p 单位为 J/g°C的方程。

4.46 在理想气体状态下，甲烷气体的摩尔热容量是温度（单位为：K）的函数：$C_p^{ig}/R = 1.702 + 9.082 \times 10^{-3}T - 2.164T \times 10^{-6}$（见表 B1）。将这个方程转化成 C_p 单位为 J/g°C的方程。

4.47 温度为 25°C的 10kg 水在一个容积为 0.5m^3 的密闭容器中被加热到 120°C和 1000kPa。请估算其焓变与该容器中最终的蒸汽质量。

4.48 温度为 25°C的 22kg 水在一个容积为 2.6m^3 的密闭容器中被加热到 120°C和 1000kPa。请估算其焓变与该容器中的蒸汽质量。

4.49 估算 10lb 蒸汽在 120psia（质量为 27%）时的焓。

4.50　当压强为 25psia 的 150lb 氮气在一个等压过程中被从 50°F加热到 700°F时，请计算其焓变。热容量（单位为 Btu/lb mol°F）为

$$C_p^{ig} = 6.895 + 0.7624 \times 10^{-3} T - 0.7009 \times 10^{-7} T^2$$

4.51　当压强为 20psia 的 200lb 氮气在等压过程中被从 500°F冷却到 100°F时，请计算其焓变。热容量（单位为 Btu/lb mol°F）为 $C_p^{ig} = 6.895 + 0.7624 \times 10^{-3} T - 0.7009 \times 10^{-7} T^2$。

4.52　当压强为 20psia 的 500lb 氧气在等压过程中被加热从 60°F加热到 450°F时，请计算其焓变。热容量（单位为 Btu/lb mol°F）为 $C_p^{ig} = 6.895 + 0.7624 \times 10^{-3} T - 0.7009 \times 10^{-7} T^2$。

4.53　当压强为 20psia 的 265ft^3 二氧化碳在等压过程中被从 80°F加热到 360°F时，请计算其焓变。热容量（单位为 Btu/lb mol°F）为 $C_p^{ig} = 8.448 + 5.757 \times 10^{-3} T - 21.59 \times 10^{-7} T^2$。

4.54　当压强为 20psia 的 1150ft^{3}一氧化碳在等压过程中被从 250°F冷却到 75°F时，请计算其焓变。热容量（单位为 Btu/lb mol°F）为 $C_p^{ig} = 6.865 + 0.8024 \times 10^{-3} T - 0.7367 \times 10^{-7} T^2$。

4.55　当压强为 20psia 的 500lb 一氧化碳在等压过程中被从 50°F加热到 290°F时，请计算其焓变。热容量（单位为 Btu/lb mol°F）为 $C_p^{ig} = 6.865 + 0.8024 \times 10^{-3} T - 0.7367 \times 10^{-7} T^2$。

4.56　初始条件为 50°C和 1atm 的 10kg 二氧化碳在等压条件下被加热至 200°C。假定二氧化碳为理想气体，请估算它的内能与焓的变化。

4.57　一个 50ft^3 的刚性容器中充满了 150psia 的饱和蒸汽。随着热量通过容器向外传递，蒸汽被冷却下来，最终压强降至 20psia。请估算：①已经冷凝的蒸汽质量，②蒸汽的最终温度，③从蒸汽中传出的热量。

4.58　一个活塞-气缸式装置含有初始状态为 -10°C和 200kPa 的 R-134a。R-134a 经历等容过程被加热到 80°C，请估算它的功（单位为：kJ/kg）。

4.59　细胞的一次能源是称为葡萄糖的糖有氧氧化物（$C_6H_{12}O_6$），请估算葡萄糖氧化的标准反应热：

$C_6H_{12}O_6(s) + 6O_2(g) \rightarrow 6CO_2(g) + 6H_2O(g)$

4.60　某合成气体是 H_2 和 CO 的混合物。该合成气体的用途之一通过以下反应产生甲醇：$CO(g) + 2H_2(g) \rightarrow CH_3OH(g)$

估算其标准反应热。

4.61　请确定下列反应在 298.15K 时的标准反应热：

① $N_2(g) + 3H_2(g) \rightarrow 2NH_3(g)$

② $CaCO_3(s) \rightarrow CaO(s) + CO_2(g)$

4.62　估算丙烷燃烧的反应热：

$C_3H_8(g) + 5O_2(g) \rightarrow 3CO_2(g) + 4H_2O(g)$

4.63　估算乙烷燃烧的反应热：

$$C_2H_6 + \frac{7}{2}O_2 \rightarrow 2CO_2(g) + 3H_2O(g)$$

4.64　估算甲烷燃烧的反应热：

$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2(g) + 2H_2O(g)$

4.65　硝酸（HNO_3）是通过将氨氧化而产生的，请估算其标准反应热：$NH_3 + 2O_2 \rightarrow HNO_3 + H_2O$

4.66　估算甲烷与空气在等压条件下燃烧能够达到的最高温度。进入燃烧室的甲烷和空

气的初始条件为25°C和1atm。燃烧反应为

$CH_4(g) + 2O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 2H_2O(g)$

4.67 求以下化学反应的反应热，并请确定该是放热过程还是吸热过程：

$16H_2S(g) + 8SO_2(g) \rightarrow 16H_2O(l) + 3S_8(s)$

4.68 根据燃烧生成的水是汽态或者液态，燃料的热值也不同。燃料的高热值（HHV）是指它生成液态水的标准燃烧热，而低热值（LHV）则是指生成水蒸汽。请估算以纯甲醇所代表的天然气的 HHV 和 LHV：$CH_4(g) + 2O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 2H_2O(g)$

4.69 估算以民用燃料油所代表的纯正癸烷的 HHV 和 LHV。液态正癸烷的生成热为 -249.7kJ/mol：$C_{10}H_{22}(l) + 15.5O_2(g) \rightarrow 10CO_2(g) + 11H_2O(g)$

4.70 当反应产物为 $CO_2(g)$ 和 $H_2O(g)$ 时，25°C的 $C_6H_{12}(g)$ 的标准燃烧热是多少？

$C_6H_{12}(g) + 9O_2 \rightarrow 6CO_2(g) + 6H_2O(g)$

4.71 当反应产物为 $CO_2(g)$ 和 $H_2O(g)$ 时，25°C的 $6CH_3OH$ 的标准燃烧热是多少？反应为

$6CH_3OH(g) + 9O_2 \rightarrow 6CO_2(g) + 12H_2O(g)$

4.72 当燃烧产物为 $CO_2(g)$ 和 $H_2O(l)$ 时，请估算25°C的正戊烷气的标准燃烧热：

$C_5H_{12}(g) + 8O_2(g) \rightarrow 5CO_2(g) + 6H_2O(l)$

4.73 估算下列反应在25°C时的标准反应热：

① $4NH_3(g) + 5O_2(g) = 4NO(g) + 6H_2O(g)$

② $C_2H_2(g) + 1/2O_2(g) = 2(CH_2)O(g)$

③ $CH_3OH(g) + 1/2O_2(g) = HCHO(g) + H_2O(g)$

④ $C_2H_5OH(l) + O_2(g) = CH_3COOH(l) + H_2(g)$

4.74 一种民用燃料油的平均化学成分为 $C_{10}H_{18}$，在一个弹式量热计中与氧气完全燃烧。在25°C时测量的热量释放为43900J/g。量热计中的燃烧发生在等容条件下，产生液态水。当产物为 $H_2O(g)$ 和 $CO_2(g)$ 时，请估算该燃料油在25°C的标准反应热。

4.75 导出下面定比热理想气体的等熵关系：

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\gamma - 1/\gamma}$$

4.76 一个初始容积为 $0.1m^3$ 的活塞-气缸装置带有一个自由浮动活塞，内含压强为400kPa的0.6kg蒸汽。热量被传递给蒸汽直到温度达到300°C，压强保持恒定，请确定传递的热和功。

4.77 一个活塞-气缸系统内的1kg过热蒸汽初始状态为200°C和1300kPa。蒸汽在等压条件下被冷却直到其一半质量的蒸汽被冷凝，请估算最终温度和容积变化。

4.78 1.21lb的过热制冷剂R-134a，初始状态为150°F和140psia。制冷剂在等压条件下被冷却至5°F直到它变为压缩液体，请估算其内能和总体积的变化。

4.79 在一个冷凝器中使用冷却水将流量为0.12kg/s的制冷剂R-134a在等压条件下冷却至40°C。制冷剂的初始条件为1200kPa和50°C，请估算冷却水吸收的热量。

4.80 流量为 $500ft^3/s$ 的空气在近似大气压的燃烧过程中被从100°F加热到910°F，所需要的热传递率是多少？

4.81　一个炉子的炉壁由 6in 厚的耐火砖做成。如果炉壁内部为 1550°F，炉壁外部为 350°F，请估算每小时的热损失。耐火砖的导热系数为 0.81 Btu/h°F ft，并假设其保持恒定。

4.82　当温度为 $T_1 = 100°C$和 $T_2 = 20°C$的墙壁之间的热传递为 13.8W/m^2 时，请估算所需的 $k = 0.04$J/m s K 的软木绝缘体的厚度（Δx）。

4.83　一个电阻加热器装在一个隔热良好的容器中之内，用于加热 0.8kg 的水。来自 120V 电源的 0.2A 的电流流过加热器，加热 30min。容器中水的最初温度为 25°C，请估算加热 30min 之后水的温度。

4.84　一个电阻加热器装在一个隔热良好的容器中之内，用于加热 4kg 的水。来自 120V 电源的 0.2A 的电流流过加热器。容器中水的最初温度为 20°C，请估算水的温度达到 45°C所需的时间。

4.85　一个电阻加热器装在一个容器中之内用于加热水。来自 120V 电源的 0.4A 的电流流过加热器，加热 2h。容器中水的最初温度为 20°C。从容器到外界的热损失为 8.7kW，请估算加热 2h 之后传递给水的热量。

4.86　一个电阻加热器装在一个容器之内，用于加热 150kg 的水。来自 120V 电源的 0.6A 的电流流过加热器，加热 8h。从容器到外界的热损失为 38.2kW。容器中水的最初温度为 5°C，请估算加热 8h 之后传递给水的热量。

4.87　一个隔热的房间内有一个电阻加热器，用于加热空气。来自 120V 电源的 2A 的电流流过加热器，请估算加热 1h 之后传递给空气的热量。

4.88　一个隔热的房间内有一个电阻加热器，用于加热空气。来自 120V 电源的 2A 的电流流过加热器，加热 3h，请估算加热 3h 之后传递给空气的热量。

4.89　一个隔热的房间内有一个电阻加热器，用于加热空气。来自 120V 电源的 0.8A 的电流流过加热器，加热 2h。房间的热损失为 29.0kJ，请估算加热 2h 之后传递给空气的热量。

4.90　一个炉子的炉壁由 10in 厚的墙砖做成。如果炉壁内部为 2000°F，炉壁外部为 70°F，请估算每小时的热损失。墙砖的导热系数为 0.81Btu/h°Fft。

4.91　一块垂直板材接收太阳能辐射 1000W/m^2。板的背面是隔热的，热量通过空气流动的对流热传递而散失。热传递系数为 35W/m^{2}K，气温为 22°C。板材表面的吸收率为 0.6，请估算该板材表面的温度。

4.92　一个房间隔热框架墙的平均导热系数为 0.0318Btu/f ft °R[㊀]。墙壁为 6in 厚，面积为 160ft^2。室内气温为 70°F，室内空气和墙壁之间的对流热传递系数为 1.5Btu/h ft^2 °R。墙壁外部的对流热传递系数为 6Btu/h ft^2 °R，室外气温为 -10°F。辐射影响忽略不计，请确定在稳态下穿过墙壁的热传递率（单位为：Btu/h）。

4.93　一个刚性小圆筒形容器内含 1kg 湿空气，在总压强 1bar 之下空气的温度为 80°C。容器内的湿空气含有 0.150kg 的水蒸气，请确定容器内空气的相对湿度。

4.94　一个刚性小圆筒形容器内含 1kg 湿空气，在总压强 1bar 之下空气的温度为 75°C。容器内的湿空气含有 0.10kg 的水蒸气，请确定容器内空气的相对湿度。

4.95　一个水加热系统向一个温差为 20°C的循环水传递 230kW 的热量，请估算水的体积

㊀　此处原书有误，应为 0.0318Btu/h ft^2 °R。—译者注

流量和质量流量。

4.96 以100J/s的传热速率向初始温度为20°C的材料传递热量。在20°C的温度下，该材料是比热为2.4J/g°C的固体。这种材料的熔点为36°C，融化潜热为340J/g，液相的比热为4.1J/g°C。如果该材料的质量为0.5kg，多长时间它将达到40°C的最终温度？

4.97 一个容器内含处于平衡的乙醇和水。如果该液体的组成成分为35%乙醇，在汽相时，水的浓度是多少？在这些条件下，液体的百分比又是多少？

4.98 一个容器内含处于平衡的乙醇和水。如果系统开始为90%乙醇蒸气，最终为1%乙醇液体，那么混合焓的变化是多少？

参考文献

1. Bird RB, Stewart WE, Lightfoot EN (2002) Transport phenomena, 2nd edn. Wiley, New York
2. ETB (2011) Engineering Tool Box. http://www.engineeringtoolbox.com. accessed May 2011
3. Griffiths JF, Barnard JA (1995) Flame and combustion, 3rd edn. Chapma & Hall, New York
4. Griskey RG (2002) Transport phenomena and unit operations. A combined approach. Wiley, New York
5. Himmelblau DM, Riggs JB (2004) Basic principles and calculations in chemical engineering, 7th edn. Prentice Hall, Upper Saddle River
6. Jacobson MZ (2009) Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. Energy Environ Sci 2:148–173
7. Jarosinski J, Veyssiere B (2009) Combustion phenomena: Selected mechanisms of flame formation, propagation and extinction. CRC Press, Boca Raton
8. Metz B et al (2005) IPCC Special report on carbon dioxide capture and storage. Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge
9. Riedel L (1954) Eine Neue Dampfdruckformel. Chem Ing Tech 26:83–89
10. Smith JM, Van Ness HC, Abbott MM (2005) Introduction to chemical engineering thermodynamics, 7th edn. McGraw-Hill, New York
11. Vetere A (1991) The Riedel equation. Ind Eng Chem Res 30:2487–2492
12. Watson KM (1943) Thermodynamics of the liquid states, generalized prediction of properties. Ind Eng Chem 35:398–406

第 5 章　能 量 平 衡

5.1　平衡方程

根据能量守恒定律，流入一个系统的总能量必须等于从系统中流出的总能量。能量的流动可以采用各种形式，比如功、热、电以及光等。一个系统的总能量能够被细分，并且有多种分类方式。例如，有时候很方便区分势能（它是坐标的函数）与动能（它是坐标时间导数的函数）。将重力能、电能与热能相互区分开来也比较容易。

图 5.1 所示为一个质量和能量与外界相互作用的开口系统。特别是对于涉及流体流动过程的开口系统，单靠能量平衡无法完全描述该过程。因此，还需要使用质量、熵以及火用等其他平衡方程。这些平衡方程是分析闭口系统和开口系统的各种过程中能量相互作用的主要工具。质量和能量在一个过程中总是守恒的。不过，熵和火用不是守恒的，它们的平衡方程要考虑一个“源项”（见图 5.1b）[1,6]。源项主要是指一种性质的内部产生或消耗（如系统的质量、能量、熵与火用等）。例如，在一个系统的内部化学反应中，一种物质可以被消耗掉并可以释放出反应热。因此，化学反应作为除了系统与其外界在边界相互作用之外的内部变化之源。守恒方程没有源项，因此不同于平衡方程。在能量平衡计算中，主要是使用所有的质量、能量、熵以及火用的平衡方程或其组合。以下各节给出了稳态过程和非稳态过程的各种平衡方程公式，同时还给出了使用这些方程来描述闭口系统和开口系统中能量相互作用的例子。

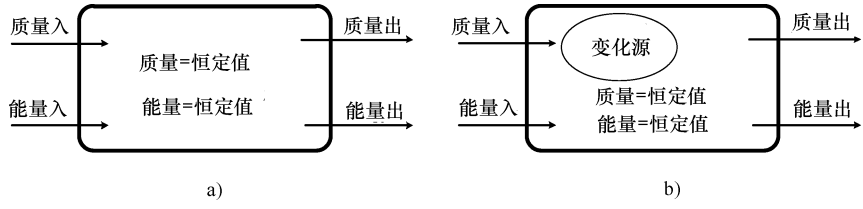


图 5.1　a）一个没有内源使得质量和能量发生变化的开口稳态流动过程；b）一个带有内源使得质量和能量、熵与火用等发生变化的开口稳态流动过程。例如，在一个系统的内部化学反应中，一种物质可以被消耗掉并可以释放出反应热。因此，化学反应作为除了系统与其外界在边界相互作用之外的内部变化源

5.2　质量平衡

在一个闭口系统中，质量是恒定的，因为边界并不允许物质在系统和外界之间传递。不过，在一个开口系统中，质量和能量可以相互发生作用，如图 5.1 所示。每单位时间流过一个截面的总质量称为质量流量$\dot{m}$。这里在符号上加点表示每单位时间的质量。管道内流体流动的质量流量与管道截面积 A、密度 ρ 以及流体平均流速 v 成正比，可以表示为

$$\dot{m} = vA\rho \tag{5.1}$$

在式（5.1）中，假定流体流动为一维流动，同时假定在截面处的流速为恒速。当一个系统内无化学反应时，非稳态流动过程的质量平衡可以表示为

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} + \sum_i (\dot{m}_i)_{\text{out}} - \sum_i (\dot{m}_i)_{\text{in}} = 0 \tag{5.2}$$

如式（5.2）所示，流入的总质量等于流出的总质量（单位相同），这被称为质量守恒，这种形式的质量守恒方程又称为连续方程[2]。质量守恒定律是自然界的一个基本规律。在稳态流动过程中，累积项（$\mathrm{d}m/\mathrm{d}t$）变为零，可以得到

$$\sum_i (\dot{m}_i)_{\text{out}} - \sum_i (\dot{m}_i)_{\text{in}} = 0 \tag{5.3}$$

例如，在一个稳态抽水过程中，泵的进水量等于泵的出水量。

许多工程设备（比如泵、喷管、压缩机以及水轮机等）均涉及单流体流动。通常，用下角 1 来表示入口处的流动状态，用下角 2 来表示出口处的流动状态，如图 5.2a 中泵的标识所示。

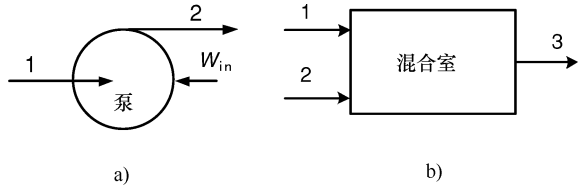


图 5.2　输入流和输出流

a）泵　b）混合室

那么，对于一个单流体流动系统来说，质量平衡可以表示为

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \text{ 或 } \rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \tag{5.4}$$

对于图 5.2b 所示的混合室，它有两个输入流和一个输出流，质量平衡则变为

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \tag{5.5}$$

物质的数量可以是质量、摩尔数，或者是与流体流动有关的体积流量。使用摩尔流量 $\dot{n}$，其稳态平衡方程可以表示为

$$\sum_i (\dot{n}_i)_{\text{out}} - \sum_i (\dot{n}_i)_{\text{in}} = 0 \tag{5.6}$$

一个管道或者风道中每单位时间流体流动的体积称为体积流量 $\dot{Q}$（单位为 m^3/s 或 ft^3/h），可以表示为

$$\dot{Q} = vA \tag{5.7}$$

式中，v 为流动的平均流速；A 为管道或风道的截面积。

质量和体积流量的关系为

$$\dot{m} = \rho \dot{Q} \tag{5.8}$$

对于不可压缩流体（如液体）来说，其密度保持恒定。不可压缩流体流动的质量守恒关系可以表示为

$$\sum_i (\dot{Q}_i)_{\text{out}} - \sum_i (\dot{Q}_i)_{\text{in}} = 0 \tag{5.9}$$

对于单不可压缩流体流动，其质量守恒关系可以简化为

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \text{ 或 } v_1 A_1 = v_2 A_2 \tag{5.10}$$

液体通常是不可压缩流体。有时候在合适的条件下，气体也可以被假设为不可压缩的。表 5.1 为几种特定情况下的质量平衡关系。

表 5.1　特定的质量和体积平衡方程

通用质量平衡方程	$\frac{dm}{dt} + \sum_i (\dot{m}_i)_{\text{out}} - \sum_i (\dot{m}_i)_{\text{in}} = 0$
通用摩尔平衡方程	$\frac{dn}{dt} + \sum_i (\dot{n}_i)_{\text{out}} - \sum_i (\dot{n}_i)_{\text{in}} = 0$
闭口系统 $\dot{m}=0$；$\dot{n}=0$；$\dot{Q}=0$	$\frac{dm}{dt}=0$；$\frac{dn}{dt}=0$；$\frac{dQ}{dt}=0$
开口稳态单流体流动	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$；$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$
单稳态不可压缩流体流动 ρ = 常数	$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$；$v_1 A_1 = v_2 A_2$

5.3　能量平衡

在开口系统和闭口系统中，能量能够以热 q 和功 W 的形式跨越边界。如果能量交换是由于系统和外界之间的温差而引起的，这种能量交换表现为热，否则就表现为功。当一个力通过一个距离作用于一个系统时，那么，能量就以功的形式被传递。热和功的相互作用改变了一个闭口系统的内能 ΔU，它可以估算为

$$\Delta U = q + W \tag{5.11}$$

根据国际纯粹与应用化学联合会推荐的（International Union of Pure and Applied Chemistry）现代能量符号规约，当从外界向系统传递热和功时，它们的符号为正；当从系统向外界传递热和功时，它们的符号为负。总内能是一种广延性质，因为它的值取决于系统中物质的数量。

能量在系统和外界之间的有限交换遵守能量平衡：

$$\Delta(\text{系统的能量}) + \Delta(\text{外界的能量}) = 0 \tag{5.12}$$

图 5.1 所示为系统和外界之间的质量和能量相互作用。由于能量是守恒的，系统之内的能量净变化率等于稳态下系统和外界之间的能量交换净率。流入和流出系统的“流”可以有多个。这些“流”可以具有与它们内能、动能与势能等形式有关的能量。所有这些形式的能量均会对系统能量的变化作出贡献[4]。

5.3.1　非稳态流动系统

当一个非稳态开口系统中没有化学反应发生时，它的通用能量平衡可以表示为

$$\frac{\mathrm{d}(mU)}{\mathrm{d}t} + \Delta\left(H + \frac{1}{2}v^2 + zg\right)\dot{m} = \dot{q} + \dot{W}_s \tag{5.13}$$

式中，U 为内能；H 为焓；v 为平均速度；z 为高于海平面的海拔；g 为重力加速度；$\dot{W}_s$ 表示不同于压强功（PV）的功，称为轴功。

每单位质量流量的能量传输率为 $[H + (1/2)v^2 + zg]\dot{m}$。

5.3.2　稳态流动系统

对于稳态流动过程，累积项 $\mathrm{d}(mU)/\mathrm{d}t$ 为零，稳态流体流动过程的通用能量平衡则变为

$$\dot{m}\left(\Delta H + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z\right) = \dot{q} + \dot{W}_s \tag{5.14}$$

使用英制工程系统单位，可以得到

$$\dot{m}\left(\Delta H + \frac{\Delta v^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c}\Delta z\right) = \dot{q} + \dot{W}_s \tag{5.15}$$

如果系统的动能和势能变化足够小，那么，式（5.15）则可以简化为

$$\sum_i (\dot{m}_i H_i)_{\text{out}} - \sum_i (\dot{m}_i H_i)_{\text{in}} = \dot{q} + \dot{W}_s \tag{5.16}$$

式（5.15）广泛地适用于许多热工系统。对于一个单流体流动过程，能量平衡变为

$$\dot{m}\Delta H = \dot{q} + \dot{W}_s \tag{5.17}$$

当能量以每摩尔数来表示时，比如 kJ/kmol 或 Btu/lb mol，式（5.16）中给出的能量平衡将变为

$$\sum_i (\dot{n}_i H_i)_{\text{out}} - \sum_i (\dot{n}_i H_i)_{\text{in}} = \dot{q} + \dot{W}_s \tag{5.18}$$

考虑一种可压缩流体在一个风道或管道中的绝热、稳态一维流动。如果无轴功存在且势能和动能的变化可以忽略不计，那么，式（5.17）可以简化为

$$\Delta H = 0 \tag{5.19}$$

式（5.11）~式（5.19）中所有的能量类型均需使用相同的能量单位。在国际单位制中，能量的单位是 J，其他单位是 Btu、ft lb_f 与 cal。表 5.2 为几种特定情况下的能量平衡方程。

表 5.2　特定的能量平衡方程

通用平衡方程	$\frac{\mathrm{d}(mU)}{\mathrm{d}t} + \Delta\left(H + \frac{1}{2}v^2 + zg\right)\dot{m} = \dot{q} + \dot{W}_s$
稳态流动过程	$\Delta\left(H + \frac{1}{2}v^2 + zg\right)\dot{m} = \dot{q} + \dot{W}_s$
开口稳态流动（动能和势能可以忽略不计）	$\sum_i (\dot{m}_i H_i)_{\text{out}} - \sum_i (\dot{m}_i H_i)_{\text{in}} = \dot{q} + \dot{W}_s$
开口稳态流动（动能和势能可以忽略不计）	$\sum_i (\dot{n}_i H_i)_{\text{out}} - \sum_i (\dot{n}_i H_i)_{\text{in}} = \dot{q} + \dot{W}_s$
稳态单流动过程（动能和势能可以忽略不计）	$\dot{m}\Delta H = \dot{q} + \dot{W}_s$
等焓过程	$\dot{m}\Delta H = 0$
绝热过程 $\dot{q} = 0$	$\dot{m}\Delta H = \dot{W}_s$
无功相互作用的过程	$\dot{m}\Delta H = \dot{q}_s$
闭口系统 $\dot{m} = 0$	$\Delta U = q + W$

质量和能量为守恒参数，而且它们不能被创造出来或被消灭掉。不过，质量和能量可以根据爱因斯坦提出的著名方程实现相互转换：

$$E = mc^2 \tag{5.20}$$

式中，c 为光速。

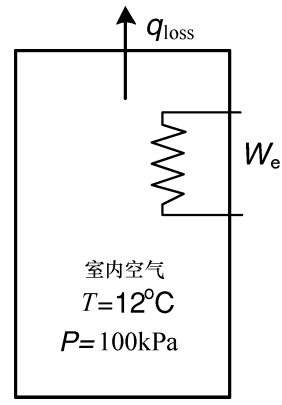
式（5.20）说明一个系统的质量与它的能量有关。不过，在实践中除了核反应以外，所有的能量相互作用的质量变化都极小，因此可以忽略不计。

例 5.1　闭口系统能量平衡计算

一个 60m^3 的房间使用一个电加热器来加热。室内空气的初始条件为 12°C和 100kPa。房间的热损失率为 0.2kJ/s。空气的恒定热容量为 $C_{\text{v,av}} = 0.72\text{kJ/kg}\,°\text{C}$。如果电加热器的供能速率为 3kW，请估算室温达到 22°C所需的时间。

解：

假设：气体为理想气体。这是一个室内空气闭口系统。



$C_{v,av}=0.72\text{kJ/kg}\,°\text{C}, R=8.314\text{Pa m}^3/\text{mol K}$

$P_1=100\text{kPa}$，$T_1=12\,°\text{C}\,(285\text{K})$，$V_{room}=60\text{m}^3$，$T_2=22°\text{C}(295\text{K})$，

$\text{MW}_{air}=29\text{kg/kmol}$

提供的电能：$W_e=3\text{kW}$，$q_{loss}=0.2\text{kW}$

$$q_{net}=(3-0.2)\text{kW}=2.8\text{kW}$$

室内空气的质量：

$$m_{air}=\text{MW}\ (\text{空气摩尔数})=\text{MV}\frac{P_1V_{room}}{RT_1}=73.4\text{kg}$$

能量平衡：$q_{net}\Delta t=(m\Delta U)_{air}=m_{air}C_{v,av}(T_2-T_1)(2.8\text{kW})(\Delta t)=(73.4\text{kg})(0.72\text{kJ/kg}\,°\text{C})(22-12)°\text{C}$

$\Delta t=189\text{s}=3.1\text{min}$

5.4　熵平衡

在每个过程中，一个熵效应在系统之内或通过系统的边界而存在。熵是一种广延性质，而且，如果一个系统包含几个部分，那么，总熵则等于每部分熵之和。熵不是守恒的，因此，在不可逆过程中会产生熵。热量和质量流动能够传递熵。熵不会通过功来传递。在一个流体流动系统中，熵的平衡方程为

$$\frac{\mathrm{d}(mS)}{\mathrm{d}t}=\Delta(\dot{m}S)+\sum_i\frac{\dot{q}_i}{T_i}+\dot{S}_{prod} \tag{5.21}$$

式中，$\Delta(\dot{m}S)$ 为流动质量的净熵变；$\dot{q}_i$为通过边界的流动流体 i 的热流量；T_i为 $\dot{q}_i$穿过边界传递热量时的温度；$\dot{S}_{prod}$为率熵增益并表示源项[1,5]。

在一个闭口系统中，式（5.21）变为

$$\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}=\sum_i\frac{\dot{q}_i}{T_i}+\dot{S}_{prod} \tag{5.22}$$

在稳态条件下，式（5.21）和式（5.22）简化为下列稳态形式：

$$0=\Delta(\dot{m}S)+\sum_i\frac{\dot{q}_i}{T_i}+\dot{S}_{prod}(\text{开口系统}) \tag{5.23}$$

$$0=\sum_i\frac{q_i}{T_i}+\dot{S}_{prod}(\text{闭口系统}) \tag{5.24}$$

在一个闭口系统中，如果发生了一个不可逆过程，熵会升高，而如果系统中发生的是一个可逆过程，熵则是不变的。伴有熵传递的能量交换表现为热传递，不伴有熵传递的能量交换表现为功的相互作用。后面将讨论熵增益的概念。表 5.3为几种特定情况下的熵平衡方程。

表 5.3　特定的熵平衡方程

单流动的通用平衡方程	$\frac{\mathrm{d}(mS)}{\mathrm{d}t}=\dot{m}(S_1-S_2)+\frac{\dot{q}}{T}+\dot{S}_{\mathrm{prod}}$
单流动的开口稳态系统	$0=\dot{m}(S_1-S_2)+\frac{\dot{q}}{T}+\dot{S}_{\mathrm{prod}}$
闭口系统 $\dot{m}=0$	$\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}=\frac{\dot{q}}{T}+\dot{S}_{\mathrm{prod}}$
绝热过程 $\dot{q}=0$	$\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}=\dot{S}_{\mathrm{prod}}$
可逆过程	$\dot{S}_{\mathrm{prod}}=0$
不可逆过程	$\dot{S}_{\mathrm{prod}}>0$

5.5　火用平衡

一个闭口系统的火用变化 ΔEx 可以估算为（见 çengel 和 Boles[1]，Demirel[3]）

$$\Delta Ex=\Delta H-T_{\mathrm{o}}\Delta S \tag{5.25}$$

式中，Δ 表示初始状态和最终状态之间（基准状态）的差异；T_{o} 为参考温度。

在一个开口系统中，一种流体流动的单位质量流量的火用变化可以表示为

$$\Delta Ex=\Delta H-T_{\mathrm{o}}\Delta S+\frac{\Delta v^2}{2}+g\Delta z \tag{5.26}$$

火用是一种广延性质和一个热力学势能。火用不是守恒的，而且在一个过程期间总会损失。火用平衡表明，一个系统在某个过程期间的火用变化等于系统在该过程中的火用净传递与因不可逆性而带来的火用损失之差。火用平衡可以表示为

$$\Delta\dot{E}x=\dot{E}x_{\mathrm{in}}-\dot{E}x_{\mathrm{out}}-\dot{E}x_{\mathrm{loss}} \tag{5.27}$$

$$\text{火用变化}=\text{输入火用}-\text{输出火用}-\text{火用损失} \tag{5.28}$$

在一个不可逆过程中，火用损失为正；而在一个可逆过程中，火用损失则为零。火用损失率 $\dot{E}x_{\mathrm{loss}}$ 表示总体非理想性损失，而且它直接与一个过程中由于不可逆性而产生的熵增益率成正比。火用损失率可以表示为

$$\dot{E}x_{\mathrm{loss}}=T_{\mathrm{o}}\dot{S}_{\mathrm{prod}} \tag{5.29}$$

这个方程表明，被传递给控制体积的火用传入速必须超过被传递出的火用传出速率，其差异就是由于不可逆性而带来的火用损失。

例 5.2　火用损失计算

在一个混合器中，将一个 110°C的饱和蒸汽流（蒸汽流 1）与一个 1000kPa 和 300°C的过热蒸汽流（蒸汽流 2）相混合。进入混合器的饱和蒸汽流量为 1.5kg/s。混合器中的混合产物（蒸汽流 3）为 350kPa 和 240°C。混合器运行于绝热条件之下。如果外界温度为 290K，请确定能量耗散率。

解：

假设动能和势能的影响可以忽略不计，这是一个稳定的绝热过程以及没有功相互作用。

根据蒸汽表可得出蒸汽的性质：

蒸汽流 1：饱和蒸汽（见表 F3）

$T_1 = 110°C$，$H_1 = 2691.3kJ/kg$，$S_1 = 7.2388kJ/kg\ K$

蒸汽流 2：过热蒸汽（见表 F4）

$P_2 = 1000kPa$，$T_2 = 300°C$，$H_2 = 3052.1kJ/kg$，$S_2 = 7.1251kJ/kg\ K$

蒸汽流 3：过热蒸汽（见表 F4）

$P_3 = 350kPa$，$T_3 = 240°C$，$H_3 = 2945.7kJ/kg$，$S_3 = 7.4045kJ/kg\ K$

混合器中稳态时质量、能量与熵平衡如下：

质量平衡：$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} \rightarrow \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$

能量平衡：$\dot{E}_{out} = \dot{E}_{in} \rightarrow \dot{m}_1 H_1 + \dot{m}_2 H_2 = \dot{m}_3 H_3$

熵平衡：$\dot{S}_{in} - \dot{S}_{out} + \dot{S}_{prod} = 0 \rightarrow \dot{m}_1 S_1 + \dot{m}_2 S_2 - \dot{m}_3 S_3 + \dot{S}_{prod} = 0$

组合使用质量平衡和能量平衡，可以估算过热蒸汽的流量$\dot{m}_2$ 为

$$\dot{m}_1 H_1 + \dot{m}_2 H_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) H_3$$

$$\dot{m}_2 = \frac{m_1 (H_1 - H_3)}{H_3 - H_2} = \frac{1.5kg/s(2691.3 - 2945.7)kJ/kg}{(2945.7 - 3052.1)kJ/kg} = 3.58kg/s$$

温水的质量流量$\dot{m}_3$：$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 1.5 + 3.58 = 5.08kg/s$

这个绝热混合过程的熵增益率为

$$\dot{S}_{prod} = \dot{m}_3 S_3 - \dot{m}_1 S_1 - \dot{m}_2 S_2$$

$$\dot{S}_{prod} = 5.08kg/s(7.4045) - 1.5kg/s(7.2388) - 3.58kg/s(7.1251) = 1.25kJ/s\ K$$

由于混合而带来的能量消散：

$$\dot{E}_{loss} = T_o \dot{S}_{prod} = 290K(1.25kJ/s\ K) = 362.5kW$$

5.6　流体流动过程

许多热工设备和热工过程长期运行在稳态条件之下。例如，在一个蒸汽发电厂中，使用泵、锅炉、汽轮机以及压缩机的各个过程一直稳定运行，直到系统停机维护为止，因此，它们被作为稳态流动过程来分析。

5.6.1　汽轮机、压缩机与泵

图 5.3 所示为一个稳定单流体流动汽轮机、压缩机与泵。在一个蒸汽发电厂中，加压热流体通过一个汽轮机，并对附连于汽轮机轴的汽轮机叶片做功。结果是汽轮机驱动发电机并产生功。功被传递给外界，而且其符号为负。热量在涡轮机中的传递影响通常可以忽略不计[1,6]。

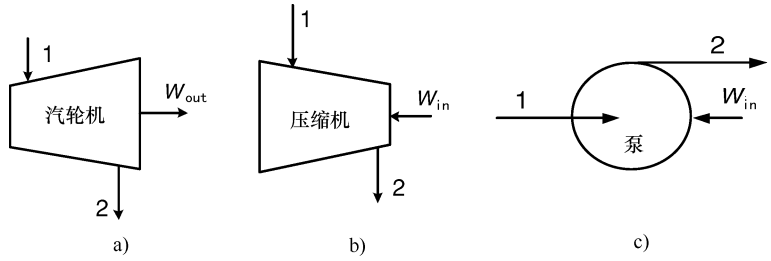


图 5.3　a）汽轮机，b）压缩机 以及 c）泵的示意图

压缩机、泵与风扇提高了流体的压强，因此，必须提供来自外界的功。泵使用的不可压缩流体是液体，而压缩机和风扇使用的可压缩流体则是气体。风扇只能轻微地提高气体的压强。所有这些装置中的势能变化通常可以忽略不计。汽轮机中的动能和热量影响通常也可以忽略不计。

对于一个泵来说，可以忽略其动能和势能，并假设它与外界没有显著的热量交换。对于汽轮机、压缩机与泵的能量平衡方程，可以得到以下类似关系：

$$\dot{m}\Delta H = \dot{m}(H_2 - H_1) = \dot{q} + \dot{W} \tag{5.30}$$

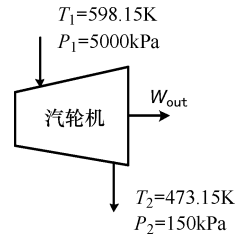
对于一个汽轮机来说，功被传递给外界，因此其符号为负。不过，压缩机与泵的功是从外界传入的，因此其符号为正。

例 5.3　汽轮机的计算

一个过热蒸汽流（蒸汽流 1）在一个汽轮机中从 5000kPa 和 325°C膨胀到 150kPa 和 200°C。蒸汽流量为 10.5kg/s。如果汽轮机产生的功率为 1.1MW，请确定损失到外界的热量。

解：

假设动能和势能的影响可以忽略不计，这是一个稳定过程。



根据蒸汽表（附录 F 中的表 F4）可得出蒸汽的性质：

蒸汽流 1 过热蒸汽：

$P_1 = 5000\text{kPa}$，$T_1 = 325°\text{C}(598.15\text{K})$，$H_1 = 3001.8\text{kJ/kg}$

蒸汽流 2 过热蒸汽：

$P_2 = 150\text{kPa}$，$T_2 = 200°\text{C}(473.15\text{K})$，$H_2 = 2872.9\text{kJ/kg}$

$$\dot{W}_{out} = -1100\text{kW} = -1100\text{kJ/s}$$

汽轮机的质量平衡和能量平衡如下：

质量平衡：$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in}$

能量平衡：$\dot{E}_{out} = \dot{E}_{in} \rightarrow \dot{m}_1 (H_2 - H_1) = \dot{q}_{out} + W_{out}$

热损失从能量平衡：

$$\dot{q}_{out} = -\dot{W}_{out} + \dot{m}_1(H_2 - H_1) = 1100\text{kJ/s} + (10.5\text{kg/s})(2872.9 - 3001.8)\text{kJ/kg}$$
$$= -253.45\text{kJ/s}$$

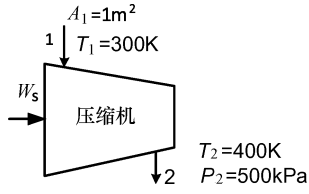
因为从系统中流出热量，所以符号为负。

例 5.4　压缩机计算

空气通过一根截面积为 1.0m^2 的进气管进入一个压缩机时为 100kPa，300K，流速为 2m/s。出口为 500kPa 和 400K。压缩机的热量损失速率为 5.2kW。如果空气为理想气体行为，求压缩机所需的功率（kW）。

解：

假设：压缩机处于稳态，空气为理想气体，而且气体从入口到出口的势能和动能变化可以忽略不计。



$R = 8.314\ \text{Pam}^3/\text{molK}$，$\text{MW} = 29\text{kg/kmol}$；$v_1 = 2\text{m/s}$，$A_1 = 1.0\text{m}^2$

$P_1 = 100\text{kPa}$，$T_1 = 300\text{K}$，$P_2 = 500\text{kPa}$，$T_2 = 400\text{K}$，$\dot{q}_{loss} = -5.2\text{kW}$

对于理想气体：$V_1 = \dfrac{RT_1}{P_1} = 0.025\text{m}^3/\text{mol}$

比容：$(1/\rho)_{air} = \dfrac{V_1}{MW_{air}} = 0.86\text{m}^3/\text{kg}$

空气质量流量：$\dot{m} = \dfrac{v_1 A_1}{(1/\rho)} = 2.32\text{kg/s}$

对于理想空气，从表 D1 可得：$H_2 = 400.9\text{kJ/kg}$，$H_1 = 300.2\text{kJ/kg}$

能量平衡：$\dot{m}(H_2 - H_1) - \dot{q} = \dot{W}$

$(2.32\text{kg/s})((400.9 - 300.2)\text{kJ/kg}) + 5.2\text{kW} = \dot{W} = 238.8\text{kW}$

这是压缩机所需的功率，而且其符号为正。

例 5.5　泵功率的计算

一个泵将 25°C液态水的压强从 100kPa 提高到 4000kPa。驱动流量为 $0.01\text{m}^3/\text{s}$ 的泵，其电动机所需要的最小马力是多少？

解：

假设泵处于绝热运行状态，而且非常接近等温状态，势能和动能变化可以忽略不计，水是不可压缩的。

$P_1 = 100\text{kPa}$，$T_1 = 298.15\text{K}$，$P_2 = 4000\text{kPa}$，$Q = 0.01\text{m}^3/\text{s}$

能量平衡：$\dot{q} + \dot{W}_{\text{pump}} = \dot{m}\Delta H$

对于绝热运行来说，（$\dot{q} = 0$）：$\dot{W}_{\text{pump}} = \dot{m}\Delta H$

因为水是不可压缩的，内能仅是温度的函数。当系统处于等温条件时，$\Delta U = 0$。

$\Delta H = \Delta U + \Delta(PV) = V\Delta P$

饱和液态水在 25°C的比容为：$V_1 = 0.001003\text{m}^3/\text{kg}$（见表 F3）

质量流量：$\dot{m} = \dfrac{Q}{V_1} = 9.97\text{kg/s}$

$$\dot{W}_{\text{pump}} = \dot{m}V_1(P_2 - P_1) = (9.97\text{kg/s})(0.001003\text{m}^3/\text{kg})(4000 - 100)\text{kPa}(\text{kJ/kPa m}^3)$$
$$= 39\text{kJ/s} = 39\text{kW} = 52.3\text{hp}\quad (1\text{hp} = 745.7\text{W})$$

5.6.2　喷管和扩散器

喷管和扩散器被广泛地用于喷气发动机。一个收缩喷管能够提高流体的流速，同时降低了流体的压强。一个扩散器（发散喷管）能够提高流体的压强，同时却降低流体的流速。在喷管和扩散器中，系统及其外界之间的热相互作用的速率通常很小，因此可以被视为绝热过程（$q = 0$）。喷管和扩散器通常不涉及做功，势能变化可以忽略不计，因此，分析这种过程只需要考虑动能的变化[6]。图 5.4a 为喷管和扩散器的示意图。

对于一个提升流速的收缩喷管，会考虑其动能，而且通常会忽略其势能。由于不存在做功的影响，因此能量平衡变为

$$\Delta\left(H + \frac{1}{2}v^2\right)\dot{m} = \dot{q} \tag{5.31}$$

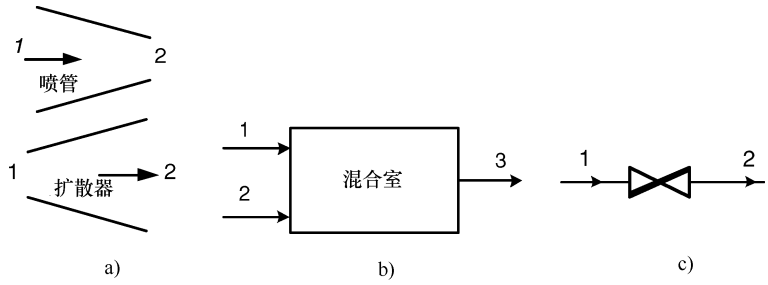
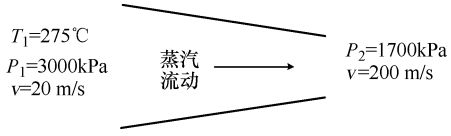


图 5.4　单个稳流过程

a）喷管和扩散器　b）混合室　c）节流阀

例 5.6　喷管计算

在一个收缩喷管中，蒸汽的流速从 20m/s 加速到 200m/s。蒸汽流入喷管时为 3000kPa 和 275°C，流出时为 1700kPa。喷管入口的截面积为 0.005m^2。喷管的热损失率为 76kJ/s。请估算蒸汽的质量流量与流出时的温度。



解：

假设：这是一个稳态流动。

入口：$P_1=3000\text{kPa}$，$T_1=275°\text{C}$，$v_1=20\text{m/s}$，$A_1=0.005\text{m}^2$，$\dot{q}_{\text{loss}}=-76\text{kJ/s}$

$H_1=2928.2\text{kJ/kg}$，$V_1=76.078\text{cm}^3/\text{g}=0.0761\text{m}^3/\text{kg}$（见表 F4）

出口：$P_2=1700\text{kPa}$，$v_2=200\text{m/s}$

蒸汽的质量流量：$\dot{m}_s=\dfrac{1}{v_1}A_1v_1=1.314\text{kg/s}$

能量平衡：$\dot{m}_s\left[(H_2-H_1)+\left(\dfrac{v_2^2}{2}-\dfrac{v_1^2}{2}\right)\left(\dfrac{1\text{kJ/kg}}{1000\text{m}^2/\text{s}^2}\right)\right]=\dot{q}_{\text{loss}}$

估算在出口处的焓 H_2：

$$(1.314\text{kg/s})\left[(H_2-2928.2)+\left(\frac{200^2}{2}-\frac{20^2}{2}\right)\left(\frac{1\text{kJ/kg}}{1000\text{m}^2/\text{s}^2}\right)\right]=-76\text{kJ/s}$$

$H_2=2850.56\text{kJ/kg}$，T_2（在 H_2 和 P_2 时）$=225°\text{C}$（近似值）（见表 F4）

5.6.3　混合室

在热工应用中，两个气流在一个混合室内混合是非常常用的。例如，一个热流与一个冷流混合会产生一个温流。质量守恒和能量守恒定律要求流入的质量流

量和焓变率之和等于流出的质量流量和焓变率之和。例如，对于图中 5.4b 中的混合室，质量平衡和能量平衡将变为

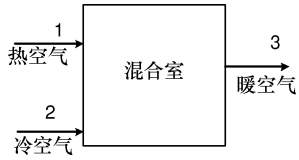
$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \tag{5.32}$$

$$\dot{m}_1 H_1 + \dot{m}_2 H_2 = \dot{m}_3 H_3 \tag{5.33}$$

混合室通常是隔热的，因此它们通常是绝热过程。动能和势能的影响可以忽略不计。混合室不涉及任何形式的做功[2,6]。

例 5.7　混合室的计算

在一个运行在绝热条件下的混合室中，900K 的热空气与 300K 的冷空气混合。冷空气的流量为 2.4kg/s，流出的暖空气为 700K。请估算热空气的流量。



解：

假设：这是一个稳态流动过程。动能和势能的变化可以忽略不计。混合室的热损失可以忽略不计。空气流为理想气体。

对于理想气体来说，它的焓取决于其温度。

流入的热空气：$\dot{m}_1$ = 未知；$T_1 = 900\text{K}$；$H_1 = 933.0\text{kJ/kg}$（见表 D1）

流入的冷空气：$\dot{m}_2 = 2.4\text{kg/s}$；$T_1 = 300\text{K}$；$H_2 = 300.2\text{kJ/kg}$（见表 D1）

出口气流：700K 和 $H_3 = 713.3\text{kJ/kg}$ 的暖空气（见表 D1）

能量平衡和质量平衡为

$$\dot{m}_1 H_1 + \dot{m}_2 H_2 = \dot{m}_3 H_3$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

将上述方程组合运算可得热空气的质量流量：

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \frac{H_3 - H_2}{H_1 - H_3} = (2.4\text{kg/s})\left(\frac{713.3 - 300.2}{933.0 - 713.3}\right) = 4.51\text{kg/s}$$

5.6.4　节流阀

在一个节流阀中（见图 5.4c），流体流过一个动能和势能的变化可以忽略不计的限制结构，比如孔、部分闭合的阀门、毛细管道或者多孔结构等。节流阀会在不涉及任何做功的情况下导致一个相当大的压降。节流阀通常运行在绝热条件下[1]。在没有热传递或者热传递可以忽略不计时，单个稳定流动节流的能量平

衡方程变为

$$H_1 = H_2 \tag{5.34}$$

因为焓值在入口和在出口处是相同的，所以，节流阀被称为一个等焓过程。这个方程也可以表示为

$$\text{内能} + \text{压力能} = \text{常量} \tag{5.35}$$

$$(U + PV)_1 = (U + PV)_2 = \text{常量} \tag{5.36}$$

由于理想气体的焓取决于温度，节流过程并不会改变一种理想气体的温度。不过，对于大多数实际气体来说，焓值不变下的压降通常会导致其温度降低。如果一个湿蒸汽被节流至一个非常低的压强，液体就会被蒸发，而且蒸汽可能会变为过热状态。对饱和液体节流可能会引起部分液体的汽化（或闪蒸），由此产生饱和蒸汽和液体的混合物。对于表面暴露较大的节流阀（如毛细管道），热量传递将会非常显著。

节流阀中的能量可以保持不变，而火用则会因为流体的膨胀而损失。

例 5.8　节流过程的计算

① 一个 200°C的蒸汽流被从 600kPa 节流至 101.32kPa。请估算节流之后的蒸汽温度。

② 干度为 0.96 的湿蒸汽被从 1200kPa 节流至 101.32kPa。请估算节流之后蒸汽的焓与温度。



解：

假设：在节流过程中，没有热传递发生，而且动能和势能的变化可以忽略不计

根据表 F4 查得的数据如下：

① 入口：$P_1 = 600\text{kPa}$，$T_1 = 200°\text{C}$，H_1（600kPa，200°C）$= 2849.7\text{kJ/kg}$

出口：$P_2 = 101.32\text{kPa}$

对于绝热节流：$H_1 = H_2$

根据表 F4 查得：T_2（101.32kPa，2849.7kJ/kg）$= 187.1°\text{C}$（在插值之后）

温度下降（$\Delta T = 2.9°\text{C}$）很小。

② 将湿蒸汽节流到较低的压强可以导致液体蒸发，而且蒸汽变为过热。

入口：湿蒸汽处于饱和态：$P_1 = 1200\text{kPa}$，$T_{\text{sat}} = 187.9°\text{C}$，$x = 0.96$（见表 F3）

$H_{1\text{sat vap}} = 2782.7\text{kJ/kg}$；$H_{1\text{sat liq}} = 798.4\text{kJ/kg}$（根据表 F3 可得）

$H_1 = (1 - x)\ H_{1\text{sat liq}} + xH_{1\text{sat vap}} = 2683.5\text{kJ/kg}$

出口：$P_2 = 101.32\text{kPa}$

T_2（101.32kPa，2683.5kJ/kg）= 103.6°C。

因为在 101.32kPa 时，$T_2 > T_{2sat}$，节流蒸汽为过热状态。

温度下降（$\Delta T = 84.3$°C）相当大，这是由于湿蒸汽之内的液体蒸发而导致的。

例 5.9　制冷剂的节流

在一个冰箱内，制冷剂 R-134a 作为 85.8psia 的饱和液体流入一个节流阀并被节流至 18.8psia。请估算出口处制冷剂的干度与温度下降值。



解：

入口条件：饱和液体：$P_1 = 85.8$psia，$T_1 = 70$°F，$H_1 = 33.9$Btu/lb（见表 E1）

出口条件：饱和液体和蒸汽的混合物 $P_{2sat} = 18.8$psia，$T_{2sat} = -5$°F，$H_{2sat\ liq} = 10.1$Btu/lb，$H_{2sat\ vap} = 101.0$Btu/lb（见表 E1）

节流过程：$H_1 = H_2 = 33.9 = (1-x)\ H_{2sat\ liq} + xH_{2sat\ vap}$

饱和混合物的干度：$x = \dfrac{m_{vap}}{m_{total}} = \dfrac{33.9 - 10.1}{101 - 10.1} = 0.25$

在节流过程之后，25.0% 的饱和液体被蒸发。

温度下降：$\Delta T = T_2 - T_1 = (-5 - 70)$°F = −75°F。

5.6.5　热交换器

在混合室中，热流体和冷流体实现混合，而且热量从热流体交换给冷流体。而在热交换器中（比如冷凝器），热流体和冷流体在没有混合的情况下进行热量交换。图 5.5 所示为一个典型的管壳式热交换器。例如，在管道侧，冷流 3 流入并以热流 4 流出管道。另一方面，热流 1 流入壳侧并作为流 2 流出。热交换器可以使用各种设计形式，比如双管式和管壳式，并被广泛地应用于热工系统[2]。质量守恒和能量守恒定律要求流入的质量流量和焓变率之和等于流出的质量流量和焓变率之和。例如，对于图 5.5 所示的热交换器，其质量平衡和能量平衡变为

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \text{ 和 } \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \tag{5.37}$$

$$\dot{m}_1(H_2 - H_1) = \dot{m}_3(H_4 - H_3) \tag{5.38}$$

热交换器不涉及热流体与冷流体的功的相互作用，而且在运行时，其动能和势能的变化通常可以忽略不计。

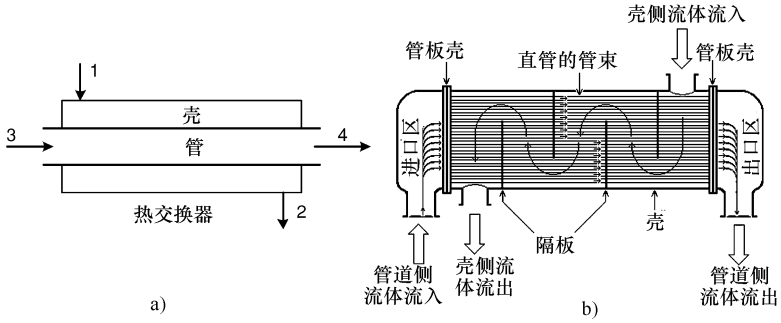
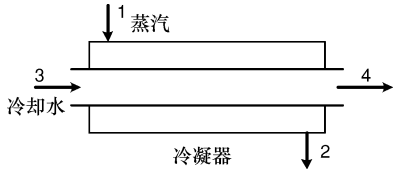


图 5.5　a）一个典型的热交换器示意图，其中热流体和冷流体相互不混合，b）一个管壳式热交换器的示意图。隔板用于帮助实现管束周围的壳侧流体分配

例 5.10　热交换器的计算

使用冷却水对一个冷凝器中的蒸汽进行冷却。该蒸汽流入冷凝器时为 20kPa，干度为 0.9，而且流出的饱和液体为 20kPa。该蒸汽流量为 3kg/s。冷却水流入冷凝器时为 18°C，流出时为 40°C。冷却水的平均热容量为 $C_{p,av}=4.2\text{kJ/kg°C}$。请估算冷却水的质量流量。



解：

假设：这是一个稳态系统。动能和势能的变化可以忽略不计。

冷却水：$T_3=18°\text{C}$，$T_4=40°\text{C}$，$C_{p,av}=4.2\text{kJ/kg°C}$

蒸汽流量：$\dot{m}_s=3\text{kg/s}$

蒸汽是饱和液体和蒸汽的混合物：$P_1=20\text{kPa}$，$x_1=0.90$

$H_{1\text{sat liq}}=251.4\text{kJ/kg}$，$H_{1\text{sat vap}}=2609.7\text{kJ/kg}$（见表 F3）

$H_1=(1-x_1)\ H_{1\text{sat liq}}+xH_{1\text{sat vap}}=2373.9\text{kJ/kg}$

出口：饱和液体 $P_2=20\text{kPa}$，$H_2=251.4\text{kJ/kg}$（见表 F3）

能量平衡：冷却水带走的热量 = 蒸汽损失的热量

$$\dot{m}_w C_{p,av}(T_4-T_3)=-\dot{m}_s(H_2-H_1)$$

$$\dot{m}_w=\dot{m}_s\frac{(H_1-H_2)}{C_{p,av}(T_4-T_3)}=(3\text{kg/s})\left(\frac{2373.9-251.4}{(4.2\text{kJ/kg°C})(40-18)°\text{C}}\right)=69.24\text{kg/s}$$

5.6.6　管道和风道流动

使用管道和风道来传输流体在很多流体流动过程中获得广泛应用。流过管道和风道的流体大多是处于稳态流动条件之下。在标准工作条件下，管道和风道流动的热相互作用可以是相当大的，特别是对于长管道和风道来说，更是如此。例如，内有热流体流动的管道必须是隔热的，用以减少流体在传输期间损失到外界的热量。

流体流入管道和风道的流速通常很低，而且其动能变化可以忽略不计，当截面积保持恒定而且热效应很小时，确实如此。不过，当气体流动的风道截面积变化时，其动能变化可以是相当大的。当流体流入一个管道或者风道时，如果其高度变化很大，那么，其势能变化也可以是相当大的。

5.7　循环过程中的能量平衡

上面描述的各个过程大部分是使用卡诺循环、热泵或者制冷循环等一些重要的热循环过程的一部分。这些热循环过程多用于发电与暖通空调（HVAC）等目的[1,6]。后面将给出卡诺循环的实用能量平衡方程。

对于一个使用卡诺循环将热能转化为功的燃料发电厂来说，常用的热源为煤、天然气或者石油的燃烧。图 5.6 描述了卡诺循环内的主要过程。这些主要过程如下：

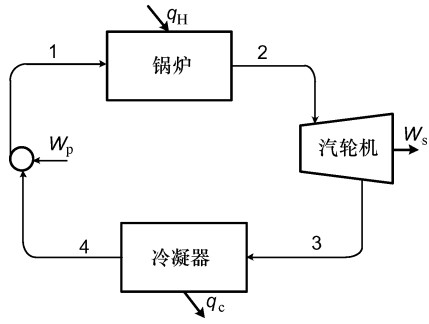


图 5.6　典型的过程在一个卡诺循环中来产生功

- 过程 4-1：水被泵从低压抽到高压；泵需要很小的输入能量。
- 过程 1-2：高压液体进入锅炉，在该锅炉中通过一个外部热源对它进行等压加热，并使之变为干饱和蒸汽。所需的输入能量可以使用焓-熵图方便求得。
- 过程 2-3：干饱和蒸汽通过一个汽轮机膨胀，产生功率。这样会降低该蒸汽的温度和压强，并会出现部分冷凝。

• 过程3-4：湿蒸汽流入一个冷凝器，在该冷凝器中，它被等压冷凝变为饱和液体以开始一个新循环。

在一个卡诺循环中，泵、汽轮机、热量增加（在锅炉中）与热量损失（在冷凝器中）将是等熵的，因此实现了网络输出的最大化。根据过程分析可以得出下面的能量平衡方程：对于流体的单位质量流量来说，泵所需的功率 $W_{p,in}$ 变为

$$W_{p,in} = V_4(P_1 - P_4) \tag{5.39}$$

式中，V_4 为状态4时（饱和液态水）的比容；P_i 为状态 i 时的压强。

状态1时的焓值 H_1 为

$$H_1 = H_4 + W_{p,in} \tag{5.40}$$

向锅炉中加压水输入的热量 q_{in} 为

$$q_{in} = (H_2 - H_1) \tag{5.41}$$

冷凝器释放的热量 q_{out} 为

$$q_{out} = (H_4 - H_3) \tag{5.42}$$

产生的净功值 W_{net} 为

$$W_{net} = (q_{in} - q_{out}) \tag{5.43}$$

这里，热量输入和热量输出使用的是绝对值。产生功的符号为负。发电中使用这些方程的一些例子将在6.4节中给出。

习　　题

5.1　针对处于稳态流动运行的：①泵；②燃气轮机；③空气压缩机；④喷管；⑤节流阀，分别建立一个简单能量平衡公式。

5.2　对温度为400°C的1kg铜锭进行热处理，在初始温度为15°C的50L油槽中淬火。假设与外界无热交换，请确定铜锭和淬火用油达到热平衡时的温度。数据：$C_{v,copper} = 0.386kJ/kg\ K$，$C_{v,oil} = 1.8kJ/kg\ K$，$\rho_{copper} = 8900kg/m^3$，$\rho_{oil} = 910kg/m^3$。

5.3　使用容积为 $30m^3$ 的隔热容器储存排出的蒸汽。该容器内含温度为30°C的 $0.01m^3$ 液态水，与水蒸气达到平衡，请估算该容器内部的能量。

5.4　过热蒸汽流以0.6 lb/s的流速流过加热器。蒸汽为100psia和380°F。如果该电加热器为等压条件下的蒸汽提供37.7Btu，请估算蒸汽的最终温度。

5.5　一个 $4ft^3$ 容器内含的过热蒸汽为1lb和120psia。该容器在等压条件下被加热。增加的热量为200Btu，请估算蒸汽在加热过程之后的温度。

5.6　使用一个电加热器来加热 $60m^3$ 的房间。室内空气的初始状态为12°C和100kPa。房间的热损失率为0.2kJ/s。如果电加热器提供3kW的热量，请估算室温达到22°C所需的时间。

5.7　一个1kW加热器用于房间加热，房间大小为（3m × 4.5m × 4m）。房间的热损失为0.15kW，压强始终为大气压。室内空气可以假设为理想气体。空气的恒定热容量为 $C_{v,av}$ =

0.72kJ/kg°C，初始室温为290K，请确定10min之后房间的温度。

5.8 对一个容器中的10 lb空气进行加热。空气的初始状态为40psia和100°F。在加热之后，空气压强变为60psia，请估算被传递的热量。气体的热容量为0.171Btu/lb°F，并在加热过程期间保持恒定。

5.9 一个2.0m^3容器充满200kPa和500K的氢气（H_2）。氢气被冷却直到它的温度降至300K，请估算从容器中吸收走的热量。氢气的热容量为$C_{v,av}=10.4$kJ/kg°C，并在加热过程期间保持恒定。

5.10 使用一个电阻加热器在30min之内将房间从17°C加热到22°C。该房间的大小为4m×4m×5m。室内空气为大气压。房间的热损失可以忽略不计，请估算产生这种温度变化所需的功率。

5.11 一个房间大小为5m×5m×6m，使用一个提供8000kJ/h的辐射体的进行加热。该房间的热损失为800kJ/h。气体的最初状态为15°C，请估算将房间加热至24°C所需的时间。

5.12 使用一个2kW电加热器来加热大小为（3m×4.5m×4m）的房间。房间的热损失可以忽略不计，压强始终为大气压。室内空气可以假设为理想气体，热容量为29J/mol K。初始室温为290K，请确定房间内温度的提升。

5.13 一个电阻加热器装在一个隔热容器之内，用于加热20kg水。来自120V电源的0.4A的电流流过加热器。容器中水的最初温度为10°C，请估算水温达到60°C所需的时间。

5.14 一个电阻加热器装在一个隔热容器之内，用于加热5kg水。来自120V电源的0.8A的电流流过加热器，加热2h。从容器到外界的热损失为15.6kW。容器中水的最初温度为30°C，请估算水在加热2h之后的温度。

5.15 一个电阻加热器装在一个隔热容器之内，用于加热150kg水。来自120V电源的0.6A的电流流过加热器，加热8h。从容器到外界的热损失为38.2kW。容器中水的最初温度为5°C，请估算水在加热8h之后的温度。

5.16 一个电阻加热器装在一个隔热的120m^3房间之内，用于加热房间内的空气。来自120V电源的2A的电流流过加热器。空气的初始状态为15°C和100kPa，请估算室温达到21°C所需的时间。

5.17 一个电阻加热器装在一个隔热的85m^3房间之内，用于加热房间内的空气。来自120V电源的2A的电流流过加热器，加热3h。空气的初始状态为20°C和100kPa，请估算空气在加热3h之后的温度。

5.18 一个电阻加热器装在一个隔热的105m^3房间之内，用于加热房间内的空气。来自120V电源的0.8A的电流流过加热器，加热2h。空气的初始状态为17°C和100kPa，房间的热损失为29.0kJ，请估算空气在加热2h之后的温度。

5.19 在一个发电厂中使用一个冷凝器，通过使用冷却水冷凝从汽轮机中排出的蒸汽。冷却水温度升高12°C。排放的蒸汽流入冷凝器时为10kPa，干度为0.95，在出口处为等压条件下的饱和液态水。如果蒸汽流量为5kg/s，请估算冷却水的流量。

5.20 在一个发电厂中使用一个冷凝器，通过使用流量为160kg/s冷却水冷凝从汽轮机中排出的蒸汽。流入冷却水的温度为15°C。排放的蒸汽流入冷凝器时为10kPa，干度为0.95，在出口处为等压条件下的饱和液态水。如果排放的蒸汽流量为6.5kg/s，请估算冷却水在出口

处的温度。

5.21 20lb 制冷剂 R-134a 在冷却环内流动，并被空气流所冷却。制冷剂进入冷却环时为 140°F和 140psia，流出时为 140psia 的饱和蒸汽。空气进入热交换器时为 14.7psia 和 480 °R。气体的体积流量为 150ft^3/s，请估算出口空气的温度。

5.22 5lb 制冷剂 R-134a 在冷却环内流动，并被空气流所冷却。制冷剂进入冷却环时为 200°F和 100psia，流出时为 100psia 的饱和蒸汽。空气进入热交换器时为 14.7psia 和 480 °R。气体的体积流量为 250ft^3/s，请估算出口空气的温度。

5.23 在一个冷凝器中使用冷却水对制冷剂 R-134a 进行冷却。制冷剂流入冷凝器时为 1000kPa 和 90°C，流出时为 1000kPa 和 30°C。流量为 2.0kg/s 的冷却水进入冷凝器时为 20°C，流出时为 27°C，请估算制冷剂的质量流量。

5.24 在一个冷凝器中使用冷却水对一个蒸汽流进行冷却。蒸汽流入冷凝器时为 20kPa，干度为 0.9，而且流出的饱和液体为 20kPa。蒸汽流量为 3kg/s。冷却水流入冷凝器时为 18°C，流出时为 26°C，请估算冷却水的质量流量。

5.25 在 400kPa 下，20°C的压缩液态水和 150°C的过热蒸汽混合流入在绝热条件下运行的混合室之内。液态压缩水的流量为 12kg/s。流出时为 400kPa 的饱和液态水，请估算过热蒸汽的流量。

5.26 一个流量为 50kg/s 的过热蒸汽流状态为 150°C和 200kPa，它与另一个状态为350°C和 200kPa 过热蒸汽流在一个运行于绝热条件下的混合室中混合。流出的过热蒸汽为 225°C和 200kPa，请估算过热蒸汽在 350°C和 200kPa 时的流量。

5.27 80°C的热水与 20°C的冷水在一个运行于绝热条件下的混合室中混合。冷水的流量为 15.0kg/s。流出的温水为 45°C和 100kPa，请估算热水的流量。

5.28 900 °R的热空气与 520 °R的冷空气在一个运行于绝热条件下的混合室中混合。冷空气的流量为 24 lbmol/s。流出的暖空气为 700 °R，请估算热空气的流量。

5.29 一个状态为 300°C和 300kPa 的过热蒸汽流与流量为 4kg/s 的 20°C液态水在一个运行于绝热条件下的混合室中混合。混合后流出时为 60°C和 300kPa，请估算过热蒸汽的流量。

5.30 一个开口给水加热器在蒸汽发电厂中以稳态运行，进口处为 $T_1 = 40$°C和 $P_1 = 7$bar。状态为 $T_2 = 200$°C和 $P_2 = 7$ bar 的水蒸气进入二级进气口。出口为饱和液态水，$P_3 = 7$bar，请估算这两种蒸汽的质量流量之比。

5.31 起初，如下所示的混合容器含有 100kg 水，水温为 25°C。随后，两个其他的进水流 1 和进水流 2 进行加水，并通过出水流 3 排水。容器中的水充分混合，而且温度保持均匀，并等于出水流 3 的温度。进水流 1 的流量为 20kg/h，温度为 60 °C，而进水流 2 的流量为 15kg/h，温度为 40°C。出水流的流量为 35kg/h，请确定在混合容器中依赖于时间的水温。

5.32 在一个混合器中，将一个 110°C的饱和蒸汽流（蒸汽流 1）与一个状态为 1000kPa 和 300°C过热蒸汽流（蒸汽流 2）相混合。饱和蒸汽进入混合器时的流量为 1.5kg/s。从混合器中得到的混合产物（蒸汽流 3）为 350kPa 和 240°C。混合器的热损失率为 2kW。如果外界为 300K，请确定能量耗散率。

5.33 在一个混合器中，将一个状态为 1atm 和 25°C的液态水（1）与一个状态为 325kPa 和 200°C的过热蒸汽流（2）相混合。液态水进入混合器时的流量为 70kg/h。从混合器中得到

的混合产物（3）为1atm和55°C。混合器的热损失率为3000kJ/h，请估算过热蒸汽的流量和熵增益率。

5.34 在一个稳态混合过程中，流量为50.25kg/s的501.15K饱和蒸汽流（蒸汽流1）与流量为7.363kg/s的401.15K饱和蒸汽（蒸汽流2）相混合。混合器是隔热的，并以绝热状态运行。如果外界为298.15K，请确定其能量耗散（功损失）。

5.35 在一个稳态混合过程中，流量为50.0kg/s的501.15K饱和蒸汽（蒸汽流1）与流量为17.0kg/s的423.15K饱和蒸汽（蒸汽流2）相混合。产物蒸汽（蒸汽流3）为473.15K，请确定热损失率。

5.36 在一个稳态混合过程中，状态为550K和2atm、流量为15kmol/s的空气（蒸汽流1）与状态为350K和1atm、流量为40kmol/s的空气（蒸汽流2）相混合。混合产物（蒸汽流3）为300K和1atm，请确定热损失。

5.37 一个蒸汽轮机的功率输出为3.80 MW。入口处的蒸汽为1000psia和900°F。出口处的蒸汽为饱和状态，压强为12psia。如果蒸汽流量为12.8 lb/s，请估算热损失。

5.38 一个蒸汽轮机产生3.80 MW。入口处的蒸汽为900psia和900°F。出口处的蒸汽为饱和状态，压强为5psia。如果蒸汽流量为16.2lb/s，请估算其热损失。

5.39 一个蒸汽轮机消耗4000lb/h蒸汽，该蒸汽流入时为540psia和800°F。排出的蒸汽为165psia。汽轮机运行为绝热。

① 请确定出口蒸汽温度和汽轮机产生的功。

② 如果汽轮机的效率为80%，请确定熵增益。

5.40 一个过热蒸汽流（蒸汽流1）在一个汽轮机中膨胀。蒸汽的初始状态为5000kPa和325°C，最终状态为150kPa和200°C。蒸汽流量为10.5kg/s。如果汽轮机产生的功率为1.1 MW，请确定损失到外界的热量。

5.41 一个过热蒸汽流（蒸汽流1）在一个汽轮机中膨胀。蒸汽的初始状态为5000kPa和325°C，最终状态为150kPa和200°C。蒸汽流量为10.5kg/s。如果汽轮机产生的功率为1.1 MW，请确定损失到外界的热量㊀。

5.42 蒸汽在一个涡轮机中从6600kPa和300°C膨胀1atm的饱和蒸汽。蒸汽流量为9.55kg/s。如果汽轮机功率输出为1MW，请估算热损失率。

5.43 蒸汽在一个涡轮机中从850psia和600°F绝热膨胀为12psia、干度为0.9的湿蒸汽。如果汽轮机的功率输出为2MW，请估算蒸汽流量。

5.44 蒸汽在一个涡轮机中从800psia和650°F绝热膨胀为10psia，干度为0.95的湿蒸汽。如果汽轮机的功率输出为2MW，请估算蒸汽流量。

5.45 质量流量3.6kg/s、状态为1.0bar、300K的空气进入一个隔热稳态运行压缩机内，出口压强为2.76bar。动能和势能的影响可以忽略不计。①请确定所需的最小理论输入功率（单位为：kW）与相应的出口温度（单位为：K）。②如果实际的出口温度为420K，请确定功率输入（单位为：kW）与等熵压缩机的效率。

5.46 一个压缩机将二氧化碳的压强从100kPa提高到600kPa。入口温度为300K，出口

㊀ 习题5.40与习题5.41相同，原书如此。——译者注

温度为400K。二氧化碳的质量流量为0.01kmole/s。压缩机所需功率为55kW。外界的温度为290K，请确定所需要的最小功。

5.47 $5m^3$ 氢气从初始状态100kPa、300K被压缩到300kPa和370K。压缩过程为多变过程（PV^{γ} = 常数）。氢气的平均热容量为 $C_{p,av}$ = 29.1J/mol K，请估算系统的总熵变。

5.48 一个压缩机吸入流量为1.2lb/s的空气，该空气的初始状态为15psia和80°F。出口处的空气状态为40psia和300°F。在入口处空气流速较低，但在压缩机的出口被提高到250ft/s。如果它被冷却的速率为200Btu/s，请估算压缩机的输入功率。

5.49 在一个绝热压缩运行中，空气被从20°C和101.32kPa压缩到520kPa。空气的流量为22mol/s，请估算在等熵条件下运行所需的功。

5.50 流量为0.1lb/s的制冷剂R-134a作为饱和蒸汽流入一个压缩机时的状态为 T_1 = 5°F（P_{sat} = 23.8psia），作为过热蒸汽流出时的状态为60°F和40psia。请估算在压缩过程期间所传递的能量。

5.51 流速为6m/s的空气流入一个压缩机时的状态为100kPa、300K，进气管的截面积为$3m^2$。流出时为500kPa和400K，流速为2m/s。压缩机的热量损失速率为160kW。如果空气为理想气体行为，求压缩机所需的功率（kW）。

5.52 流量为1.5kg/s二氧化碳流入一个压缩机时的状态为300K和100kPa，流出时为480K，请估算二氧化碳的体积流量与压缩功率。

5.53 流量为5lb/s的丙烷作为一种饱和蒸汽流入一个压缩机时的状态为30°F和66.5psia。丙烷作为过热蒸汽流出压缩机时的状态为140psia和100°F，请估算在稳态流动过程中传递给丙烷的热量。

5.54 在一个两级连续压缩过程中，甲烷（甲烷流1）流入一级压缩机时为300K和1bar，甲烷（甲烷流2）流出二级压缩机时为300K和60bar。甲烷的流量为0.5kg/s，总功率输入为400kW，压缩机之间的中冷器使用冷却水，外界为295K，请估算所需要的最小功以及中冷器所吸收的热量。

5.55 在一个两级连续压缩过程中，甲烷（甲烷流1）流入一级压缩机时为300K和1bar，甲烷（甲烷流2）流出二级压缩机时为350K和80bar。甲烷的流量为0.6kg/s，总功率输入为450kW，压缩机之间的中冷器使用冷却水。冷却水流入冷却器时为295K，流出时为305K，外界为295K，请估算冷却水的流量。

5.56 在一个绝热压缩运行中，空气被从20°C和101.32kPa压缩到520kPa，效率为0.7。空气的流量为20mol/s。气体假设为理想气体，请估算所需要的理想功。

5.57 体积流量为$0.019m^3/s$制冷剂R-134a在2bar时作为饱和蒸汽流入一个稳态运行的压缩机中。根据 $PV^{1.03}$ = 常数，该制冷剂在一个本质可逆过程中被压缩，压强达到8bar。请估算①所需的功率（单位为：kW），②热传递值（单位为：kW）。

5.58 空气被从1bar和310K的初始状态压缩到8bar。如果空气沿着一个多变过程路径（γ = 1.32），请估算它的比能量与热传递值。

5.59 一个泵将25°C液态水的压强从100kPa提高到2500kPa。泵的流量为$0.005m^3/s$，驱动该泵的电动机所需要的最小马力是多少？

5.60 一个泵将25°C液态水的压强从100kPa提高到3000kPa。泵的流量为$0.25m^3/s$，驱

动该泵的电动机所需要的最小马力是多少?

5.61 在一个收缩喷管中，空气的流速被从20m/s加速到60m/s。空气在流入时的状态为400kPa、127°C。喷管的入口横截面积为90m^2。在出口处，空气压强降为100kPa，请估算空气质量流量与出口温度。

5.62 在一个收缩喷管中，蒸汽的流速被从20m/s加速到200m/s。蒸汽流入喷管时为3000kPa和275°C，流出时为900kPa。喷管入口的截面积为0.005m^2。喷管的热损失率为76kJ/s，请估算蒸汽的质量流量与流出时的温度。

5.63 在一个收缩喷管中，二氧化碳（CO_2）气流被加速至400m/s。二氧化碳流入喷管时为1000kPa和500K，流出时为900kPa。二氧化碳的流量为5000kg/h。喷管入口的截面积为0.005m^2，请估算CO_2的入口流速和出口温度。

5.64 蒸汽在一个喷管中膨胀，入口状态为500°F、250psia，流速为260ft/s；排出状态为95psia，流速为1500ft/s。如果流速为10lb/s，而且该过程处于稳态和绝热条件，请确定其出口温度。

5.65 流量为1kg/s的空气流入喷管时为400K和60m/s，流出喷管时的流速为346m/s。空气流入时的压强为300kPa，流出时的压强为100kPa。喷管中的热损失率为2.5kJ/kg，请确定流出时的焓。

5.66 蒸汽流入喷管时为30psia和300°F，而作为饱和蒸汽流出时的温度为300°F。蒸汽流入时的流速为1467ft/s，流出时的流速为75ft/s。喷管的出口面积为0.5ft^2，请确定环境温度$T_o = 500$ °R时的能量耗散率。

5.67 蒸汽流入喷管时为500kPa和220°C，流出时为400kPa和175°C。蒸汽流入时的流速为200m/s，流出时的流速为50m/s。喷管的出口面积为0.2m^2，请确定率损失到外界的热量。

5.68 蒸汽流入喷管时为4000kPa和425°C，流速为50m/s。流出时的流速为286.18m/s。喷管为绝热运行，入口面积为0.005m^2，请估算出口蒸气流的焓。

5.69 蒸汽流入喷管时为3200kPa和300°C，流速为20m/s。流出时的流速为274.95m/s。喷管为绝热运行，入口面积为0.01m^2。如果外界为300K，请估算在出口处的焓及其损失功。

5.70 状态为8200kPa和500°C的蒸汽通过一个节流过程以致压强突然减至7400kPa。在节流之后的预期温度是多少?

5.71 流量为5kg/s的过热蒸汽的初始状态为400°C和1100kPa，它通过一个阀门被绝热节流至125kPa。如果外界为298.15K，请确定其出口温度和损失功。

5.72 制冷剂R-134a在一个膨胀阀中绝热膨胀。制冷剂流入时为$P_1 = 140$psia和$T_1 = 140$°F，流出时为50psia。参考条件为$P_o = 21.2$psia和$T_o = 0$°F，请确定其火用损失和第二定律效率。

5.73 流量为2.0kg/s的过热蒸汽被节流至1700kPa。蒸汽的初始状态为4100kPa和300°C，请估算蒸汽在这个节流过程期间潜在的损失功。

5.74 制冷剂R-134a通过一个阀门实现节流。制冷剂进入阀门作为一种饱和液体在30psia，流出时为15psia，请估算出口温度与制冷剂的质量。

5.75 蒸汽以绝热状态通过一个阀门实现节流。蒸汽流入阀门时为1000psia和600°F，流

出时的压强为850psia，请估算温度下降值。

5.76 状态为900psia和700°F的蒸汽通过一个阀门被节流至55psia，稳态流速为20lb/min，请确定由于蒸汽膨胀而产生的熵。

参考文献

1. Çengel YA, Boles MA (2002) Thermodynamics: an engineering approach, 4th edn. McGraw Hill, New York
2. Çengel YA, Turner RH (2001) Fundamentals of thermal-fluid sciences. McGraw-Hill, New York
3. Demirel Y (2007) Nonequilibrium thermodynamics: transport and rate processes in physical chemical and biological systems. Elsevier, Amsterdam
4. Himmeblau DM, Riggs JB (2004) Basic principles and calculations in chemical engineering, 7th edn. Prentice Hall, Upper Saddle River
5. Moran MJ, Shapiro HN (2000) Fundamentals of engineering thermodynamics, 4th edn. Wiley, York
6. Smith JM, Van Ness HC, Abbott MM (2005) Introduction to chemical engineering thermodynamics, 7th edn. McGraw Hill, New York

第6章　能量生产

6.1　能量生产简介

能量生产主要涉及一种形式的能量转换成另一种最需要的形式。例如，作为化学能来源的化石燃料与核原料用于产生了将近90%的全球电力。石油（也称作原油）作为一种化石燃料是另一种主要的能量来源。在将石油精炼成各种馏分之后，便产生了各种不同的燃料，比如汽油、煤油、柴油与燃料油等。因此，能量生产主要涉及将现有的化石燃料、核原料与可再生能源转换成那些在特定的应用中最需要的能量形式。在全世界存在着各种形式的能量生产，每种形式都各有优劣。世界的能量需求预期到2030年将提高60%。热电联产可以使用同一能源产出超过一种以上的有用能量形式（如过程热和电能）[31,33]。

6.2　电力生产

化石燃料发电厂通过将化石燃料能量转换成机械功来发电。两种主要的发电厂系统都基于大多使用化石燃料的蒸汽轮机循环和燃气轮机循环。蒸汽循环靠的是朗肯循环（Rankine Cycle），在该循环中，锅炉产生的高压和高温蒸汽通过一个汽轮机膨胀，而该汽轮机同时又驱动一个发电机。从汽轮机中排出的蒸汽通过一个冷凝器将冷凝热释放给一个散热装置（heat sink），比如来自河流或湖泊的水流。冷凝物被泵回锅炉以重新开始一个新循环。冷却水在冷凝器中吸收的热量通常是通过冷却塔排散到大气之中（见图6.1）。

发电的基本原理是由英国科学家迈克尔·法拉第（Michael Faraday）于19世纪二三十年代发现的。基于法拉第的工作，电力是通过导线回路或者铜片在磁极之间的运动而产生的。大多数发电是依靠蒸汽轮机。化石燃料的燃烧为这些汽轮机提供了大部分的热量，明显高于核裂变和可再生能源。现在，在全世界范围内，蒸汽轮机通过使用各种各样的热源生产了80%左右的电力。

假设氮气保持惰性，使用空气作为氧气来源的化石燃料完全燃烧可以近似表示为下面的反应：

$$C_xH_y + \left(x + \frac{y}{4}\right)O_2 + 3.76\left(x + \frac{y}{4}\right)N_2 \rightarrow xCO_2 + \left(\frac{y}{2}\right)H_2O - 3.76\left(x + \frac{y}{4}\right)N_2 + \text{热量} \tag{6.1}$$

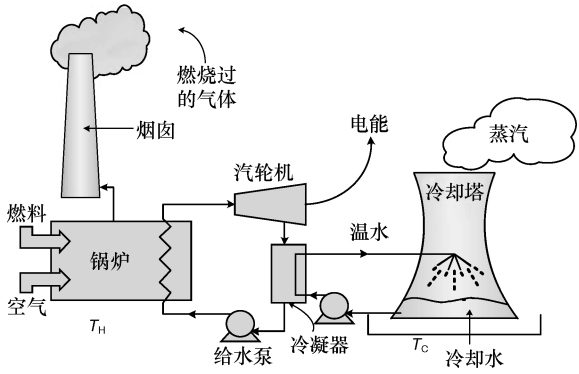


图 6.1　一个蒸汽发电厂的示意图

式中，C_xH_y 表示一种仅包括碳元素（C）和氢元素（H）的化石燃料，根据燃料种类的不同，其化学计量分别为 x 和 y。

一种化石燃料（比如煤或天然气）除了碳和氢之外，还可能含有其他元素（如硫等）和化合物（如矿物质等）。一个简单的例子就是煤的燃烧（这里认为是纯碳）：$C + O_2 \rightarrow CO_2$。煤被磨成粉末，并与空气混合，用来将煤预热以去除过量的水分，并将其运送给燃烧炉。

在美国，大部分是使用蒸汽轮机来发电。在蒸汽轮机中，煤或天然气在燃烧炉中燃烧，用来加热锅炉中的水以产生蒸汽。在 2009 年，美国全国将近 4 万亿 kWh 的电力中，45% 使用煤作为能量来源。例 6.1 给出了一个绝热蒸汽轮机的分析。图 6.2 所示为美国用于发电的各种不同的能源。当人们认识到，交流输电线能够以极低成本实现远距离电力输送，而且电力变压器能够通过升降电压来调节电力时，集中式发电成为可能。

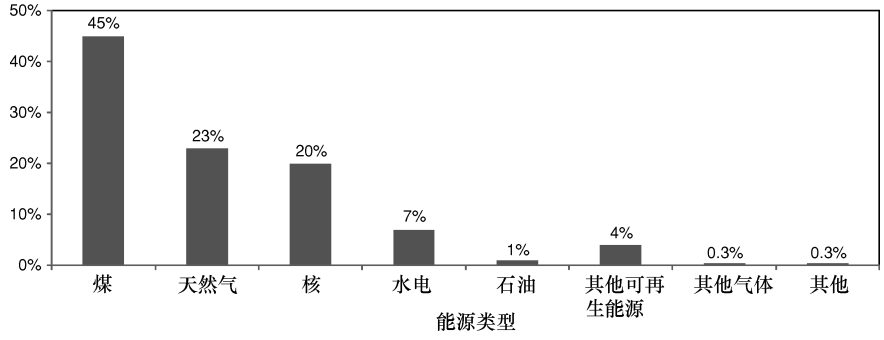


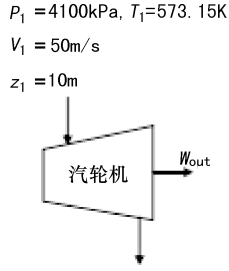
图 6.2　美国用于发电的能源[12]

可再生能源（如光伏、风能、生物质、水电与地热等）也可以提供清洁而且可持续的电力。不过，可再生能源是随自然而变化的，需要储能或一个混合系

统来适应日常与季节性的变化。一个解决方案是通过电解水产生氢气，并将该氢气用于一种燃料电池之中，实现在发电量低或峰值需求期间发电，或者将该氢气用于燃料电池车辆之中。

例 6.1　绝热蒸汽轮机发电

过热蒸汽在 4100kPa 和 300 °C时在一个蒸汽轮机中绝热膨胀，流出蒸汽为 15kPa，干度 $x = 0.9$。入口处的蒸汽流速为 50m/s，出口处的蒸汽流速为 160m/s。入口处的海拔为 10m，出口处的海拔为 6m。请估算流率为 1kg/s 的蒸汽产生的功率。



解：

假设：稳态绝热（$q_{loss} = 0$）过程。

蒸汽流量：$\dot{m}_s = 1\text{kg/s}$

根据表 F4 查得：

入口条件：$P_1 = 4100\text{kPa}$ 和 $T_1 = 300\ ^\circ\text{C}$，$v_1 = 50\text{m/s}$，$z_1 = 10\text{m}$，$H_1 = 2958.5\text{kJ/kg}$

出口条件：饱和液体和蒸汽的混合物水（见表 F3）：

$P_{2,\text{sat}} = 15\text{kPa}$，$T_{2,\text{sat}} = 54.0\ ^\circ\text{C}$，$H_{2\text{sat liq}} = 226.0\text{kJ/kg}$

$H_{2\text{sat vap}} = 2599.2\text{kJ/kg}$，$x = 0.9$，$v_2 = 160\text{m/s}$，$z_2 = 6\text{m}$

$$H_{2\text{mix}} = (1-x)\ H_{\text{sat liq}} + xH_{\text{sat vap}} = (1-0.9)\ 226\text{kJ/kg} + (0.9)\ 2599.2\text{kJ/kg} = 2361.9\text{kJ/kg}$$

能量平衡：

$$\dot{m}\left(\Delta H + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z\right)$$

$$\Delta H = H_2 - H_1 = (2361.9 - 2958.5)\text{kJ/kg} = -596.6\text{kJ/kg}$$

$$\Delta\text{KE} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \left(\frac{160^2 - 50^2}{2}\right)\text{m}^2/\text{s}^2\left(\frac{\text{kJ/kg}}{1000\text{m}^2/\text{s}^2}\right) = 11.55\text{kJ/kg}$$

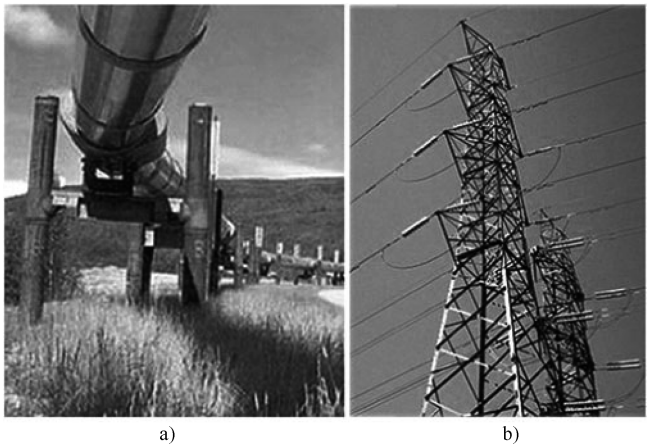
$$\Delta PE = g(z_2 - z_1)\left(\frac{kJ/kg}{1000m^2/s^2}\right) = 9.81(6-10)m^2/s^2\left(\frac{kJ/kg}{1000m^2/s^2}\right) = -0.04kJ/kg$$

$$W_{out} = \dot{m}\left(\Delta H + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z\right) = (1kg/s)(-596.6 + 11.5 - 0.04)kJ/kg = -585.1kW$$

动能的贡献低于2%，而且势能的贡献可以忽略不计。在实践中，动能和势能的变化假设可以忽略不计。

6.3　能量传输

电网将电能从发电源传输并配送给最终用户（见图6.3）。电力来源包括燃煤或燃气发电厂、核电站和太阳能发电站等变电站、变压器、塔与线缆组合起来，用于在所需要的电压水平（如110V或220V）下维持恒定的电流。电网也有一个预定义的载流容量或负载。新建的小规模能源可以靠近消费者的位置，用以实现电力在配送期间的较小能量损失。像超导或改进功率因数校正这样的新技术，也可以降低能量损失[1]。



a)　b)

图6.3　能量传输

a）阿拉斯加输油管道的一个高架段　b）电网：带电缆附线和电缆的输电塔

原油通过长管道在来源和精炼厂之间运输和分配，然后在精炼厂中被分馏成不同类型的燃料，比如汽油、煤油与燃料油等。管道也可以将原油的精炼馏分配送给最终用户。浆体管道有时候也用于煤的运输。石油管道由钢管或塑料管做成，内径通常为0.3～4ft（0.1～1.2m）。对于天然气来说，管道则是由碳钢构成，直径尺寸可在0.2～5ft（0.06～1.5m）变化，这要取决于管道的类型。气体通过压缩机站实现加压。大多数管道通常埋在3～6 ft（0.9～1.8m）深处。

6.3.1　分布式能源

分布式能源是位于使用点附近的小型发电或储存系统。分布式能源通常使用热电联产方式，具有较高的效率，而且还可以减少二氧化碳排放，由于它们使用位于现场的可再生能源资源和低温室气体燃料（比如天然气等），如图 6.4 所示。一些分布式发电技术，比如说光伏和燃料电池，相对于集中式化石燃料发电厂，它们能够无排放或低排放发电。为了提升分布式发电系统的效率，需要改进发电设备的性能，包括采用先进的传感器和控制器、能量储存与热交换器等，以改进废热回收和循环效率。其他的优点包括：燃料来源的方便性、减少传输和配送线路损失、增强电能质量与可靠性以及更多的用户控制等。分布式发电允许消费者发电为自己所用，并将多余的电能输送回电网[1]。

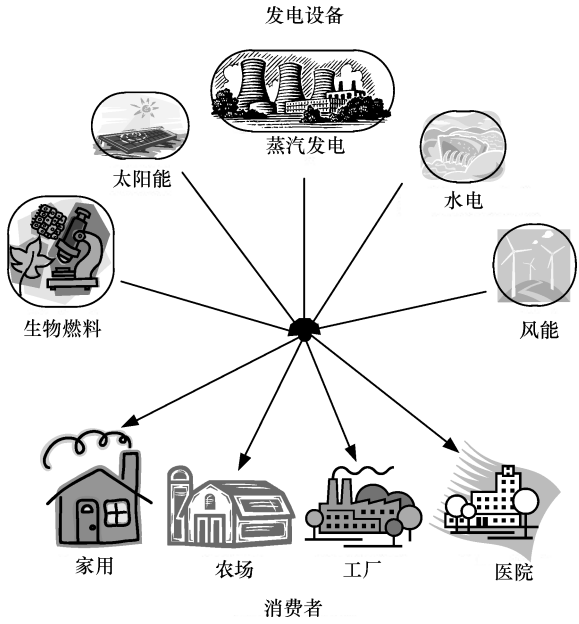


图 6.4　转变为分布式能源及其应用

6.4　热机循环发电

用于产生净输出功率的系统称为发动机。大多数发电用发动机使用工作流体循环运行。蒸汽发电厂使用水作为工作流体。实际发动机循环非常复杂难以分析，因此，分析该类循环通常假设它们运行于无摩擦、热损失与其他复杂性的工况[6,32]。这样的循环称为理想发动机。对理想发动机进行分析，可以得到控制循

环性能的主要运行参数[4]。

例如，一个热机，通过将工作流体从高温状态 T_H 变为低温状态 T_C，从而将热能转换为机械能。图 6.5 所示为理想发动机循环的典型压强-容积（*PV*）与温度－熵（*TS*）图。在 *PV* 图和 *TS* 图中，循环过程曲线所包围的面积均表示该循环期间产生的净功，它相当于该循环的净热传递。如图 6.5 所示，*TS* 图上的循环特征如下：

- 热量增加提高了熵；
- 热量损失降低了熵；
- 在熵恒定不变时发生等熵（本质可逆和绝热）过程。

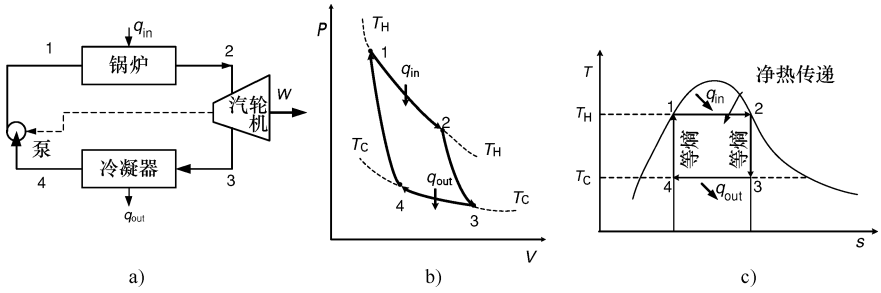


图 6.5　典型的理想发动机循环

a）循环过程　b）压强-容积（*PV*）图　c）温度-熵（*TS*）图

TS 图中，在热量增加过程之下的面积表示的是输入总热量，在热损失过程之下的面积表示的是热量总输出。这两个面积之差表示的是净热传递，也就是净输出功。因此，任何改进净热传递率的措施也将会改进净输出功。例 6.2 给出了一个蒸汽发电厂的功率输出分析[4,6,32]。

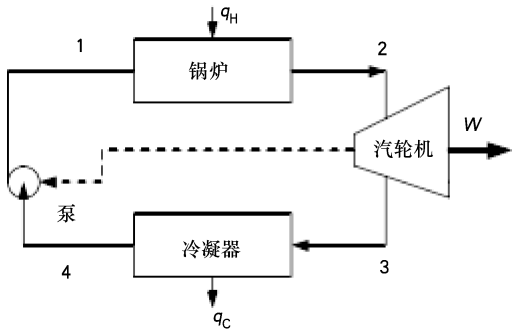
一个热“源”对高温状态的工作流体进行加热。工作流体在发动机中产生功，同时将剩余的热量传递给较冷的“散热设备”，直到它达到一个低温状态。工作流体通常是液体或气体。在发动机运行期间，部分热能被转化为功，而且剩余的能量被散热装置（主要是普通的外界环境）所损耗。例 6.3 对给定的功率输出时的水质量流量进行了估算。

例 6.2　蒸汽发电

一个蒸汽发电厂使用的蒸汽为 8200kPa 和 823.15K。汽轮机排出的蒸汽为 30kPa。汽轮机与泵处于可逆和绝热运行状态。请确定在锅炉中产生的每千克蒸汽所做的功。

解：

假设汽轮机与泵处于可逆和绝热运行状态；蒸汽通过冷凝器和锅炉时无压



降；在冷凝器和锅炉中只有热传递发生。

蒸汽流量：$\dot{m}_s = 1\text{kg/s}$

根据表 F4 查得蒸汽数据：

汽轮机入口：$P_2 = 8200\text{kPa}$；$T_2 = 823.15\text{K}$；$H_2 = 3517.8\text{kJ/kg}$；$S_2 = 6.8646\text{kJ/kg K}$

汽轮机出口：$P_3 = 30\text{kPa}$；$T_3 = 342.27\text{K}$，$V_4 = 0.001022\text{m}^3/\text{kg}$（见表 F3）

$H_{3\text{sat liq}} = 289.30\text{kJ/kg}$，$H_{3\text{sat vap}} = 2625.4\text{kJ/kg}$

$S_{3\text{sat liq}} = 0.9441\text{kJ/kg K}$，$S_{3\text{sat vap}} = 7.7695\text{kJ/kg K}$

对于一个理想运行，$S_2 = S_3 = 6.8646\text{kJ/kg K}$。因为 $S_3 < S_{3\text{sat vap}}$，所以排放的蒸汽是液体和蒸汽的混合物。请使用汽轮机排气的熵平衡，求解蒸汽的干度：

$$x_3 = \frac{S_2 - S_{3\text{sat liq}}}{S_{3\text{sat vap}} - S_{3\text{sat liq}}} = \frac{(6.8646 - 0.9441)\text{kJ/kg K}}{(7.7695 - 0.9441)\text{kJ/kg K}} = 0.867$$

$$H_3 = 0.867(2625.4) + (1 - 0.867)(289.3) = 2315.8(\text{kJ/kg}), T_2 = 342.27\text{K}(\text{饱和})$$

$$H_1 = H_4 + (P_1 - P_4)V_4 = [289.3 + (8200 - 30)(0.001022)]\text{kJ/kg} = 297.65\text{kJ/kg}$$

$$q_{\text{out}} = (H_3 - H_4) = (2315.8 - 289.3)\text{kJ/kg} = 2026.5\text{kJ/kg}(\text{绝对值})$$

$$q_{\text{in}} = (H_2 - H_1) = (3517.8 - 297.65)\text{kJ/kg} = 3220.2\text{kJ/kg}$$

1kg/s 蒸汽的净输出功：$W_{\text{out}} = \dot{m}_s(q_{\text{in}} - q_{\text{out}}) = 1193.7\text{kW}$（绝对值）

例 6.3　发电厂的蒸汽流量计算

一个蒸汽发电厂的输出为 50 MW。它使用的蒸汽流（蒸汽流 1）为 8200kPa 和 550°C。排放的蒸汽流（蒸汽流 2）处于 75kPa 的饱和状态。如果汽轮机内为绝热膨胀，请确定该蒸汽的流量。

解：

假设动能和势能可以忽略不计，而且系统处于稳态。

计算基础：1kg/s 蒸汽，性质可从蒸汽表查得

汽轮机入口：

$H_1 = 3517.8\text{kJ/kg}, S_1 = 6.8648\text{kJ/kg K}, T_1 = 550°\text{C}, P_1 = 8200\text{kPa}$（见表 F4）

汽轮机出口：

$S_{2\text{sat vap}} = 7.3554\text{kJ/kg K}, S_{2\text{sat liq}} = 1.2131\text{kJ/kg K}(P_2 = 75\text{kPa})$（饱和蒸汽）

$H_{2\text{sat vap}} = 2663.0\text{kJ/kg}, H_{2\text{sat liq}} = 384.45\text{kJ/kg}$（见表 F3）

在等熵条件下，可以得到 $S_2 = S_1 < 7.3554\text{kJ/kg K}$

因此，排放的蒸汽是湿蒸汽：

x_s（等熵运行时的蒸汽干度）：$x_s \dfrac{(6.8646 - 1.2131)\text{kJ/kg K}}{(7.4570 - 1.2131)\text{kJ/kg K}} = 0.905$

等熵条件下排放的蒸汽焓 H_{2s}是

$$H_{2s} - H_{2\text{sat liq}} = (1 - x_s) + H_{2\text{sat vap}} x_s = [384.45(1 - 0.905) + 2663(0.905)]\text{kJ/kg}$$
$$= 2446.8\text{kJ/kg}$$

蒸汽流量：
$$\dot{m} = \frac{-50000\text{kW}}{(H_{2s} - H_1)\text{kJ/kg}} = 46.7\text{kg/s}$$

6.4.1　卡诺循环

一个卡诺热机，通过将工作流体从高温状态 T_H 变为低温状态 T_C，从而将热能转换为机械能。图 6.5 所示为理想发动机循环的典型压强-容积（*PV*）与温度-熵（*TS*）图。在 *PV* 图和 *TS* 图中，循环过程曲线所包围的面积均表示由净热传递转换而来的热机的机械能。

卡诺循环总体上包含四个可逆过程，如图 6.5c 所示：

- 过程 1-2：在恒温 T_H 条件下热能增加。
- 过程 2-3：在恒熵 $S_2 = S_3$ 条件下等熵膨胀。
- 过程 3-4：在恒温 T_C 条件下热能损失。
- 过程 4-1：在恒熵 $S_4 = S_1$ 条件下等熵压缩。

根据图 6.5c，能够估算每单位质量流量的工作流体热能增加和损失的数量：

$$q_{in} = T_H(S_2 - S_1) \tag{6.2}$$

$$q_{out} = T_C(S_4 - S_3) \tag{6.3}$$

净输出功率变为

$$W_{out} = q_{in} - q_{out} \tag{6.4}$$

例 6.4 给出了一个卡诺循环功率输出的分析。

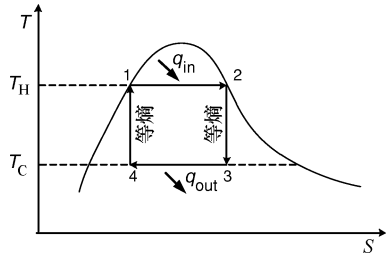
例 6.4　一个卡诺循环的功率输出

一个卡诺循环使用水作为工作流体，水处于稳定的流动过程。热传递源为 250°C，而且水从饱和液体转化为饱和蒸汽。饱和蒸汽在一个涡轮机中膨胀至

10kPa，冷凝器中在 10kPa 时的热传递率为 1045kJ/kg。请估算工作流体流量为 10kg/s 时，该循环的净输出功率。

解：

假设：动能和势能的变化可以忽略不计。



根据表 F3 可查得数据：

$$\dot{m} = 10\text{kg/s}$$

汽轮机入口：

$$P_{sat} = 3977.6\text{kPa}, T_H = 250\,^{\circ}\text{C} = 523.15\text{K}$$

汽轮机出口：

$$T_C = T_{sat}(\text{在 } 10\text{kPa 时}) = 45.8\,^{\circ}\text{C} = 318.8\text{K}$$

热供应相当于在 $T_H = 250\,^{\circ}\text{C}$时的汽化热。

$H_{1sat\ liq} = 1085.8\text{kJ/kg K}, H_{2sat\ vap} = 2800.4\text{kJ/kg K}$，在 $P_1 = P_2 = 3977.6\text{kPa}$ 时

$$q_{in} = H_{2sat\ vap} - H_{2sat\ liq} = 1714.6\text{kJ/kg}, q_{out} = 1045\text{kJ/kg}$$

总循环的净输出功率：$\dot{W}_{net} = \dot{m}(q_{in} - q_{out}) = 6696.0\text{kW}$

6.4.2　朗肯循环

朗肯循环将热能转换为功，并为全世界提供了大约 80% 的电力。图 6.6 描述了该循环内的主要过程。常用的热能来源为燃煤、燃气和燃油以及核原料的裂变。朗肯循环过程如下：

- 过程 1-2：高压液体进入一个锅炉，在锅炉中，一个外部热源对它进行等压条加热，变为干饱和蒸汽。
- 过程 2-3：干饱和蒸汽通过一个汽轮机膨胀，产生功率。这样会降低该蒸汽的温度和压强，并会出现部分冷凝。
- 过程 3-4：汽轮机排放的湿蒸汽进入一个冷凝器，实现等压冷凝，变为饱和液体。
- 过程 4-1：水被从低压泵到高压，开始一个新循环。

朗肯循环有时候被视作一种实际的卡诺循环，由于在一个理想的朗肯循环

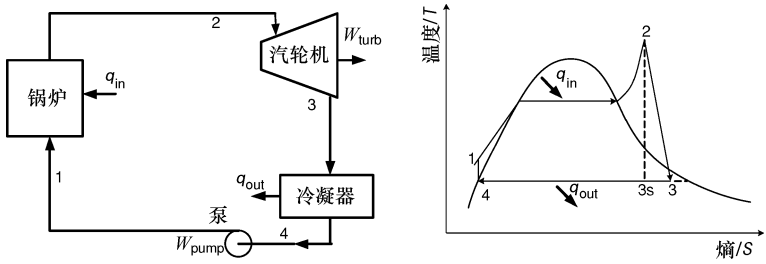


图 6.6　a）朗肯循环的示意图，b）*TS* 图中的朗肯循环过程

中，泵和汽轮机运行于等熵过程，而且该过程中没有熵产生，从而实现了输出功的最大化，如图 6.7 中的线 2-3 所示，其中的熵保持恒定。两者的主要差异在于，在朗肯循环中热增加（在锅炉中）和热损失（在冷凝器中）过程是等压的，而在卡诺循环中则是等熵的。

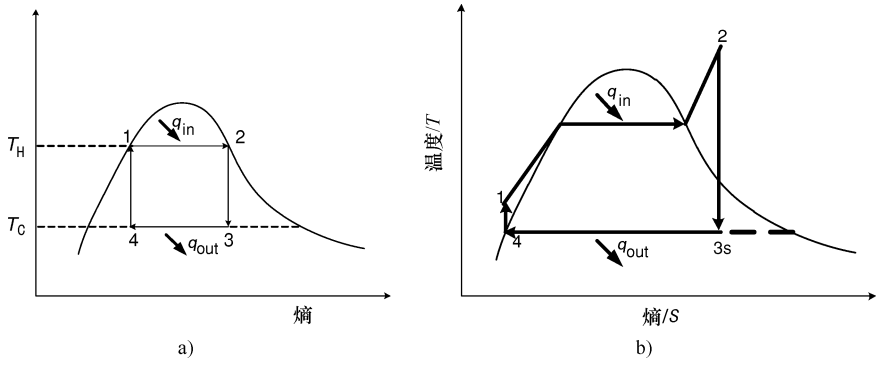


图 6.7　a）卡诺循环。b）*TS* 图中的理想朗肯循环，其中，循环泵和汽轮机均运行于等熵条件下（等熵运行）

6.4.2.1　理想朗肯循环分析

对朗肯循环过程进行分析，可得以下方程，泵所需的功率为

$$\dot{W}_{p,in} = \dot{m} V_4 (P_1 - P_4) \tag{6.5}$$

式中，$\dot{m}$ 为蒸汽的质量流量；V_4 为在状态 4（饱和液态水）时的比容；P_i 为状态 i 时的压强。

状态 1 的焓率 H_1 为

$$\dot{m} H_1 = \dot{m} H_4 + \dot{W}_{p,in} \tag{6.6}$$

对于等熵过程 $S_1 = S_4$ 和 $S_2 = S_3$，排放的湿蒸汽的干度为 x_{3s}，表示蒸汽的摩尔分数或质量分数（$S_3 < S_{3sat\ vap}$）：

$$x_{3s} = \frac{(S_3 - S_{3\text{sat liq}})}{(S_{3\text{sat vap}} - S_{3\text{sat liq}})} \tag{6.7}$$

式中，S_3 为状态 3 时的熵；$S_{3\text{sat vap}}$ 和 $S_{3\text{sat liq}}$ 分别为饱和蒸汽与饱和液体在状态 3 时的熵。

状态 3 时的湿蒸汽焓率为

$$\dot{m}H_3 = \dot{m}\left[(1 - x_{3s})H_{3\text{sat liq}} + x_{3s}H_{3\text{sat vap}}\right] \tag{6.8}$$

式中，$H_{3\text{sat vap}}$ 和 $H_{3\text{sat liq}}$ 为饱和蒸汽和饱和液体在状态 3 时的焓。

锅炉中加压水的热流入率 $\dot{q}_{\text{in}}$ 为

$$\dot{q}_{\text{in}} = \dot{m}(H_2 - H_1) \tag{6.9}$$

冷凝器中热量释放率 $\dot{q}_{\text{out}}$ 为

$$\dot{q}_{\text{out}} = \dot{m}(H_4 - H_3) \tag{6.10}$$

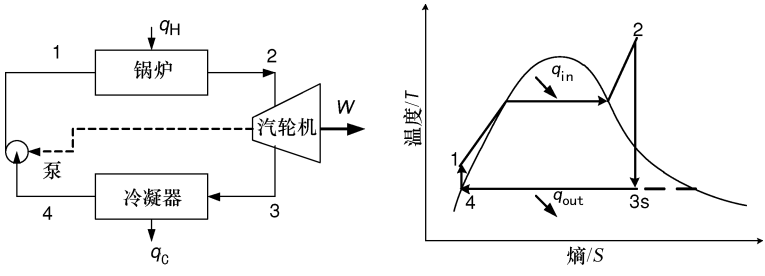
产生的净功 $\dot{W}_{\text{net}}$ 为

$$\dot{W}_{\text{net}} = (\dot{q}_{\text{in}} - \dot{q}_{\text{out}}) \tag{6.11}$$

蒸汽轮机的性能将受限于它所排放的蒸汽干度。排放蒸汽的干度较低将会降低汽轮机叶片的寿命和汽轮机的效率。克服这个问题的最容易的方式是使用过热蒸汽。例 6.5 给出了一个理想的朗肯循环的分析。

例 6.5　简单理想朗肯循环的分析

一个运行于简单理想朗肯循环的蒸汽发电厂如下图所示。流入汽轮机的蒸汽为 698.15K 和 4100kPa，而排出的蒸汽则为 40kPa。蒸汽的质量流量为 8.5kg/s。请确定其净输出功。



解：

假设动能和势能的变化可以忽略不计。

$$\dot{m}_s = 8.5\text{kg/s}$$

$$P_2 = P_1 = 4100\text{kPa}; H_2 = 3272.3\text{kJ/kg}; S_2 = 6.8450\text{kJ/kg}(\text{见表 F4})$$

饱和蒸汽性质：$P_3 = P_4 = 40\text{kPa}$，$V_4 = 0.001022\text{m}^3/\text{kg}$（见表 F3）

$$H_{3\text{sat vap}} = 2636.9\text{kJ/kg}; H_4 = H_{3\text{sat liq}} = 317.65\text{kJ/kg};$$
$$S_{3\text{sat vap}} = 7.6709\text{kJ/kg K}; S_{3\text{sat liq}} = 1.0261\text{kJ/kg K}$$

计算基础：质量流量为 1kg/s：

$$W_{\text{p,in}} = V_1(P_1 - P_4) = (0.001022)(4100 - 40)\left(\frac{1\text{kJ}}{1\text{kPa m}^3}\right) = 4.14\text{kJ/kg}$$

$$H_1 = H_4 + W_{\text{p,in}} = 321.79\text{kJ/kg}$$

等熵过程 $S_1 = S_4$ 和 $S_3 = S_2$，排放的湿蒸汽的干度（$S_3 < S_{3\text{sat vap}}$）：

$$x_{3s} = (6.845 - 1.0262)/(7.6709 - 1.0261) = 0.875$$

$$H_3 = [317.65(1 - 0.875)]\text{kJ/kg} + (2636.9 \times 0.875)\text{kJ/kg} = 2356.6\text{kJ/kg}$$

$$q_{\text{in}} = H_2 - H_1 = 2950.5\text{kJ/kg}$$

$$q_{\text{out}} = H_3 - H_4 = 2038.9\text{kJ/kg}$$

蒸汽流量为 8.5kg/s，可以得到

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{m}(q_{\text{in}} - q_{\text{out}}) = 7748.6\text{kW} = 7.75\text{MW}$$

6.4.3　布雷顿循环

一个使用空气作为工作流体的燃气轮机循环依靠如图 6.8 所示的布雷顿循环。一个理想的布雷顿循环包含下列过程：

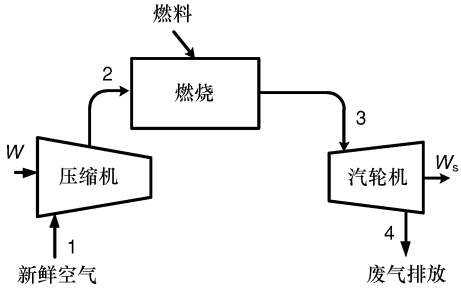


图 6.8　理想布雷顿循环的示意图，含以下过程：
绝热压缩、等压热增加、绝热膨胀与等压散热

- 等熵过程——环境空气被抽入压缩机。
- 等压过程——然后，压缩空气穿过一个燃烧燃料的燃烧室，在等压过程中被加热。
- 等熵过程——然后，加热加压空气通过一个汽轮机膨胀（或一系列汽轮机）释放能量。
- 等压过程——向外界环境散热。

汽轮机产生的部分电力用于通过一个曲柄轴机构来驱动压缩机。燃气轮机需

要使用天然气或轻质燃料油等清洁燃料。

实际的布雷顿循环具有如下过程：

- 压缩（绝热）；
- 热增加（等压）；
- 膨胀（绝热）；
- 散热（等压）。

由于无论是压缩还是膨胀都不会是真正的等熵，因此，通过压缩机和膨胀机的热损失是相当大的。增大压缩比可以提高布雷顿系统的总体功率输出。中间冷却工作流体降低了压缩这一级所需的总功，而且提高了燃烧室的燃料消耗。为了在给定的压缩比之下提高功率输出，空气采用通过一系列汽轮机来实现膨胀，然后再通过一个二级燃烧室膨胀到环境压强[4,7]。

6.4.4　斯特林热机

斯特林热机是一个在不同的温度水平对工作流体进行循环压缩和膨胀而运行的热机，由此实现热能到机械功的净转换。它的工作流体主要是空气，尽管也可以使用其他气体。与蒸汽机相比，斯特林热机效率很高，而且可以使用几乎所有的热能来源[17,28]。斯特林热机被看作一个外燃机，这是因为，它的工作流体对内对外的所有热传递都是通过热机壁而实现的。热机循环包括压缩气体、加热气体、膨胀热气体以及在重复循环之前对气体的最终冷却。它的实际使用仅仅局限于低功率的家庭应用。

6.4.5　混合加热循环

一个混合加热循环发电厂使用燃气轮机的布雷顿循环和热回收蒸汽发电机的朗肯循环。混合加热循环发电厂被设计成各种各样的布局结构：多个燃气轮机，后配一个蒸汽轮机。它们通过燃气轮机进行燃气发电，并利用剩余热量进行额外的蒸汽发电[4,21]。

煤气化产生一种能够被用于燃气轮机的燃料气体。通过将煤气化与燃气轮机和蒸汽循环集成起来，就能够达到燃煤的低污染物排放。集成气化混合加热循环潜在的一个额外优点是，它具有从燃料气体中捕获二氧化碳的能力，并易于将它通过高压管道运输到一个碳封存点。

6.5　蒸汽发电厂的发电改进

改进发电厂的运行状况可以提高它的效率和功率输出，同时还能减少燃料消耗。改进的目的在于：提高向锅炉中蒸汽传热的平均温度，并降低冷凝器中散热的平均温度[6,9,20,27]。下面各节给出了蒸汽发电中常用的一些改进措施。

6.5.1　改进冷凝器和锅炉的工作条件

将蒸汽过热至高温能够提高热量流入锅炉的温度，同时还可以提高功率输出和排放蒸汽的干度。图 6.9 所示为在理想朗肯循环 *TS* 图中，将蒸汽过热至较高温度与降低冷凝器压强的影响。被过程曲线“1′-2′-3′-4′”所包围的面积大于“1-2-3-4”的面积，它表示该循环在较高的锅炉温度和较低的冷凝器压强之下的净输出功增长。在运行于超临界压强（$P > 22.09\text{MPa}$）的现代蒸汽发电厂中，其运行压强可高达 30MPa（4500psia）。受冶金学方面的限制，可以使用的蒸汽温度也是受限的。汽轮机入口的温度可以高达 620°C[7]。

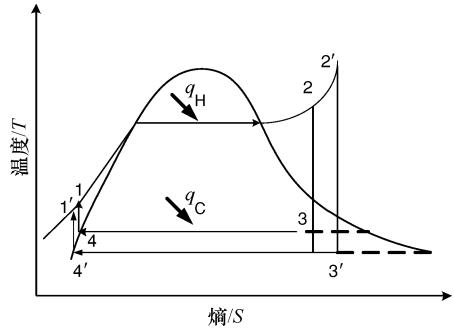


图 6.9　在理想朗肯循环中，将蒸汽过热至较高温度与降低冷凝器压强的影响

6.5.2　再热蒸汽

将蒸汽过热至高温，使得蒸汽能够多级膨胀，而不仅仅是单级膨胀。其好处主要是，再热提高了功率输出和蒸汽干度以保护原料。图 6.10 所示为一个典型的再热朗肯循环。例如，在一个理想的两级膨胀再热朗肯循环中，蒸汽在高压汽轮机级被等熵膨胀至一个中间压强，并被输送给锅炉以便再热。在低压汽轮机

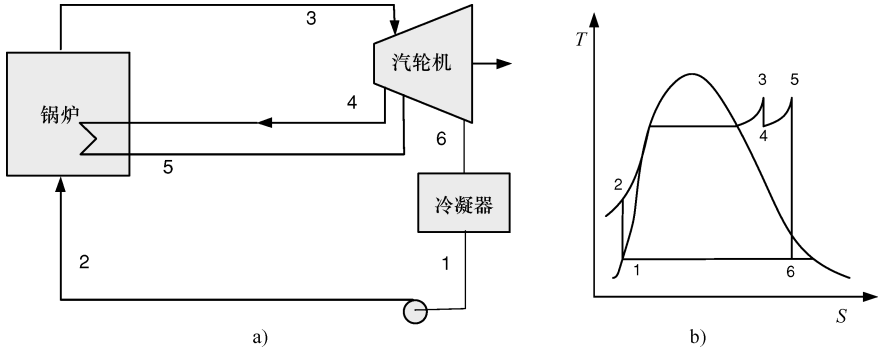


图 6.10　a）理想再热朗肯循环，b）再热朗肯循环的 *TS* 图

级，再热蒸汽被膨胀至冷凝器的运行压强。例 6.6 给出了一个理想再热朗肯循环的简单分析。

例 6.6　一个蒸汽发电厂中的简单再热朗肯循环

在一个蒸汽发电厂中使用简单理想再热朗肯循环，如图 6.10 所示。进入汽轮机的蒸汽为 9000kPa 和 823.15K，流出时为 4350kPa 和 698.15K。蒸汽在等压条件下被再加热至 823.15K。低压汽轮机排放的蒸汽为 10kPa。汽轮机的净输出功率为 40MW。请确定该蒸汽的质量流量。

解：

假设动能和势能的变化可以忽略不计，而且这是一个稳定过程。

考虑图 6.10。

数据：蒸汽数据来自表 F3 和表 F4

$$V_1 = 0.00101\,\mathrm{m^3/kg}, P_3 = 9000\mathrm{kPa}, H_3 = 3509.8\mathrm{kJ/kg}, S_3 = 6.8143\mathrm{kJ/kg}$$

$$P_6 = 10\mathrm{kPa}$$

$$T_4 = 698.15\mathrm{K}, P_4 = 4350\mathrm{kPa}, H_4 = 3268.5\mathrm{kJ/kg}, S_3 = S_4 = 6.8143\mathrm{kJ/kg}$$

$$T_5 = 823.15\mathrm{K}, P_5 = 4350\mathrm{kPa}, H_5 = 3555.2\mathrm{kJ/kg}, S_5 = S_6 = 7.1915\mathrm{kJ/kg}$$

饱和蒸汽和饱和液体数据：

$$H_{6\mathrm{sat\ vap}} = H_{1\mathrm{sat\ vap}} = 2584.8\mathrm{kJ/kg}, H_{1\mathrm{sat\ liq}} = H_{6\mathrm{sat\ liq}} = 191.81\mathrm{kJ/kg}(\text{见表 F3})$$

$$S_{6\mathrm{sat\ vap}} = 8.1511\mathrm{kJ/kg\ K}, S_{6\mathrm{sat\ liq}} = 0.6493\mathrm{kJ/kg\ K}$$

基于蒸汽流量 $\dot{m} = 1\mathrm{kg/s}$：

$$W_{\mathrm{p,in}} = V_1(P_2 - P_1) = 0.00101(9000 - 10)\left(\frac{1\mathrm{kJ}}{1\mathrm{kPa\ m^3}}\right) = 9.08\mathrm{kJ/kg}$$

$$H_2 = H_1 + W_{\mathrm{p,in}} = 200.9\mathrm{kJ/kg}$$

由于这是一个等熵过程，$S_5 = S_6$，$S_1 = S_2$。下面，将估算在通过汽轮机之后排放的湿蒸汽的干度（$S_6 < S_{6\mathrm{sat\ vap}}$）：

$$x_{6s} = (7.1915 - 0.6493)/(8.1511 - 0.6493) = 0.872$$

$$H_6 = [191.81(1 - 0.872)]\mathrm{kJ/kg} + [2584.8(0.872)]\mathrm{kJ/kg} = 2278.7\mathrm{kJ/kg}$$

热相互作用：

$$q_{23,\mathrm{in}} = H_3 - H_2 = 3308.9\mathrm{kJ/kg}$$

$$q_{45,\mathrm{in}} = H_5 - H_4 = 286.7\mathrm{kJ/kg}$$

$$q_{\mathrm{out}} = H_1 - H_6 = 2086.9\mathrm{kJ/kg}$$

$$q_{\mathrm{in}} = q_{23,\mathrm{in}} + q_{45,\mathrm{in}} = 3595.6\mathrm{kJ/kg}$$

$$\dot{W}_{\mathrm{out}} = \dot{m}(q_{\mathrm{in}} - q_{\mathrm{out}}) - \dot{m}(3595.5 - 2086.9)\mathrm{kJ/kg} = 40000\mathrm{kW}$$

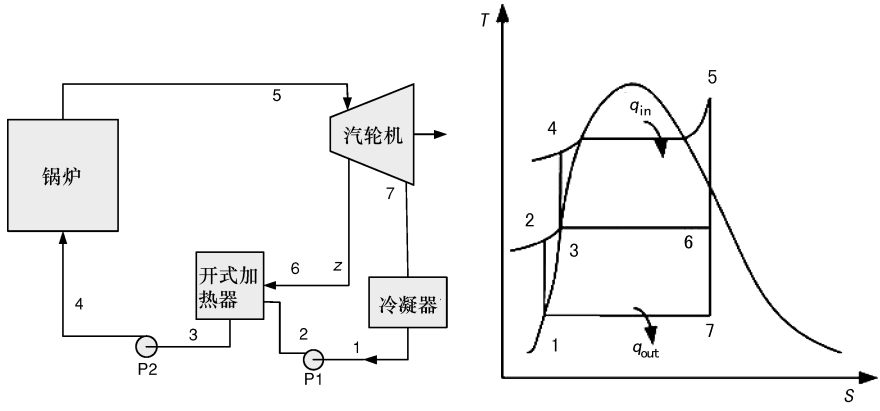
$$\dot{m} = 26.5\mathrm{kg/s}$$

在这个理想再热朗肯循环中，来自高压阶段第一部分的膨胀蒸汽在锅炉中被

再加热，直到它达到锅炉出口的温度为止。再热蒸汽通过汽轮机膨胀到冷凝器的工况条件。再热降低了排放蒸汽里的水分。

6.5.3　能量再生

在一个回热循环中，使用膨胀蒸汽来提高锅炉给水温度是可能的。图 6.11 所示为一个典型的回热朗肯循环。使用从汽轮机中提取的中压蒸汽来为锅炉给水加热。第三级蒸汽通过调节从汽轮机中提取的系统蒸汽分数，该蒸汽流出冷凝器时为饱和液体，其状态为冷凝器工作压强。能量再生有助于去除空气中的水分并控制排放的蒸汽流量。例 6.7 给出了对一个理想回热朗肯循环的简单分析。



a)　　b)

图 6.11　a）理想回热朗肯循环，b）理想回热朗肯循环的温熵图。此处，P1 和 P2 表示循环泵

例 6.7　理想回热朗肯循环的输出功率

一个蒸汽发电厂使用一个理想回热朗肯循环，如图 6.11 所示。进入高压汽轮机的蒸汽为 8200kPa 和 773.15K，冷凝器的运行条件为 20kPa。从汽轮机中提取的蒸汽为 350kPa，用于加热开式加热器的给水。水在通过给水加热器之后成为饱和液体。请确定该循环的净输出功率。

解：

假设动能和势能的变化可以忽略不计，而且这是一个稳态过程。

考虑图 6.11。

计算基础：蒸汽流量为 1kg/s

根据表 F3 和表 F4 可得蒸汽数据：

$$V_1 = 0.001017\text{m}^3/\text{kg}, V_3 = 0.001079\text{m}^3/\text{kg},$$
$$T_5 = 773.15\text{K}, P_5 = 8200\text{kPa}, H_5 = 3396.4\text{kJ/kg}, S_5 = 6.7124\text{kJ/kg}$$
$$P_1 = P_7 = 20\text{kPa},$$
$$H_{7\text{sat vap}} = H_{1\text{sat vap}} = 2609.9\text{kJ/kg}, H_{7\text{sat liq}} = H_{1\text{sat liq}} = 251.45\text{kJ/kg},$$
$$S_{7\text{sat vap}} = 7.9094\text{kJ/kg K}, S_{7\text{sat liq}} = 0.8321\text{kJ/kg K}$$
$$P_2 = P_3 = 350\text{kPa},$$
$$H_{6\text{sat liq}} = H_{3\text{sat liq}} = 584.27\text{kJ/kg}, H_{6\text{sat vap}} = H_{3\text{sat vap}} = 2731.50\text{kJ/kg}$$
$$S_{3\text{sat liq}} = 1.7273\text{kJ/kg K}, S_{3\text{sat vap}} = 6.9392\text{kJ/kg K}$$

在这个理想回热朗肯循环中，从汽轮机中提取的蒸汽为冷凝器中的水加热，然后水被泵入锅炉。有时候，这种情况会在多级系统当中发生。来自给水加热器的冷凝物被以较低的压强节流至下一个加热器中。最终加热器的冷凝物被闪凝进冷凝器中。

$$W_{\text{p1}} = V_1(P_2 - P_1) = 0.001017(350 - 20)\left(\frac{1\text{kJ}}{1\text{kPa m}^3}\right) = 0.335\text{kJ/kg}$$
$$H_2 = H_1 + W_{\text{p1}} = 252.78\text{kJ/kg}$$
$$W_{\text{p2}} = V_3(P_4 - P_3) = 0.001079(8200 - 350)\left(\frac{1\text{kJ}}{1\text{ kPa m}^3}\right) = 8.47\text{kJ/kg}$$
$$H_4 = H_3 + W_{\text{p2}} = 592.74\text{kJ/kg}$$

由于这是一个等熵过程，$S_5 = S_6 = S_7$，将估算在状态 6 和状态 7 时排放的湿蒸汽的干度（$S_5 < S_{6\text{sat Vap}}$）（$S_5 < S_{7\text{sat vap}}$）：

$$x_6 = \frac{6.7124 - 1.7273}{6.9392 - 1.7273} = 0.956$$
$$H_6 = [584.27(1 - 0.956]\text{kJ/kg} + [2731.50(0.956)]\text{kJ/kg} = 2638.0\text{kJ/kg}$$
$$x_7 = \frac{6.7124 - 0.8321}{7.9094 - 0.8321} = 0.83$$
$$H_7 = [252.45(1 - 0.83)]\text{kJ/kg} + [2609.9(0.83)]\text{kJ/kg} = 2211.18\text{kJ/kg K}$$

根据能量平衡来估算所提取蒸汽的质量分数：

$$\dot{m}_6 H_6 + \dot{m}_2 H_2 = \dot{m}_3 H_3$$

根据质量分数 $z = \dot{m}_6/\dot{m}_3$，能量平衡变为

$$zH_6 + (1 - z)H_2 = H_3$$
$$\text{质量分数：} z = \frac{H_3 - H_2}{H_6 - H_2} = 0.139$$
$$q_{\text{in}} = (H_5 - H_4) = 2803.66\text{kJ/kg}$$
$$q_{\text{out}} = (1 - z)(H_7 - H_1) = 1686.52\text{kJ/kg}$$

$$W_{net} = (q_{in} - q_{out}) = 1117.13\text{kJ/kg}$$

6.5.4　再热-回热朗肯循环

在再热-回热朗肯循环中（见图 6.8⊖），从汽轮机中提取的部分蒸汽为冷凝器中的水加热，其余部分在锅炉中被再加热。例 6.8 给出了一个再热-回热朗肯循环的简单分析。

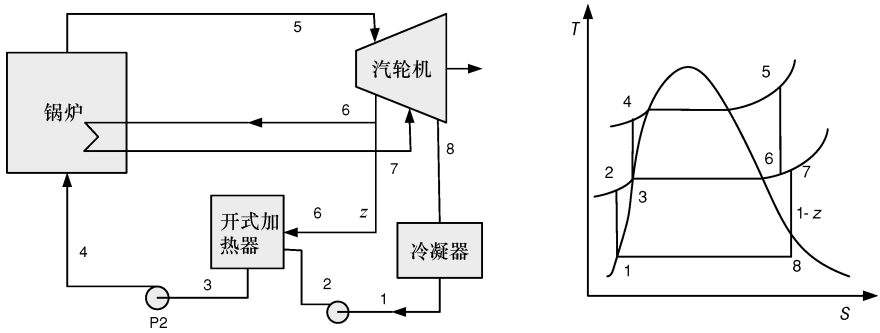


图 6.12　a）理想再热-回热朗肯循环的示意图，b）该循环的 *TS* 图

例 6.8　理想再热-回热循环

一个蒸汽发电厂使用一个理想再热-回热朗肯循环。进入高压汽轮机的蒸汽为 9000kPa 和 773.15K，流出时为 850kPa。冷凝器的运行条件为 10kPa。从汽轮机中提取的部分蒸汽为 850kPa，用于为一个开式加热器中的水加热，在该加热器中，蒸汽和来自冷凝器的液态水混合，并进行直接接触热传递。其余的蒸汽被再加热至 723.15K，并在低压汽轮机级中膨胀至冷凝器的压强。水在通过热水器之后成为饱和液体，其压强等于加热器内的压强。蒸汽流量为 32.5kg/s。请确定它所产生的功率。

解：

假设动能和势能的变化可以忽略不计，而且这是一个稳态过程。

考虑图 6.12。

蒸汽数据来自表 F3 和表 F4：

$$P_5 = 9000\text{kPa}, H_5 = 3386.8\text{kJ/kg}, S_5 = 6.6600\text{kJ/kg K}, T_5 = 773.15\text{K}$$

$$P_1 = P_8 = 10\text{kPa}, H_{8\text{sat vap}} = 2584.8\text{kJ/kg}, H_{8\text{sat liq}} = 191.83\text{kJ/kg},$$

$$V_1 = 0.00101\text{m}^3\text{/kg}$$

⊖ 此处原书有误，应为图 6.12。——译者注

$$S_{8\text{sat vap}} = 8.1511\text{kJ/kg K}, S_{8\text{sat liq}} = 0.6493\text{kJ/kg K}$$

$$P_3 = 850\text{kPa}, H_{3\text{sat liq}} = 732.03\text{kJ/kg}, H_{3\text{sat vap}} = 2769.90\text{kJ/kg},$$

$$V_3 = 0.01079\text{m}^3\text{/kg}$$

$$P_7 = 850\text{kPa}, H_7 = 3372.7\text{kJ/kg}, S_7 = 7.696\text{kJ/kg K}, T_7 = 723.15\text{kPa}$$

$$S_5 \text{ 和 } P_6 = 850\text{kPa} \rightarrow T_6 = 450.0\text{K}, H_6 = 2779.58\text{kJ/kg}$$

估算该蒸汽单位质量流量的功和焓，可得

$$W_{p1} = V_1(P_2 - P_1) = 0.00101(850 - 10)\left(\frac{1\text{kJ}}{1\text{kPa m}^3}\right) = 0.848\text{kJ/kg}$$

$$H_2 = H_1 + W_{p1} = 192.68\text{kJ/kg}$$

$$W_{p2} = V_3(P_4 - P_3) = 0.001079(9000 - 850)\left(\frac{1\text{kJ}}{1\text{kPa m}^3}\right) = 90.046\text{kJ/kg}$$

$$H_4 = H_3 + W_{p2} = 7410.07\text{kJ/kg}$$

由于这是一个等熵过程，$S_5 = S_6 = S_7 = S_8$，估算在状态 8 时排放的湿蒸汽的蒸汽干度（$S_7 < S_{8\text{sat vap}}$）：

$$x_8 = \frac{7.696 - 0.6493}{8.1511 - 0.6493} = 0.94$$

$$H_8 = [191.83(1 - 0.94)]\text{kJ/kg} + [2584.8(0.94)]\text{kJ/kg} = 2439.63\text{kJ/kg}$$

根据能量平衡来估算所提取蒸汽的质量分数：

$$\dot{m}_6 H_6 + \dot{m}_2 H_2 = \dot{m}_3 H_3$$

根据质量分数 $z = \dot{m}_6/\dot{m}_3$，能量平衡变为

$$zH_6 + (1 - z)H_2 = H_3$$

质量分数为

$$z = \frac{H_3 - H_2}{H_6 - H_2} = \frac{732.03 - 192.68}{2779.58 - 192.68} = 0.208$$

质量流量 $\dot{m} = 1\text{kg/s}$ 的工作流体的汽轮机输出功为

$$q_{\text{in}} = [(H_5 - H_4) + (1 - z)(H_7 - H_6)] = 3115.18\text{kW}$$

$$q_{\text{reheat}} = z(H_7 - H_6) = 593.12\text{kW}$$

$$q_{\text{out}} = (1 - z)(H_8 - H_1) = 1779.14\text{kW}$$

当蒸汽的流量为 36.5kg/s 时：

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{m}_s(q_{\text{in}} - q_{\text{out}}) = 48764\text{kW} = 48.8\text{MW}$$

6.6　地热发电站

图 6.13 所示为一个地热发电站的示意图。地热的能量来自埋藏于在地球表

面之下的热能。地热发电站有三种类型：

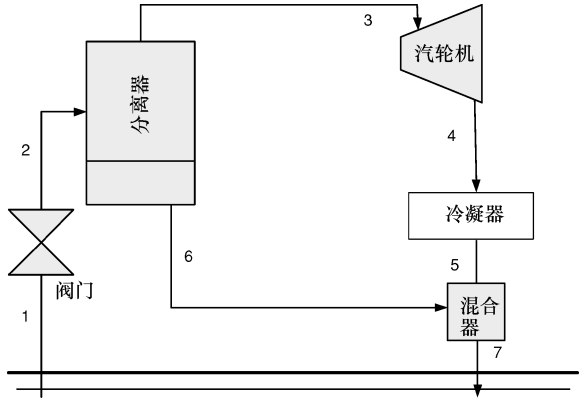


图 6.13　一个地热发电站的示意图

- 干蒸汽发电站：地热蒸汽直接进入一个汽轮机，它在其中膨胀并产生功率。膨胀蒸汽被注入地热井中。
- 闪蒸发电站：温度高于 360°F（182°C）的地热流体能够在一个低压容器内闪蒸，这种闪蒸会导致部分流体快速蒸发。随后，该蒸汽会在一个汽轮机中膨胀。
- 双循环发电站：常用温度在 85 ~ 170°C的中温地热流体。所谓“双”是指双流体系统，其中，地下热卤水通过一个热交换网络泵出，并将其能量传递给驱动传动系的工作流体。地热流体与沸点远低于该地热流体的合适的工作流体通过一个热交换器。蒸发的工作流体将驱动汽轮机，没有工作流体被排入大气。工作流体可以是异丁烯、异戊烷、正戊烷或者氨。

在温度低于200°C时，双循环发电系统因其成本效益而备受青睐。在温度高于200°C时，通常会优先考虑将地热流体闪蒸来产生蒸汽，并直接驱动汽轮机/发电机。例 6.9 给出了对一个使用地热能源的蒸汽发电站的简单分析[4,10]。

例 6.9　使用地热能源的蒸汽发电站

一个蒸汽发电厂使用地热能源。可用的地热能源为 220°C 和 2319.8kPa，流量为 200kg/s。热水通过一个阀门和一个闪蒸罐。蒸汽从闪蒸罐进入汽轮机时为 550kPa 和 428.62K。汽轮机排出蒸汽的干度为 $x_4 = 0.96$。冷凝器的运行条件为 10kPa。水在通过冷凝器之后成为饱和液体。请确定汽轮机的输出功。

解：

假设：动能和势能的变化可以忽略不计，而且这是一个稳态过程。

蒸汽数据来自表 F3 和表 F4：

$T_1 = 493.15\text{K}, P_1 = 2319.8\text{kPa}, H_1 = H_2 = 943.7\text{kJ/kg}, S_1 = 2.517\text{kJ/kg K}$,

$$T_3 = 428.62\text{K}, P_3 = 550\text{kPa}, H_3 = 2751.7\text{kJ/kg}, S_3 = 6.787\text{kJ/kg K}(\text{饱和}),$$
$$H_{3\text{sat vap}} = 2551.7\text{kJ/kg}, H_{3\text{sat liq}} = 655.80\text{kJ/kg}, S_{3\text{sat vap}} = 6.787\text{kJ/kg K},$$
$$S_{3\text{sat liq}} = 1.897\text{kJ/kg K}$$
$$P_4 = 10\text{kPa}, H_{4\text{sat vap}} = 2584.8\text{kJ/kg}, H_{4\text{sat liq}} = 191.8\text{kJ/kg}$$

在这个地热发电站中，热水被闪蒸并产生蒸汽。该蒸汽用于汽轮机。蒸汽量的估算是根据状态 2 时的蒸汽干度。闪蒸之后的蒸汽分数为

$$x_2 = \frac{943.7 - 655.8}{2751.7 - 655.8} = 0.159$$
$$S_2 = (1 - 0.159)1.897 + 0.159(6.787) = 2.6756$$

蒸汽流量为　$\dot{m}_3 = x_2(\dot{m}_1) = 0.159(200) = 31.84\text{kg/s}$[⊖]

根据闪蒸罐的质量平衡，可以得到 $\dot{m}_6 = \dot{m}_1 - \dot{m}_3 = 168.15\text{kg/s}$

排放蒸汽的蒸汽干度为 $x_4 = 0.96$

$$H_4 = (1 - 0.96)H_{4\text{sat liq}} + (0.96)H_{4\text{sat vap}} = 2489.08\text{kJ/kg}$$

根据处于状态 6 的闪蒸罐，可以得到

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{m}_3(H_4 - H_3) = -8363.71\text{kW}$$

6.7　热电联产

图 6.14 所示为一个典型的热电厂。热电厂使用同一热能来源进行发电和过程加热，这可能会导致利用更多的有效能并减少废热。例如，一个热电厂可以使用来自布雷顿发动机的废热，通常是用于热水生产或用于空间供暖。工厂中的过程加热通常要求蒸汽为 500 ~ 700kPa 与 150 ~ 200°C。在汽轮机中膨胀至过程压强的蒸汽被用于为过程加热。利用热电联产的循环可以是一个大过程的集成部分，其中，来自汽轮机的中压膨胀蒸汽的能量可以完全同时用于发电和过程加热。一个热电厂的利用因子为用于发电和过程加热的能量与总输入能量之比。例 6.10 和例 6.11 给出了热电厂能量输出的简单分析[4,7]。

例 6.10　热电厂的能量输出

一个热电厂使用的蒸汽为 8200kPa 和 773.15K（见图 6.14）。其中，1/4 的蒸汽提取自汽轮机（700kPa）用于热电联产。在使用该蒸汽对过程进行加热之

⊖　此处原书似有误，计算结果应为 31.8kg/s，则之后 $\dot{m}_6$ 的结果应为 168.2kg/s。——译者注

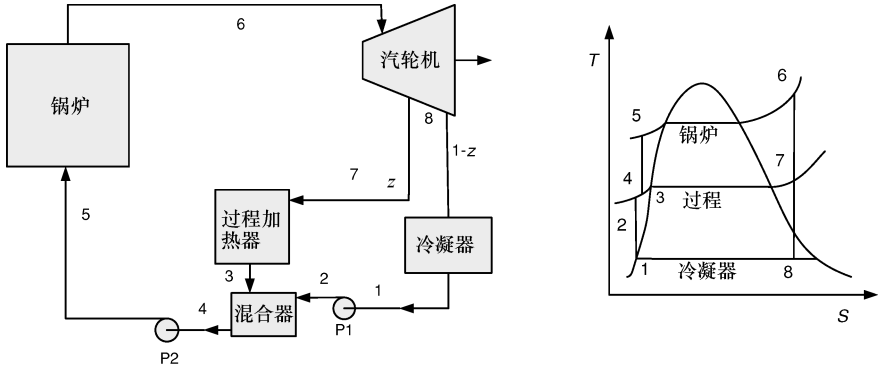


图 6.14　a）理想热电厂的示意图，b）*TS* 图

后，提取的蒸汽被冷凝，并与冷凝器的输出水相混合。其余的蒸汽从 8200kPa 膨胀至冷凝器的压强 10kPa。在锅炉中产生的蒸汽流量为 60kg/s。请确定其产生的输出功和过程热。

解：

假设动能和势能的变化可以忽略不计，而且这是一个稳态过程。

考虑图 6.14。

蒸汽数据来自表 F3 和表 F4：

$$\dot{m} = 60\text{kg/s}, z = 0.25$$

$$P_1 = P_8 = 10\text{kPa}, H_{1\text{sat vap}} = 2584.8\text{kJ/kg}, H_{1\text{sat liq}} = 191.83\text{kJ/kg},$$

$$V_1 = 0.00101\text{m}^3\text{/kg}, S_{1\text{sat vap}} = 8.1511\text{kJ/kg K}, S_{1\text{sat liq}} = 0.6493\text{kJ/kg K}$$

$$P_3 = P_7 = P_2 = P_4 = 700\text{kPa}, H_3 = 697.06\text{kJ/kg}, S_3 = 1.9918\text{kJ/kg K}$$

根据表 F4：

$$P_6 = 8200\text{kPa}, T_6 = 773.15\text{K}, H_6 = 3396.4\text{kJ/kg}, S_6 = 6.7124\text{kJ/kg K}$$

在这个热电联产循环中，从汽轮机中提取的蒸汽用为过程加热。从过程加热中得到的冷凝液体与冷凝器的输出水相混合。

计算基础：质量流量 = 1kg/s

$$W_{\text{p1}} = V_1(P_2 - P_1) = 0.00101(700 - 10)\left(\frac{1\text{kJ}}{1\text{kPa m}^3}\right) = 0.697\text{kJ/kg}$$

$$H_2 = H_1 + W_{\text{p1}} = (191.83 + 0.697)\text{kJ/kg} = 192.53\text{kJ/kg}$$

根据混合器的能量平衡，可以得到$\dot{m}_3/\dot{m}_6 = 0.25$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_4 = 60\text{kg/s}, \dot{m}_3 = \dot{m}_7 = 15\text{kg/s}, \dot{m}_8 = \dot{m}_1 = 0.75(60)\text{kg/s} = 45.0\text{kg/s}$$

$$\dot{m}_4 H_4 = \dot{m}_2 H_2 + \dot{m}_3 H_3$$

$$H_4 = [45(192.53) + 15(697.06)]\text{kJ/kg}/60 = 318.66\ \text{kJ/kg}$$

$$T_4 = 349.15\ \text{K}, V_4 = 0.001027\text{kg/m}^3$$

$$W_{p2} = V_4(P_5 - P_4) = 0.001027(8200 - 700)\left(\frac{1\text{kJ}}{1\text{kPa m}^3}\right) = 7.70\text{kJ/kg}$$

$$H_5 = H_4 + W_{p2} = 326.36\text{kJ/kg}$$

等熵过程：$S_6 = S_7 = S_8 = 6.7124$，$P_7 = 700\text{kPa}$，$H_7 = 2765.68\text{kJ/kg}$。

然后，估算状态 8 时排放湿蒸汽的蒸汽干度：

$$x_8 = \frac{6.7124 - 0.6493}{8.1511 - 0.6493} = 0.808$$

$$H_8 = [191.83(1 - 0.808) + 2584.80(0.808)]\text{kJ/kg} = 2125.87\text{kJ/kg}$$

根据能量平衡，可得所提取蒸汽的分数：

$$\dot{W}_{\text{total}} = \dot{m}_6(H_7 - H_6) + \dot{m}_8(H_8 - H_7) = -66634.44\text{kW}$$

$$\sum \dot{W}_{pi} = \dot{m}_1 W_{p1} + \dot{m}_4 W_{p2} = 493.51\text{kW}$$

净输出功为

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_{\text{total}} - \sum \dot{W}_{pi} = -66140.93\text{kW}$$

$$\dot{q}_{\text{process}} = \dot{m}_7(H_7 - H_3) = 31029.3\text{kW}$$

例 6.11　热电厂中过程热的估算

一个热电厂使用 900psia 的 1000°F 的蒸汽来发电和过程加热。来自锅炉的蒸汽流量为 16lb/s。该过程所需的蒸汽为 70psia，流速为 3.2lb/s 由汽轮机中的膨胀蒸汽来提供（$z = 0.2$）。提取的蒸汽被冷凝，并与冷凝器的输出水相混合。剩余的蒸汽从 70psia 膨胀至冷凝器压强 3.2psia。请确定用于过程加热的热量。

解：

假设动能和势能的变化可以忽略不计，而且这是一个稳态过程。

考虑图 6.14。蒸汽数据来自表 F1 与表 F2：

$$\dot{m}_6 = 16\text{lb/s}, z = \dot{m}_3/\dot{m}_6 = 0.2, \dot{m}_3 = 3.2\text{lb/s}$$

$$P_1 = P_8 = 3.2\text{psia}, H_{1\text{sat vap}} = 1123.6\ \text{Btu/lb}, H_{1\text{sat liq}} = 111.95\text{Btu/lb}$$

$$V_1 = 0.01631\text{ft}^3\text{/lb}$$

$$S_{1\text{sat vap}} = 0.2051\text{Btu/lb °R}, S_{1\text{sat liq}} = 1.8810\text{Btu/lb °R}$$

$$P_3 = 70\text{psia}, H_3 = 272.74\text{Btu/lb(饱和)},$$

$$P_6 = 900\text{psia}, H_6 = 1508.5\text{Btu/lb}, S_6 = 1.6662\text{Btu/lb °R}, T_6 = 1000°\text{F}$$

在这个热电联产循环中，从汽轮机中提取的蒸汽用于过程加热。从过程加热中得到的冷凝液体与冷凝器的输出水相混合。

计算基础：质量流量 = 1lb/s

$$W_{p1} = V_1(P_2 - P_1) = 0.01631(70 - 3.2)\left(\frac{1\text{Btu}}{5.4039\text{psia ft}^3}\right) = 0.20\text{Btu/lb}$$

$$H_2 = H_1 + W_{p1} = (111.95 + 0.20)\text{Btu/lb} = 112.15\text{Btu/lb}$$

根据混合器的能量平衡，可以得到 $z = 0.2$：

$$\dot{m}_4 H_4 = \dot{m}_2 H_2 + \dot{m}_3 H_3 \quad H_4 = (\dot{m}_2 H_2 + \dot{m}_3 H_3)/\dot{m}_4$$

计算基础：1lb/s，则有 $\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = 0.8\text{lb/s}$，$\dot{m}_3 = 0.2\text{lb/s}$，$\dot{m}_4 = 1\text{lb/s}$

$$H_4 = [0.8(112.18) + 0.2(272.74)]\text{Btu/lb}/1 = 144.29\text{Btu/lb} \rightarrow S_4 = 0.2573\text{Btu/lb°R}$$

$$T_4 = 635.87°\text{R}$$

$$W_{p2} = V_4(P_5 - P_4) = 0.0175(900 - 70)\left(\frac{1\text{Btu}}{5.4039\text{psia ft}^3}\right) = 2.7\text{Btu/lb}$$

$$H_5 = H_4 + W_{p2} = 147.0\text{Btu/lb}$$

由于这些是等熵过程，$S_6 = S_{7s} = S_{8s} = 1.6662\text{Btu/lb °R}$

$$P_7 = 70\text{psia}, H_{7s} = 1211.75\text{Btu/lb}$$

在状态 8s 时排放湿蒸汽的蒸汽干度为

$$x_{8s} = \frac{1.6662 - 0.2051}{1.8810 - 0.2051} = 0.871$$

$$H_{8s} = [111.95(1 - 0.871) + 1123.6(0.871)]\text{Btu/lb} = 993.93\text{Btu/lb}$$

在状态 8 时的蒸汽干度为 $x_8 = \dfrac{993.9 - 111.95}{1123.60 - 111.95} = 0.87$

过程加热：$\dot{q}_{\text{process}} = \dot{m}_3 (H_7 - H_3) = 3004.8\text{Btu/s}$

6.8　核电站

核能是通过一个核裂变过程将水加热来产生蒸汽的一种方法。核裂变是一个核反应，在该反应中，一个原子的原子核被分解为更小的部分，经常产生自由中子和伽马射线（γ）形式的光子。伽马射线是频率高于 1019Hz 的电磁辐射，因此它的能量高于 100KeV，波长小于 10pm。在一个核电站中，反应器包括核燃料，主要是铀。当铀燃料的原子被中子撞击时，它们会发生裂变（分裂），释放出热量和更多的中子。在可控的情况下，这些中子能够撞击并分裂出更多的铀原子。

典型的裂变会释放出大约 2 亿 eV 的能量（1eV 为 96.485KJ/mol）。与此相对，大多数化学氧化反应，比如燃烧煤，顶多会释放几 eV。在一个核反应堆中，能量被转换成热能，随着组成反应器的粒子和伽马射线与原子相碰撞，其工作流

体通常是水，偶尔使用重水。

另一方面，核聚变发电是通过核聚变反应来实现的，在这个反应中，两个轻原子核融合在一起生成一个更重的原子核，在这种情况下，释放出巨大的能量。如果两个轻原子核融合，它们通常会形成一个单个原子核，其质量略小于它们的原始质量之和。根据爱因斯坦的质能守恒公式 $E = mc^2$，这个质量差会以能量的形式释放出来。“轻”、“重”之间的分界线就是 Fe－56。超出这种原子质量，能量通常会通过核裂变反应的方式来释放。大多数核聚变反应将将氢的同位素氕、氘或者氚组合生成氦的同位素^{3}He 或^{4}He。大多数核聚变发电厂会使用核聚变反应来产生热，用来驱动一个蒸汽轮机，最终驱动发电机实现发电。这与大多数燃煤、燃油和燃气发电厂类似[3]。

核聚变需要精确地控制温度、压强和磁场参数来生成净能量。如果核反应堆坏了，这些参数将会变得非常混乱，同时反应堆中的热量生成也将很快停止。相对地，在一个核裂变反应堆中，核裂变产物可以在反应堆停机之后连续数小时甚至数天产生热量，这就意味着，由于连续累积的热量，燃料杆甚至有可能在反应堆已经停机之后发生熔化。

6.9　水电站

水电是一个使用流水的力推动水轮机旋转的过程，该水轮机与一台发电机相连接以实现发电。大多数水电能来自于驱动水轮机和发电机的库坝蓄水的势能。从水中提取的能量取决于水的体积和水的势能，水的势能与水头成正比，它来自于水源和出口之间的高度差。一个水电站发电的简化近似公式为

$$\dot{W} = \dot{Q}\rho g\Delta z = \dot{m}g\Delta z \tag{6.13}$$

式中，$\dot{W}$为电能；ρ 为水的密度（约等于 1000kg/m^3）；Δz 为高度；$\dot{Q}$ 为体积流量；g 为重力加速度。

年度发电量取决于供应的可用水。在某些应用场景中，全年的水流量变化因子可以高达 10∶1。例 6.12 给出了水电发电量的分析。

水电站避免了化石燃料的使用，进而也避免了二氧化碳的排放。水电站比燃料发电的经济寿命也长（50 年或者更长）。水电销售可以在满负荷运行 5～8 年之后收回建设成本[15]。它的运行劳动力成本通常也比较低，因为水电站是自动化的。水电发电容量是指实际的年度发电量或者装机容量。从全年来看，一个水电站很少以它的满负荷容量运行。一个水电站的年度平均发电量与装机容量之比即容量因数。水电站有大型、小型与微型之分，具体总结如下：

- 大型水电站的出力从几百兆瓦到 10GW 以上不等。许多大型水电项目可

为公共电网供电。这些大型水电设施的建设及其对环境的影响受专业机构监测，比如国际水电站协会（International Hydropower Association，http：//hydropower. org/）。

- 小型水电站容量高达 10 MW。一些小水电站用来为特定的工厂服务，比如铝电解厂，这种工厂需要大量的电力。
- 微型水电站的典型装机容量最高可达 100kW。这些装机容量能够为一个独立住户或者小型社区提供电力。有时候，微型水电系统还可以为光伏太阳能系统提供补充，由于水流和可用的水电能量在冬天可以达到最高，而太阳能则恰巧处于最低水平。

例 6.12　水电发电量

一个水电站的水高度落差为 200ft。水电站的水轮机将势能转换成电能，电力传输的能量损失大约为 5%，因此可用的电能为 95%。如果水的质量流量为 396lb/s，请估算水电站的出力。

解：

方程：
$$\dot{W} = \frac{\dot{m} g \Delta z}{g_e}$$

数据：$\Delta z = 200\text{ft}$，水流量为 396lb/s，传输损失为 5%

$$\dot{W} = \frac{(396\text{lb/s})(32.2\text{ft}^2/\text{s})(200\text{ft})}{32.2\text{ft lb/lb}_\text{f}\text{s}^2}\left(\frac{1.055\text{kW}}{778\text{lb}_\text{f}\text{ft/s}}\right) = 107.4\text{kW}$$

除去传输损失的可用电能为 $107.4\text{kW}(1-0.05) = 102.0\text{kW}$。

6.10　风电场

地球接受太阳的照射受热并不均衡，这种热差能够驱动全球的大气对流系统，从而导致了风的出现。风力发电使用风力发电机组将风能转换为电能。风力发电机组是一组将风的动能转换为旋转轴机械能的装置。发电机通常通过齿轮连接到风力机轴上，齿轮再在推动发电机以不同于风力机轴的转速旋转。使用电力电子设备来控制电力，并将其变换成正确的频率和电压，并输入 60Hz 或 50Hz 的电网。

通过风力发电机组产生的发电量与风的动能成正比。风的动能等于每单位质量空气的动能与通过叶片翼展面积的空气质量流量之积：

风力发电 =（效率）（动能）（空气质量流量）

$$\dot{W}_{\text{wind}} = \eta_{\text{wind}} \frac{v^2}{2}(\rho A v) = \eta_{\text{wind}} \frac{v^2}{2} \rho \frac{\pi D^2}{4} v \tag{6.14}$$

在重新整理之后，可以得到

$$\dot{W}_{\text{wind}} = \eta_{\text{wind}}\rho\frac{\pi v^3 D^2}{8} = (\text{常数})v^3D^2 \tag{6.15}$$

$$\text{常数} = \frac{\eta_{\text{wind}}\rho\pi}{8} \tag{6.16}$$

式中，ρ 为空气密度；v 为空气流速；D 为风力发电机组的叶片直径；η_{wind}为风力发电机组的效率。

因此，风力发电机组产生的功率与风速的三次方和叶片翼展直径的二次方成正比。风的强度变化以及给定位置的平均值并不能独自表示该位置的风力发电机组所能产生的能量值。为了评估某个特定位置的风的频率，通常使用一个概率分布函数来观察数据。

到2009年年底，世界范围的风力发电机总容量为159.2GW。大规模风电场被连接至电力传输网络，而较小的设施则用于为独立位置提供电力。作为化石燃料的替代，风能是丰富的清洁可再生能源，它分布广泛，而且在运行期间不会产生温室气体排放。风力发电是不可调度的，而且对于经济运行来说，当它可用时，才能够提供所有的可用输出。易变性是电网储能、电池、抽水蓄能水电与能量需求管理所要重点考虑的问题。风力发电可以忽略燃料成本，设备的预期有效寿命将超过20年，但是其资本成本较高。估算的每单位平均成本包括汽轮机与传输设施的建设成本[1,24]。

在一个风电场中，单个的汽轮机与一个中压（经常是34.5KV）、能量收集系统和通信网络互相连接。在一个变电站中，这种中压电流的电压通过一个与高压电力传输系统相连接的变压器而增高。风力发电机组发电机需要对动态机电特征进行广泛的建模，用以确保其稳定行为。风力发电的年度平均发电量与装机容量等级之间的比率为容量因数。典型的风力发电容量因数在20%~40%变化。例6.13给出了风机的相关计算。

风电穿透功率是指风的发电量与总的可用容量之比。风电穿透功率并没有一个被广泛接受的最大水平。一个互相连接的电力电网通常包括备用容量和传输容量以防备设备出现故障之用，这种备用容量也可以用于调节风电站的发电变化。目前，只用很少几个电网系统的风能穿透率超过了5%；尽管使用了功率预测方法，对于短期运行来说，风电站出力的可预测性依然很低。抽水蓄能水电或其他形式的电网储能能够储存高峰期建立的能量，并在需要时释放。

除了风自身的可用性，其他因素还包括传输线的可用性、能量的价值、土地征用成本、土地使用问题以及建设和运行的环境影响。风功率密度为风在特定位置的有效功率的计算值。一张显示风功率密度分布的地图是确定风力发电机组可能位置的第一步。

小规模风力发电的装机容量最高可达 50kW。独立社区可以使用小规模风力发电机组来取代化石燃料消耗。例 6.13 讨论了风机的发电情况。

例 6.13　风机功率的估算

一个风电场为一个社区提供的发电量为 1MW。每个风机的叶片直径为 10m。风力机所在位置的平均风速为 11m/s，平均温度为 20°C。请估算需要安装风机的最低数量。

解：

空气为理想气体，压强为大气压。

入口：

$v=11\text{m/s}, R=8.314\text{kPam}^3/\text{kmol K}, T=293\text{ K}, D=10\text{m}, \text{MW}_{\text{air}}=29\text{kg/kmol}$

功率输出 = 1 MW

空气的密度为

$$\rho=(\text{MW})\frac{P}{RT}=\frac{(29\text{kg/kmol})101.3\text{kPa}}{(8.314\text{kPa m}^3/\text{kmol K})(293\text{K})}=1.2\text{m}^3/\text{kg}$$

空气的质量流量为：$\dot{m}=\rho Av=\rho\pi\frac{D^2}{4}v=1036.2\text{kg/s}$

每台风机的功率为

$$\text{KE}=\dot{m}\frac{v^2}{2}=1036.2\text{kg/s}\frac{(11\text{m/s})^2}{2}\left(\frac{\text{kJ/kg}}{1000\text{m}^2/\text{s}^2}\right)=62.7\text{kW}$$

需要安装的风机最小数目为

1000kW/62.7kW = 16 台风机

6.11　太阳能发电站

太阳能发电来自于太阳光的能量。每天的平均日照变化为 150 ~ 300W/m^2（或 3.5 ~ 7.0kWh/m^2）不等。将太阳能转换为电能有两种主要的技术类型：光伏与太阳能热发电（见图 6.15 和图 6.16）。

- 太阳能电池光伏转换直接通过太阳光发电。光伏电池有多种类型，比如薄膜、单晶硅、多晶硅与非晶电池，此外还有多种类型的集中式太阳能发电。光伏发电最初是用于小规模和中等规模的应用，具体包括从通过为计算器供电的单个太阳能电池，一直到为非并网家庭供电的光伏组件（见图 6.15a）。
- 基于集中式太阳能发电系统的太阳能热电生产，使用透镜或反射镜和跟踪系统，将大面积的太阳光聚焦为一个小光束。集中式太阳能热量用于产生蒸汽去驱动汽轮机并实现发电。一个抛物线槽包含一个线性抛物线反射器，它将太阳



图 6.15 a）奥伯林学院的 Adam Joseph Lewis 环境研究中心的光伏系统。b）此处所示的 150MW Kramer Junction 发电站是 354MW 太阳能发电系统（SEGS）设备系列的一部分，每台设备均使用抛物线槽式集热器来收集太阳能以产生蒸汽去驱动一个传统的蒸汽轮机。该电站已在加利福尼亚州莫哈韦沙漠运行 20 多年了。c）最近投产的美国亚利桑那州图森市外的 1MW Saguaro 发电厂使用的抛物线槽式太阳能集热器，将太阳光集聚在沿抛物线槽焦线布置的接收管上。太阳能将接收管内的工作流体加热，它能够将二次流体蒸发以驱动涡轮机[22]

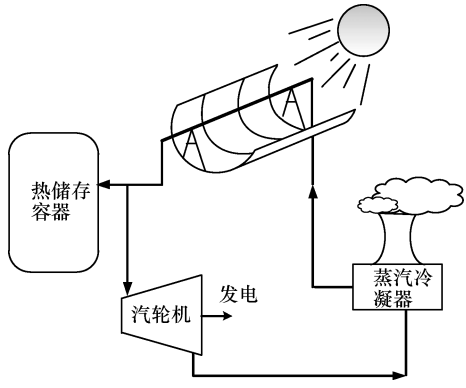
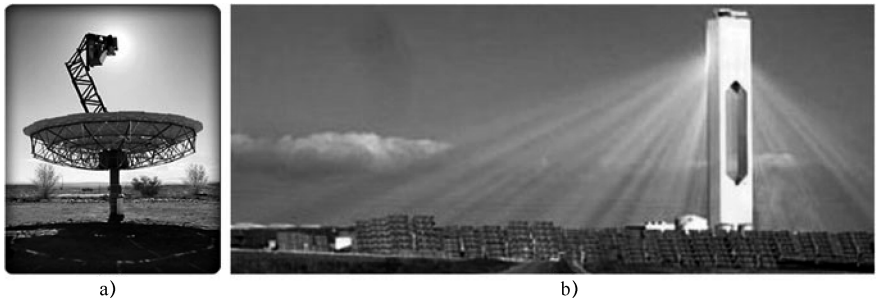


图 6.16 集中式太阳能发电技术提供实用规模发电[12]

光集聚在沿反射器焦线布置的接收管上（见图 6.15b、c 与图 6.16）。接收管是一个位于抛物线反射镜中间之上的管道，它充满了工作流体。反射器被设计成沿着单轴来跟踪日照期间的太阳[25]。

一个斯特灵太阳能碟包含一个独立的抛物线反射器，该反射器将太阳光集聚在位于反射器焦点的接收器之上。反射器沿着两个轴跟踪太阳，并通过抛物线碟式太阳能聚光器来获取太阳能。集中的能量驱动一个斯特林热机，它通过推动发电机旋转来发电[17]。图 6.17a 所示为一个斯特灵集中式太阳能发电系统。相对于光伏电池，斯特灵太阳能的优点是将太阳光转换成电能的效率较高，而且其生命周期更长。



a) b)

图 6.17 a）斯特灵太阳能碟式发电，b）位于西班牙塞维利亚安达卢西亚的全球第一个商业太阳能发电塔

一个太阳能发电塔将太阳光集聚在塔顶上的中央接收器上，它安装于大片面积的中心（见图 6.17b）。称为定日镜（日光反射装置）的反射镜全天跟踪太阳，并将太阳光反射到接收器之上。早期的设计使用太阳能将水加热为蒸汽去驱动汽轮机。新系统使用液体盐，利用了它的热特性。这种盐通常是 60% 硝酸钠与 40% 硝酸钾的混合物。该混合物将在 220°C/428°F时溶化。当冷盐从储存容器中泵出时，通过接收器，聚焦的太阳光将其加热到 1000°F以上。热盐将通过一个热交换器，从而产生蒸汽来驱动汽轮机。在所有的集中式太阳能发电技术当中，电力塔更具成本效益，它能提供较高的效率和较好的储能容量。

近年来安装的太阳能也已经开始扩展到住宅领域，通过政府提供的鼓励计划使得可再生能源（绿色能源）成为一种更为经济而且切实可行的选择[5]。

6.12 氢气生产

氢气并不能自然产生，因此它必须使用其他能源来生产。天然气蒸汽转化法是生产商用大批量氢气的最常用的方法，这也是成本最低的方法。在高温并使用金属基催化剂（镍）时，蒸汽与甲烷反应生成一氧化碳和氢气。这两个反应在自然界是可逆的。

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 (750 \sim 800°C, 吸热) \qquad (6.17)$$

额外的氢气能够在低温下通过气体变换反应而恢复：

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 (在\ 190 \sim 210°C 低温时变换; 放热) \qquad (6.18)$$

表 6.1 为全球氢的生产来源。地球上的大部分氢是与水中的氧结合在一起的。因此，氢气像电力一样，是一种能量载体，而不是像天然气那样的一次能源。氢气燃烧非常清洁，产生很少或者是根本没有有害物或 CO_2 排放。在所有已知的燃料中，它的单位重量的含能量最高。当氢用于燃料电池时，它所排放的

废弃物只有水。

表 6.1　全球的氢气生产

来源	(%)
天然气	48
石油	30
煤	18
水	4

为了使氢气成为一种可再生能源燃料，它应该使用可再生能源来生产，比如使用风力发电或太阳能发电等。大约一半的氢气产量用于使用哈伯（Haber）过程实现的氨（NH_3）合成。氨可以直接地或间接地用做化肥。另一半的氢气用于将重油资源转化成较轻的馏分以用作燃料。

氢气也可以通过水的电解来产生，在这个过程中，水被分解为氢气和氧气：

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \tag{6.19}$$

目前，水电解过程效率最高为 50% ~ 80%，因此生产 1kg 氢气需要 50 ~ 80kWh 电能。使用光伏系统发电可以为氢气生产提供最清洁的方式。光电化学发电系统可以产生足够的电压来电解水。

氢气也可以通过生物质资源的高温分解或气化来生产，比如花生壳等农业残余物、包括塑料与废油脂在内的生活垃圾，或者专门为此种植的生物质。生物质高温分解产生生物石油，其中包括含有包括氢气在内的多种有价值的化学品和燃料。在太阳能驱动的一个热化学过程中，可以使用高度集中的太阳光来产生将甲烷分解成氢气和碳所需的高温

$$CH_4 + \text{加热} \rightarrow C + 2H_2 \tag{6.20}$$

产生的氢气能够被再循环回萨巴蒂埃（Sabatier）过程。

6.13　燃料电池

燃料电池将一种燃料（比如氢气或甲烷）电化学氧化来产生电力。它包含经由一种电解质而分开的两个电极。燃料和氧气被连续地输入电池，同时，反应产物被连续地提取出来。燃料与阳极（燃料电极）紧密相联。常见于空气中的氧气则与阴极（氧电极）紧密相联。每个电极处都发生半电池反应，半电池反应之和即总体反应。电解质的类型决定了燃料电池的类型。图中 6.18 使用氢气作为燃料的燃料电池示意图。当电解质为酸性时，发生在氢电极（阳极）和氧电极（阴极）的半电池反应分别为

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \text{（阳极）} \tag{6.21}$$

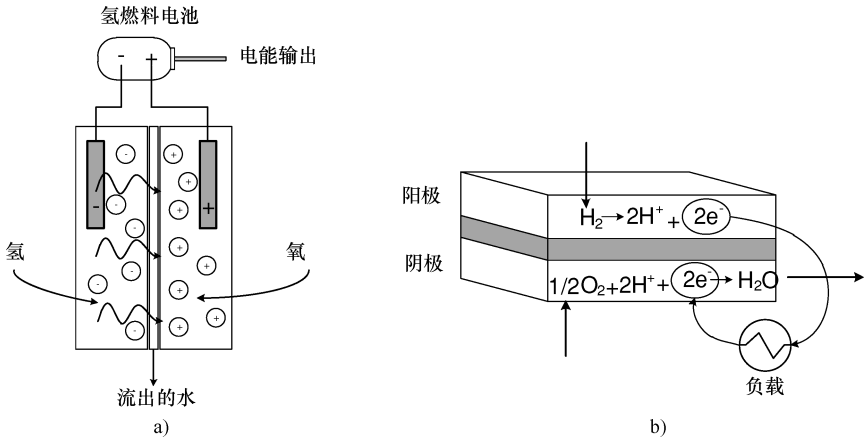


图 6.18　a）氢燃料电池的示意图，废弃产物为水，b）一个使用酸性电解质的氢/氧燃料电池的半电池反应

$$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2O(g)(\text{阴极}) \tag{6.22}$$

阳极释放带有负电荷（e^-）的电子。这些电子产生一个电流供阴极发生的反应使用。该电流通过一个外部电路输送出去。阳离子 H^+ 通过电解质从阳极迁移到阴极。半电池反应之和即燃料电池所发生的总体反应：

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O(g) \tag{6.23}$$

一个被称为质子交换膜的固体薄聚合物用作一个氢/氧燃料电池中的酸性电解质。膜两侧都与一个多孔的碳电极相连，其中浸满了作为催化剂的铂。该多孔电极为反应提供了一个非常大的接口面积，而且便于氢和氧扩散到电池当中，同时也便于水蒸气逸出电池。电池能够被串联，以便形成达到所需的能量输出水平的紧凑单元，而且其工作温度接近于 60°C。

对于消耗掉的每 mol 氢，有 2mol 的电子被传输到外部电路。因此，电能（功）为被传输的电荷与电池电压 V 之积：

$$W_e = -2FV = \Delta G \tag{6.24}$$

式中，F 为法拉第常数（$F = 96485\text{C/mol}$）；ΔG 为吉布斯（Gibbs）能量。

可逆等温燃料电池的电功为

$$W_e = \Delta H - q = \Delta G \tag{6.25}$$

假定一个氢/氧燃料电池运行于 20°C和 1bar，反应物为纯氢和氧，产物为水蒸气。总体反应为水的标准生成反应，根据附录 C 表 C1，可以得到

$$\Delta H = \Delta H^{\circ}_{f,H_2O} = -241818\text{J/mol} \text{ 和 } \Delta G = \Delta G^{\circ}_{f,H_2O} = -228572\text{J/mol}$$

因此，氢/氧燃料电池的电功和电压分别为

$$W_e = -228572\text{J/mol} \text{ 和 } V = \frac{-\Delta G}{2F} = 1.184\text{V}$$

在一个可逆等温燃料电池中，使用空气代替纯氧气，可以得到

$$W_e = -226638\text{J/mol} \text{ 和 } V = 1.174\text{V}(\text{氢气/空气燃料电池})$$

在实践中，氢/氧燃料电池的工作电压为0.6～0.7V，这是因为它的内部不可逆性减少了电功的产生并提高了传递给外界的热量。

燃料电池效率很高，但是造价昂贵。小型燃料电池能够为电动小汽车供电。大型燃料电池能够为偏远位置提供电力，而不需要输电线。由于建造燃料电池的成本很高，在不久的将来可能还无法建设大型氢气发电厂。不过，燃料电池正被用于医院和郊野位置的应急电源。现在正在制造的便携式燃料电池可以提供较长时间的供电，用于笔记本电脑、手机与军事应用等场合[23,34]。

6.13.1 直接甲醇燃料电池

直接甲醇燃料电池是质子交换燃料电池的一个子类，它使用甲醇作为燃料。在大气压下，甲醇是有毒的可燃液体，温度范围为-97.0～64.7°C。该电池使用的甲醇是一种稀溶液（通常约为1M，即质量约占3%）。在阳极上，甲醇和水被吸附到一种催化剂上，该催化剂通常是由铂粒子和钌粒子构成，并失去质子直到形成二氧化碳。直接甲醇燃料电池使用甲醇溶液将反应物输送给电池，常用的工作温度范围为50～120°C。阳极消耗水，而阴极则产生水。质子（H^+）穿过质子交换膜被运输到阴极，在阴极处，质子与氧气发生反应生成水，该质子交换膜通常使用全氟磺酸（Nafion）制成。电子通过一个外部电路从阳极运输到阴极，为其所连接的装置提供电力。发生在阳极和阴极上的半反应以及电池的总体反应为

$$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^- (\text{阳极}) \tag{6.26}$$

$$3/2O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O(\text{阴极}) \tag{6.27}$$

$$CH_3OH + 3/2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + \text{电能}(\text{总体反应}) \tag{6.28}$$

这类燃料电池的废弃产物只有二氧化碳和水。目前，这两种半反应均可以使用铂作为催化剂。目前，这些电池的效率很低，因此它们的目标是专用于便携式应用，它们的能量和功率密度比效率更为重要。这些电池需要改善甲醇的损耗并管理阳极上产生的二氧化碳。

6.13.2 微生物燃料电池

一个微生物燃料电池将一个生物基底的可用化学能直接转换为电能。为了达到这个目的，使用细菌作为催化剂将各种各样的有机化合物转换成CO_2、水与能量。微生物依靠产生的能量来生长并维持它们的代谢。微生物燃料电池能够以电

能的形式收获这种微生物能量的一部分。一个微生物燃料电池包含一个阳极、一个阴极、一个质子交换膜和一个电路，如图 6.19 所示。细菌生活在阳极上，并将生物基底（比如葡萄糖、醋酸以及废水等）转化成 CO_2、质子和电子：

$$C_{12}H_{22}O_{11} + 13H_2O \rightarrow 12CO_2 + 48H^+ + 48e^- \tag{6.29}$$

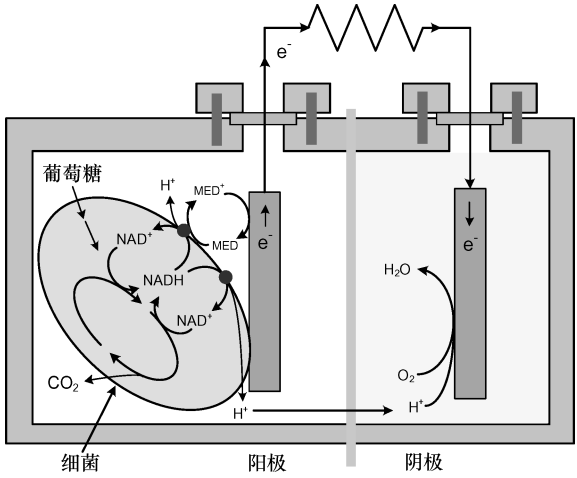


图 6.19　一个微生物燃料电池的通用结构图，其中，在阳极室中，细菌能够实现氧化转化，而在阴极室中，能够发生化学和微生物还原过程[30]

由于细菌具有将电子传输给不溶的电子接收体的能力，微生物燃料电池能够收集源自微生物代谢的电子。然后，电子通过一个电路流向阴极。阳极和阴极之间的电势差（V）与电子的流动（A）一起导致了电能的产生。质子穿过质子交换膜流向阴极。电子、氧气与质子在阴极结合，生成产物只有水。两个电极的势能不同（大约 0.5 V）。微生物燃料电池使用无机介质来利用电池的电子传递链与电子产生的通道。一些可能的介质包括自然红、亚甲基蓝或者劳氏紫。载满电子的介质离开电池，在沉积电子的电极之间来回移动。这个电极变为带负电的阳极。在释放电子之后，介质返回至它的原始氧化状态，准备重复该过程。因此，微生物的活动强烈地依赖于阳极的氧化还原电势[30]。

6.14　生物质与生物能源生产

生物质是来源于最近的生命物质的原料，包括植物、动物及其副产品。它是一种基于碳循环的可再生能源。一些种植用于生物燃料生产的农产品包括：玉米、大豆、柳枝、油菜、小麦、甜菜、棕榈油、芒草、高粱、木薯和麻疯树等[2]。可以使用工业、农业、林业和家庭的可生物降解的产出物来生产生物燃

料，例如：①厌氧消化来产生沼气；②气化来产生合成气（$H_2 + CO$）；③直接燃烧。这些材料能够在火力发电厂中直接燃烧，或者是转换成能在蒸汽发电机、燃气轮机或者内燃机发电机中燃烧的气体。生物质发电约占美国发电总量的1%。因此，生物质的使用也会像燃料那样带来废弃物管理的问题。

生物能是一种提取自生物资源的可再生能源，可以用于供热、发电或者车用燃料。来自植物原料的生物燃料是发展最快的可再生能源技术。在美国，玉米乙醇是目前用作汽油替代品或添加剂的最大的生物燃料来源。由于生物能的能量提取自生物质，生物质是一种燃料，而生物能则是包含于该燃料之中的能量[18]。

生物质能够被直接发酵来产生氢气、乙醇与高附加值化学品。特定的光合微生物在它们的代谢活动中，使用光能从水中产生氢气。光生物技术的前景非常广阔，不过，由于氧气也会与氢气一同产生，因此，该技术必须克服析氢酶系统的氧气灵敏度的限制。现在正在构建一个新系统，它使用代谢转换（去硫）来实现藻细胞在光合生长阶段与氢气生产阶段之间的循环。

在巴西，糖和乙醇的生产过程充分利用了甘蔗中储存的能量。目前，部分甘蔗渣被蔗糖厂用来燃烧，为提供蒸馏提高热量，并为机械运行提供电力。这使得乙醇生产厂能够积极地实现自给自足，甚至可以向公用事业销售多余的电力。据估计，根据所用技术的不同，甘蔗渣的发电潜力范围可达1000～9000MW。

6.14.1 生物乙醇生产

乙醇是一种从谷物中的糖类制成的透明、无色的酒精燃料，这些谷物包括玉米、高粱、大麦、甘蔗以及甜菜等。因此，乙醇是一种可再生能源燃料。现在最常见的乙醇生产过程是使用酵母来发酵糖（葡萄糖）和淀粉。甘蔗和甜菜也是常用的乙醇生产原料。发酵是一个自然微生物过程，其中，糖通过酵母（酿酒酵母：一种真菌）在24～36h被转换成乙醇和二氧化碳。酵母内发生的总体反应可以表示为

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2(CH_3CH_2OH) + 2CO_2 \quad (6.30)$$

糖→乙醇 + 二氧化碳气体

随后蒸馏该溶液，得到纯乙醇。对于每磅单糖来说，酵母能够产生大约1/2lb（0.15gal）的乙醇和一个当量的二氧化碳。玉米含有72%的淀粉，通过添加酶（葡糖糖化酶）可以将淀粉分解成单糖，因此它可以使用酵母来发酵。它的副产品包括高果糖玉米糖浆、食品添加剂（比如柠檬酸）、玉米油（食用油）以及牲畜饲料等。

使用先进的技术，通过使用酸或酶来生产能够被发酵的糖，因此，纤维素生物质（比如树木和草）也能被用作乙醇生产的原料。相对于传统的使用淀粉或糖发酵来生产乙醇的方法，纤维素乙醇的生产过程更为复杂。不过，这个过程能

够减少对“增加乙醇生产将会减少食物供应”的关注。种植纤维素生物质要比谷物需要更少的能源、化肥和水。纤维素生物质也可以种植在那些不适合粮食作物生长的土地上。许多草类能够多年实现一年两季生产，而不需要每年重新种植[14,35]。

6.14.2 生物柴油与绿色柴油生产

生物柴油生产涉及植物油或动物脂肪原料的酯交换反应，该反应使用短链脂肪族乙醇（通常是甲醇）作为催化剂。在有催化剂作用时，100lb 脂肪或油类（比如大豆油）与 10lb 短链乙醇发生反应，可以生产 10lb 甘油和 100lb 生物柴油。R′、R″和 R‴表示与自然产生的油类或脂肪（大多是）有关的脂肪酸链，它们通常是棕榈、硬脂、油酸和亚油酸。

$$\begin{array}{l}CH_2OCOR''' \\ CH_2OCOR'' \\ CH_2OCOR'\end{array} \quad +3ROH \xrightarrow{\text{催化}} \begin{array}{l}CH_2OH \\ CH_2OH \\ CH_2OH\end{array} \quad + \quad \begin{array}{l}R'''COOR \\ R''COOR \\ R'COOR\end{array} \qquad (6.31)$$

100lb 油或脂肪　10lb 酒精（3）　10lb 甘油　100lb 生物柴油（3）

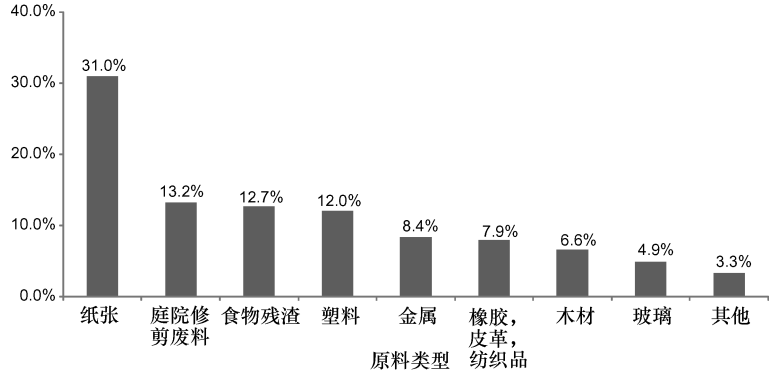
碱催化反应在低温和低压时发生，转换率高达 98%，同时副反应最小、反应时间最短。动物脂肪、植物脂肪和油类通常是由甘油三酸酯组成的，甘油三酸酯包含三种自由脂肪酸和甘油。应该从原料中去除水和其他非油材料。水会引起甘油三酸酯的水解，生成脂肪酸盐（肥皂）。完成该反应需要加入足量的乙醇，通常需要 6 份以上的乙醇对 1 份甘油三酸酯。采用滴定法来估算需要多少碱来完全中和所有的自由脂肪酸，从而确保实现完全酯交换反应。发生反应的温度约为 55°C（131°F）。反应时间从 1h 到 8h 不等。反应的产物不仅只包括生物柴油，而且还包括甘油、过量的乙醇与一些水。所有的这些副产品都必须被去除掉。通常通过蒸馏来去除残留的甲醇，并将其再循环至反应器[8]。

绿色柴油是通过与氢气发生催化反应去除氧气而产生的，该反应可以生成富含石蜡的产物、水和二氧化碳，所用的氢气来源于包含甘油三酸酯和脂肪酸的可再生能源原料[19]。甘油三酸酯和自由脂肪酸两者都含有较长的线性脂肪族碳氢化合物链，它们是部分不饱和的，而且它们的碳数目类似于石油柴油燃料分子的碳数目。因此，绿色柴油的热值与传统的柴油相同，而且完全适合与石油基柴油燃料的标准混合物相混合。生物柴油含有大约 11% 的氧，而石油基柴油与绿色柴油则不含氧。石化柴油大约含有 10ppm 的硫，生物柴油与绿色柴油的含硫量则低于 1 ppm。如果分别从大豆油或棕榈油中加工得到绿色柴油，当氢气产生于可再生能源资源时，整个生命周期的化石燃料消费的预期将会减少 84%～90%。富含饱和脂肪的原料（比如棕榈和羊脂油）比石蜡含量较高的原料（比如大豆油或菜籽油）需要更少的氢气[19]。绿色柴油的产量取决于原料类型和达到产品

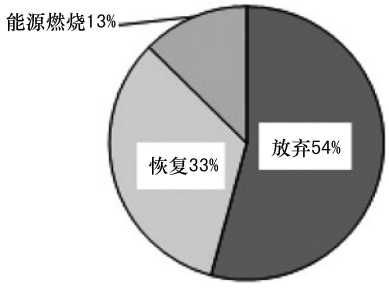
浊点标准所需要的加氢异构化水平。

6.14.3　来自生活垃圾的能源

在美国，垃圾（经常被称为城市固体废弃物）所产生的能源占总生物质能源消耗的 12% 左右。城市生活垃圾含有很多生物质（比如纸张、硬纸板、食物残渣、草屑、树叶、木材与皮革产品等），同时还含有其他的非生物质可燃性材料（主要是从石油制得的塑料与其他合成材料）（见图 6.20）。



a)



b)

图 6.20　a）城市生活垃圾的产生，b）城市生活垃圾的管理[13]

回收和堆肥项目可以减少生物质在被填埋或焚烧的城市生活垃圾中的份额。生活垃圾能够通过专门的垃圾能源转换工厂来焚烧，它产生热量生成蒸汽来为建筑供暖或者实现发电。这些工厂有助于减少需要垃圾填埋场填埋的生活垃圾量。也有一些生活垃圾焚烧炉只是简单地焚烧生活垃圾，而没有用来发电。

6.15　其他发电方式

还有其他规模有限的发电系统和过程也正在发展进化或者运行[29]，其中部

分发电方式如下：

- 电晶体发电（无运动部分）在便携式应用中备受关注。这个领域主要是被热电设施占据了主导地位，尽管热离子系统和热光伏系统也在发展。
- 压电装置用于通过机械应变发电，特别是在能量获取方面。
- β 辐射是另一种类型的电晶体发电机，它通过放射性衰变来发电。
- 基于流体的磁流体动力学发电已经作为从核反应堆中获得电能的一种方法在研究，也可以从更为传统的燃料燃烧系统中获得电能。
- 在河流和海洋中盐和淡水混合的地方，渗透发电最终会成为另一种可能的发电方式。
- 电磁能获取。
- 获取电路。
- 热电。
- 微电池。

6.16 平准化能源成本

平准化能源成本是指通过一个特定的来源生产电力实现收支平衡所必需的成本。它是一个计算使用不同来源的发电成本的经济评估工具。该成本包括初始投资、运行和维护、燃料成本与资本成本。它可以定义为一个单一的公式[12]：

$$\mathrm{LEC} = \frac{\sum_i^n \frac{I_i + M_i + F_i}{(1+r)^i}}{\sum_i^n \frac{E_i}{(1+r)^i}} \tag{6.32}$$

式中，LEC 为平均生命周期的平准化发电成本；I 为投资支出；M 为运行和维护支出；F 为燃料支出；E 为电力生产；r 为利率；n 为有效工作生命周期。

通常，平准化能源成本的计算要涵盖 20～40 年的生命周期，计算单位是每千瓦时的资金成本，例如美元/kWh 或美元/MWh。当比较替代系统的平准化能源成本时，通常只包括将发电资源接入传输系统的成本。表 6.2 列出了根据到 2016 年投入运营的发电厂的能量来源而估算的电力成本［美国能源部（DOE）2010 年 12 月 16 日的报告］。系统总平准化成本给出了每 MW h 的资金成本，该成本必须随着时间的推移来记账以支付总体成本。这些计算考虑了燃煤发电厂产生二氧化碳的水平，通过考虑每类发电厂的资本成本、燃料成本、运行和维护成本、财务成本以及假定利用率，平准化成本给出了在整个有效工作生命周期内建设和运行一个发电厂的总体成本现值。

表 6.2　到 2016 年投入运营的新一代资源发电厂的估算平准化成本

发电厂类型	容量因子（%）	美国平均平准化成本①（2009 年）/（美元/MW h）			
		资本成本	运行和维护	传输投资	平均总体成本
传统燃煤	85	65.3	28.1	1.2	94.8
先进燃煤	85	74.6	33.6	1.2	109.4
天然气混合加热循环	87	17.5	47.5	1.2	66.1
先进的混合加热循环	87	17.9	44.0	1.2	63.1
传统的燃气轮机	30	45.8	75.1	3.5	124.5
先进的燃气轮机	30	31.6	68.4	3.5	103.5
先进的核电	90	90.1	22.8	1.0	113.9
风	34	83.9	9.6	3.5	97.0
风-海上	34	209.3	28.1	5.9	243.2
太阳能光伏	25	194.6	12.1	4.0	210.7
太阳能热	18	259.4	46.6	5.8	311.8
地热	92	79.3	21.4	1.0	101.7
生物质	83	55.3	56.0	1.3	112.5
水电	52	74.5	10.1	1.9	86.4

① 这些成本以可并网装机容量的净交流电能来表示。

资料来源：能源信息管理（Energy Information Administration）[12]。

- 化石燃料发电厂的资本成本通常较低；风力发电机组、太阳能光伏与核的资本成本通常较高。垃圾能源转换、波浪能与潮汐能以及太阳能热电站的资本成本通常也较高。
- 核、煤与垃圾能源转换（灰处理、排放物清洁、蒸汽发生器运行）的运行和维护成本通常较高，而风力发电机组、太阳能光伏、可再生能源以及燃油和燃气设备的运行和维护成本通常较低。
- 化石燃料和生物质资源的燃料成本较高，而核与可再生能源的燃料成本很低。
- 热能的销售收入能够平衡运行成本，而且在热电联产的情况下降低了净成本（热电联产实现了供热和发电以及区域供热方案的联合运行）。
- 废弃物、废弃物处理和保险费的成本未包括在内。

为了评估电力生产的总体成本，成本被转换成使用资金时值的净现值。这些成本将整个有效工作生命周期使用的所有累计折现现金流量汇集在一起。表 6.2 为 2011 年年度能源展望中新一代资源的平准化成本[12]。

6.17　热力成本

热力成本需要考虑不可逆性，它会减少一个过程中的有效能。热经济学通过

使用火用成本理论将成本分配给与火用有关的变量，并且通过使用以下方法实现火用成本平衡：①成本会计方法和最优化方法，比如用于合理价格评估的火用成本理论；②在一组适当的财政、环境和技术限制之下，通过最小化总体成本实现最优化，以确定最优设计和工作条件。成本会计方法使用平均成本作为合理价格评估的基础，而最优化方法则使用边际成本以实现系统或者组件的产物的成本最小化。通过估算商品的资源价值，泛火用是考虑环境影响的一个更系统的方式。考虑一个分离过程的输出包含带有不同化学物质的各种热流，其条件明显不同于环境温度和浓度。为了达到零环境影响，这些热流必须被用于实现与外界环境的热平衡和化学平衡[9,20,26]。例 6.14 给出了发电成本的计算。

6.18 生态成本

生态成本分析可以实现不可再生自然资源消耗的最小化。对于完全理解生产过程的生态影响来说，确定从自然资源中提取原材料和化石燃料是不够的。能量的生产、转换与利用可能会导致环境问题，比如空气和水污染、对土地和河流使用的影响、由于对废热与全球气候变化管理不善而带来的热污染等。释放到环境当中的废弃产物的影响应该也被考虑进来。废弃产物可以对农业、植物、人类健康和工业活动产生危害。

6.18.1 生态规划

可持续发展的生态规划应该考虑环境中不可控制的火用废弃物排放。电力生产和传输可能会产生环境影响。化石燃料燃烧的排放物包括二氧化碳（CO_2）、一氧化碳（CO）、二氧化硫（SO_2）、氮氧化物（NO_x）、颗粒物以及汞等重金属。几乎所有的燃烧副产品都可能会对环境和人类健康产生负面影响[11,16,22]：

- CO_2 是一种温室气体和全球变暖的来源。燃烧化石燃料及其制品的发电厂和一些地热发电站的二氧化碳排放量约占美国二氧化碳排放总量的 40%。
- SO_2 会引起酸雨，它会对水中生活的植物和动物产生危害，而且它还会恶化或引起呼吸疾病和心脏疾病，特别是对于儿童和老人。可以使用湿式除尘器和干式除尘器来控制 SO_2 排放，它涉及在燃料中（煤）混入石灰，或者是向燃烧气体喷洒石灰溶液。流化床燃烧也可以用于 SO_2 的控制。
- NO_x 有助于地面臭氧的形成，它将会刺激并损害肺脏。控制 NO_x 排放可以使用几种不同的技术，比如在燃烧阶段使用低 NO_x 燃烧炉，或者在后燃烧阶段使用选择性催化转炉和非催化转炉。
- 颗粒物会导致城市和风景区出现雾霾现象，而且它与臭氧一起会引起哮喘和慢性支气管炎，特别是对儿童和老人。很小的或者“细颗粒物”也被认为会引

起肺气肿和肺癌。汞等重金属对人和动物的健康有害。使用一些装置来清洁发电厂排放的燃烧气体，可以控制颗粒物的排放，比如“袋式除尘器”使用的是大型过滤器，静电除尘器使用的是带电板，而湿式除尘器使用的则是一种液体溶液。

6.18.2 燃煤发电厂

燃煤发电厂需要满足限制其空气排放物数量的标准：

- 燃煤电厂可以使用硫含量低的煤，也可以对煤进行预加工处理，从而减少燃烧气体中不良化合物的种类和数量。
- 固体燃料燃烧产生的粗糙固体残渣称为灰。在锅炉底部收集最大的微粒，将其取出并用水扑灭。较小和较轻的颗粒物称为粉煤灰，采用空气排放控制装置进行收集，它通常与底灰混合。
- 电力传输和输电线使用输电塔将电力从发电厂输送给消费者。输电塔和输电线不仅会影响视觉景观，而且会妨碍靠近输电线的树木、本地植物种群和野生动物。地下输电线更为昂贵，可能会比架空线对景观的影响更大。

6.18.3 核电站

核电站不是温室气体排放或其他排放源，但是它们确实会产生两种放射性废弃物[3]：

- 低放射性废弃物——这包括已经被放射性物质污染的物品，比如服装、抹布、拖把、过滤器、反应器水处理残留物以及设备和工具等。低放射性废弃物被储存在核电站中，直到废弃物中的放射性衰变至允许作为普通垃圾来处理的水平，或者是被送到低放射性废弃物处置点。
- 乏（使用过的）核燃料——乏燃料组件具有很强的放射性，必须从一开始就储存于专门设计的类似于大型游泳池的燃料池当中（用水来冷却燃料，并将水作为一种辐射屏蔽），或者是储存于专门设计的干储存容器之中。现在，越来越多的反应堆运营商将它们的旧的乏燃料储存于干储存设施中，这些设施使用专用的室外混凝土容器或钢制容器，并采用空气冷却。

习 题

6.1 在一个蒸汽发电厂中，蒸汽进入汽轮机时为200psia和600°F，流出时为5psia和200°F。蒸汽通过直径为2.5in的管道进入汽轮机，速度为11ft/s，通过直径为9in的管道排除。请估算该汽轮机产生的功率。

6.2 一个汽轮机在绝热和稳态条件下运行。蒸汽进入汽轮机时为600°C和1100kPa。蒸汽流量为3kg/s。入口管道直径为10cm。在汽轮机中膨胀之后，蒸汽通过一个直径为25cm的

管道流出。流出的蒸汽为300°C和110kPa。请估算该汽轮机产生的功。

6.3 一个汽轮机在绝热和稳态条件下运行。蒸汽进入汽轮机时为550°C和1500kPa。蒸汽流速为4kg/s。入口管道直径为12cm。在汽轮机中膨胀之后，蒸汽通过一个直径为28cm的管道流出。流出的蒸汽为饱和蒸汽，压强为110kPa（在102.3°C）。请估算该汽轮机产生的功。

6.4 一个汽轮机在绝热和稳态条件下运行。蒸汽进入汽轮机时为600°C和4000kPa。蒸汽流量为10kg/s。入口管道直径为10cm。在汽轮机中膨胀之后，蒸汽通过一个直径为30cm的管道流出。流出的蒸汽为150kPa和120°C。请估算该汽轮机产生的功。

6.5 一个汽轮机在绝热和稳态条件下运行。蒸汽进入汽轮机时为600°C和8000kPa。蒸汽流量为15kg/s。入口管道直径为9cm。在汽轮机中膨胀之后，蒸汽通过一个直径为35cm的管道流出。流出的蒸汽为饱和蒸汽，压强为100kPa（99.63°C）。请估算该汽轮机产生的功。

6.6 一个过热蒸汽的状态为4100kPa和300°C，在蒸汽轮机中一个绝热膨胀，流出时为15kPa，蒸汽干度为$x=0.87$。入口处的蒸汽流速为50m/s，出口处为160m/s。入口处的海拔为10m，出口处的海拔为6m。请估算1kg/s的蒸汽流量所产生的功率。

6.7 使用汽轮机作为一个小型发电机的能量来源。汽轮机在绝热和稳态条件下运行。蒸汽进入汽轮机时为600°C和1100kPa。蒸汽流量为3kg/s。流出的蒸汽为300°C和110kPa。请估算该汽轮机产生的功。

6.8 蒸汽的状态为8000kPa和400°C，在汽轮机中膨胀。在出口处蒸汽为20kPa，干度为0.9。如果蒸汽流量为11.5kg/s，请估算其功率输出。

6.9 蒸汽的状态为8400kPa和400°C，在汽轮机中膨胀。在出口处蒸汽为15kPa，干度为0.92。如果蒸汽流量为11.5kg/s，请估算其功率输出。

6.10 蒸汽在汽轮机中膨胀。进入汽轮机的蒸汽为9000kPa和450°C，流出时为10kPa，干度为0.95。如果汽轮机产生的功率为6.5MW，请估算蒸汽流量。

6.11 热废气对一个锅炉加热，用来产生状态为100psia和400°F的过热蒸汽。同时，排出的废气被从2500°F冷却到350°F。进入锅炉的饱和液态水（流1）为14.7psia，流量为200lb/h。过热蒸汽（流2）在一个汽轮机中使用，而且释放时为饱和蒸汽（流3），压强为14.7psia。请确定所需的热废气摩尔流量及其产生的最大功。假设外界为70°F，烟气的热容量为$C_p=7.606+0.0006077T$，其中的T单位为°R，C_p的单位为Btu/（lb mol °R）。

6.12 蒸汽在汽轮机中膨胀。进入汽轮机的蒸汽为1000psia和800°F，出口时为饱和蒸汽，压强为5psia。汽轮机产生的功率为5MW。如果蒸汽流量为20lb/s，请估算来自汽轮机的热损失。

6.13 使用汽轮机作为一个小型发电机的能量来源。汽轮机在绝热和稳态条件下运行。蒸汽进入汽轮机时为550°C和1500kPa。蒸汽流量为4kg/s。流出的蒸汽为饱和蒸汽，压强为110kPa（在102.3°C）。请估算该汽轮机产生的功。

6.14 使用汽轮机作为一个小型发电机的能量来源。汽轮机在绝热和稳态条件下运行。蒸汽进入汽轮机时为600°C和4000kPa。蒸汽流量为10kg/s。流出的蒸汽为150kPa和120°C。请估算该汽轮机产生的功。

6.15 使用汽轮机作为一个小型发电机的能量来源。汽轮机在绝热和稳态条件下运行。蒸汽进入汽轮机时为600°C和8000kPa。蒸汽流量为15kg/s。流出的蒸汽为饱和蒸汽，压强为100kPa（99.63°C）。请估算该汽轮机产生的功。

6.16 在一个连续运行中，8200kPa和823.15K（状态1）的蒸汽被膨胀至30kPa。请确定其通过一个汽轮机等温膨胀的最终温度（状态2）、每kg蒸汽产生的熵与产生的功。

6.17 蒸汽进入一个绝热汽轮机时为5000kPa和450°C，作为饱和蒸汽流出时为140kPa。如果该过程可逆，而且动能和势能的变化可以忽略不计，请确定流过汽轮机的每kg蒸汽的输出功。

6.18 在一个连续运行中，8200kPa和823.15K（状态1）的蒸汽被膨胀至30kPa。请确定其通过一个汽轮机绝热膨胀的最终温度（状态2）、每kg蒸汽产生的熵与产生的功。

6.19 一个稳态流绝热汽轮机流入的蒸汽为650K和8200kPa，排出时为373.15K和101.32kPa。如果蒸汽流量为12kg/s，外界环境为298.15K，请确定①最大功；②功的损失。

6.20 蒸汽流入汽轮机时为6MPa和400°C，排出的饱和蒸汽为360.15K，同时产生480kJ/kg的轴功。温度为外界为300K。请确定其可能的最大功率（单位为：kW）。

6.21 在一个稳流过程中，卡诺循环使用水作为工作流体。热量传递源为400°C，而且水从饱和液体转化为饱和蒸汽。饱和蒸汽在汽轮机中膨胀。在10kPa与一个冷凝器中在10kPa时的热传递率为1150kJ/kg。请估算工作流体流量为10kg/s时，该循环的净输出功率。

6.22 在一个稳流过程中，卡诺循环使用水作为工作流体。热量传递源为400°C，而且水从饱和液体转化为饱和蒸汽。饱和蒸汽在汽轮机中膨胀至30kPa，冷凝器中在30kPa时的热传递率为1150kJ/kg。请估算工作流体流量为14.5kg/s时，该循环的净输出功率。

6.23 一个蒸汽发电厂使用的蒸汽为8200kPa和823.15K。汽轮机排放的蒸汽为30kPa。汽轮机与泵处于可逆和绝热运行状态。请确定在锅炉中产生的每kg蒸汽所做的功。

6.24 一个蒸汽发电厂运行的简单理想朗肯循环如下。流入汽轮机的蒸汽为698.15K和4400kPa，而排放的蒸汽则为15kPa。蒸汽的质量流量为12.0kg/s。请确定其净输出功。

6.25 一个蒸汽发电厂中使用一个再热朗肯循环。进入高压汽轮机的蒸汽为9000kPa和823.15K，流出时为4350kPa。蒸汽在等压条件下被再加热至823.15K。蒸汽进入低压汽轮机时为4350kPa和823.15K。低压汽轮机排放的蒸汽为10kPa。蒸汽流量为24.6kg/s。请确定其净输出功率。

6.26 一个蒸汽发电厂中使用一个再热朗肯循环。进入高压汽轮机的蒸汽为10000kPa和823.15K，流出时为4350kPa。蒸汽在等压条件下被再加热至823.15K。蒸汽进入低压汽轮机时为4350kPa和823.15K。低压汽轮机排放的蒸汽为15kPa。蒸汽流量为38.2kg/s。请确定其净输出功率。

6.27 在一个蒸汽发电厂中使用的简单理想再热朗肯循环如下。进入汽轮机的蒸汽为9200kPa和823.15K，流出时为4350kPa和698.15K。蒸汽在等压条件下被再加热至823.15K。低压汽轮机排放的蒸汽为15kPa。汽轮机的净输出功率为75MW。请确定该蒸汽的质量流量。

6.28 一个蒸汽发电厂使用一个实际回热朗肯循环。进入高压汽轮机的蒸汽为11000kPa和773.15K，冷凝器的工作条件为10kPa。从汽轮机中提取的蒸汽为475kPa，用于为一个开式加热器中的水加热。水在通过热水器之后成为饱和液体。蒸汽流量为65kg/s。请确定其输出功。

6.29 一个蒸汽发电厂使用一个实际回热朗肯循环。进入高压汽轮机的蒸汽为10000kPa和773.15K，冷凝器的工作条件为30kPa。从汽轮机中提取的蒸汽为475kPa，用于为一个开式加热器中的水加热。水在通过热水器之后成为饱和液体。蒸汽流量为45.6kg/s。请确定其输出功。

6.30 一个蒸汽发电厂使用一个理想回热朗肯循环。进入高压汽轮机的蒸汽为8400kPa和773.15K，冷凝器的工作条件为10kPa。从汽轮机中提取的蒸汽为400kPa，用于为一个开式加热器的给水加热。水在通过给水加热器之后成为饱和液体。请确定该循环的净输出功率。

6.31 一个蒸汽发电厂使用一个实际再热回热朗肯循环。进入高压汽轮机的蒸汽为11000kPa和773.15K，冷凝器的工作条件为10kPa。从汽轮机中提取的蒸汽为2000，用于为一个开式加热器中的水加热。提取的蒸汽为475kPa，用于过程热。水在通过热水器之后成为饱和液体。请确定该蒸汽的流量为66.0kg/s时的输出功。

6.32 一个蒸汽发电厂使用理想再热回热朗肯循环。进入高压汽轮机的蒸汽为9400kPa和773.15K，流出时为850kPa。冷凝器的运行条件为15kPa。从汽轮机中提取的那部分蒸汽为850kPa，用于为一个开式加热器中的水加热，在该加热器中，蒸汽和来自冷凝器的液态水混合，并进行直接接触热传递。其余的蒸汽被再加热至723.15K，并在低压汽轮机级中膨胀至冷凝器的压强。水在通过热水器之后成为饱和液体，压强等于加热器的压强。蒸汽流量为20kg/s。请确定它所产生的功率。

6.33 一个蒸汽发电厂使用一个实际再热回热朗肯循环。进入高压汽轮机的蒸汽为10800kPa和773.15K，冷凝器的工作条件为15kPa。从汽轮机中提取的蒸汽为2000kPa，用于为一个开式加热器中的水加热。提取的蒸汽为475kPa，用于过程热。水在离开热水器之后为饱和液体。蒸汽流量为30.8kg/s。请确定它所产生的功率。

6.34 一个蒸汽发电厂使用地热能源。可用的地热源为220°C和2320kPa，流量为180kg/s。热水通过一个阀门和一个闪蒸罐。蒸汽从闪蒸罐进入汽轮机为550kPa和428.62K。汽轮机排出蒸汽的干度为$x_4=0.95$。冷凝器的运行条件为40kPa。水在通过冷凝器之后成为饱和液体。请确定其净输出功。

6.35 一个蒸汽发电厂使用地热能源。可用的地热源为220°C和2320kPa，流量为50kg/s。热水通过一个阀门和一个闪蒸罐。蒸汽从闪蒸罐进入汽轮机为550kPa和428.62K。汽轮机排出蒸汽的干度为$x_4=0.90$。冷凝器的运行条件为15kPa。水在通过冷凝器之后成为饱和液体。请确定其净输出功。

6.36 一个热电厂使用的蒸汽为5500kPa和748.15K，用于发电和过程热。所需的过程热量为10000kW。从汽轮机中提取出锅炉中产生的蒸汽的20%用于热电联产，提取时为475kPa。提取的蒸汽被冷凝，并与冷凝器的输出水相混合。剩余的蒸汽从5500kPa膨胀至冷凝器工况。冷凝器的工作条件为10kPa。请确定网络输出。

6.37 一个热电厂使用的蒸汽为8400kPa和773.15K（见图6.14）。从汽轮机中提取1/4的蒸汽用于热电联产，提取时为600kPa。在使用该蒸汽对过程进行加热之后，提取的蒸汽被冷凝，并与冷凝器的输出水相混合。其余的蒸汽从600kPa膨胀至冷凝器压强10kPa。在锅炉中产生的蒸汽流量为60kg/s。请确定其输出功。

6.38 一个热电厂使用的蒸汽为900psia和1000°F，用于发电和过程热。来自锅炉的蒸汽流量为40lb/s。该过程所需的蒸汽为70psia，流速为5.5lb/s，由汽轮机中的膨胀蒸汽来提供。

提取的蒸汽被冷凝，并与冷凝器的输出水相混合。剩余的蒸汽从70psia膨胀至冷凝器压强3.2psia。请确定其输出功。

6.39 1kmole的空气初始状态为1atm，-13°C，它所完成的串联功率循环包括三个本质可逆过程。步骤1-2：绝热压缩到5atm。步骤2-3：在等温条件下膨胀到1atm。步骤3-1：等压压缩。请确定其净输出功。

6.40 一个蒸汽发电厂输出为62MW。它使用的蒸汽流（蒸汽流1）为8200kPa和550°C。排出的蒸汽流（蒸汽流2）为饱和状态，压强为15kPa。如果汽轮机内为绝热膨胀，而外界环境为298.15K，请确定该蒸汽的流量。

6.41 一个蒸汽发电厂输出为55MW。它使用的蒸汽流（蒸汽流1）为8400kPa和500°C。排出的蒸汽流（蒸汽流2）为饱和状态，压强为30kPa。如果汽轮机内为绝热膨胀，而外界环境为298.15K，请确定该蒸汽的流量。

6.42 在一个水电站中，水轮机的工作水头为33m。入口管道和出口管道的直径为1.70m。如果出口水流速度为4.6m/s，请估算该水轮机产生的功率。

6.43 在一个水电站中，水轮机的工作水头为46m。入口管道和出口管道的直径为1.80m。如果水的出口速度为5.5m/s，请估算该水轮机产生的功率。

6.44 假设一个水电站蓄水库的储能容量为1.5×10^{6}kWh。这些能量被储存于地平面以上40m的高度处。请估算被泵回蓄水库的最小水量。

6.45 假设一个水电站蓄水库的储能容量为2.0×10^{6}kWh。这些能量被储存于地平面以上460m的高度处。请估算被泵回蓄水库的最小水量。

6.46 一个风电厂为社区提供的发电量为2MW。每个风力机的叶片直径为10m。风力机所在位置的平均风速为11m/s，平均温度为20°C。请估算需安装风力机的最低数量。

6.47 一个风电厂为社区提供的发电量为3MW。每个风力机的叶片直径为11m。风力机所在位置的平均风速为14m/s，平均温度为20°C。请估算需安装风力机的最低数量。

6.48 一个风电厂为社区提供的发电量为4.2MW。每个风力机的叶片直径为10m。风力机所在位置的平均风速为15m/s，平均温度为20°C。请估算需安装风力机的最低数量。

参考文献

1. Archer CL, Jacobson MZ (2007) Supplying base load power and reducing transmission requirements by interconnecting wind farms. J Appl Meteorol Climatol 46:1701–1717
2. Bassam NE (2010) Handbook of bioenergy crops: a complete reference to species, development and applications. Earthscan, London
3. Bodansky D (2004) Nuclear energy: principles, practices, and prospects. Springer, Oxford
4. Breeze P (2005) Power generation technologies. Newnes, Oxford
5. Bradford T (2006) Solar revolution: the economic transformation of the global energy industry. MIT Press, Cambridge
6. Çengel YA, Boles MA (2002) Thermodynamics. An engineering approach, 4th edn. McGraw Hill, New York
7. Çengel YA, Turner RH (2001) Fundamentals of thermal-fluid sciences. McGraw-Hill, New York
8. Chongkhong S, Tongurai C, Chetpattananondh P, Bunyakan C (2007) Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. Biomass Bioenergy 31:563–568
9. Demirel Y (2007) Nonequilibrium thermodynamics transport and rate processes in physical, chemical and biological systems. Elsevier, Amsterdam

10. DiPippo R (2008) Geothermal powerpower plants. Principles, applications, case studies and environmental impact, 2nd edn. Elsevier, Oxford
11. EEA (2008) Air pollution from electricity-generating large combustion plants, Copenhagen. http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2008_4/at_download/file Accessed April 2011
12. EIA (2011) Levelized cost of new generation resources in the annual energy outlook 2011. Report of the U.S. energy information administration of the U.S. Department of Energy
13. EPA (2009) Unites States environmental protection agency in http://www.epa.gov/waste/. Accessed April 2011
14. Erbaum JB (2009) Bioethanol: production, benefits and economics. Nova, New York
15. Forsund FR (2010) Hydropower economics. Springer, Berlin
16. Grahame T, Schlesinger R (2007) Health effects of airborne particulate matter: do we know enough to consider regulating specific particle types or sources? Inhalation Toxicol 19:457–481
17. Hargreaves CM (1991) The philips stirling engine. Elsevier, Amsterdam
18. Harwood S, Demain AL, Wall JD (eds) (2008) Bioenergy. ASM Press, Washington
19. Kalnes T, Marker T, Shonnard DR (2007) Green diesel: a second generation biofuel. Int J Chem Reactor Eng 5:1–9
20. Kanoglu M, Dincer I, Rosen MA (2007) Understanding energy and exergy efficiencies for improved energy management in power plants. Energy Policy 35:3967–3978
21. Kehlhofer R, Rukes B, Hannemann F, Stirnimann F (2009) Combined-cycle gas & steam turbine power plants, 3rd edn. PenWell, Tulsa
22. Kutscher CF (2007) (ed) Tackling climate change in the U.S. potential carbon emissions reductions from energy efficiency and renewable energy by 2030, American Solar Energy Society, ASES
23. Larminie J, Dicks A (2003) Fuel cell systems explained, 2nd edn. Wiley, New York
24. Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL (2010) Wind energy explained: theory, design application, 2nd edn. Wiley, New York
25. Mills D (2004) Advances in solar thermal electricity technology. Sol Energy 76:19–31
26. Moran MJ, Shapiro HN (2000) Fundamentals of engineering thermodynamics, 4th edn. Wiley, New York
27. Nag PK (2002) Power plant engineering. McGraw-Hill, New York
28. Organ J (2007) The air engine: stirling cycle power for a sustainable future. Woodhead, Cambridge
29. Priya S, Inman DJ (eds) (2009) Energy harvesting technologies. Springer, New York
30. Rabaey K, Verstraete W (2005) Microbial fuel cells : novel biotechnology for energy generation. Trends Biotech 23:291–298
31. Smil V (2003) Energy at the crossroads: global perspectives and uncertainties. MIT Press, Cambridge
32. Smith JM, Van Ness HC, Abbott MM (2005) Introduction to chemical engineering thermodynamics, 7th edn. McGraw Hill, New York
33. Schobert HH (2002) Energy and society. Taylor & Francis, New York
34. Vielstich W et al. (eds) (2009) Handbook of fuel cells: advances in electrocatalysis, materials, diagnostics and durability, vol 6. Wiley, New York
35. Wyman CE (1996) Handbook on bioethanol: production and utilization. Taylor & Francis, Washington

第 7 章　能 量 转 换

7.1　能量转换简介

在大多数过程中，能量不断地从一种形式转换成另一种形式，这称为能量转换。具体例子包括生命系统通过光合作用利用水和二氧化碳合成食物，将太阳能转换为化学能。瀑布的机械能也可以被转换成发电机的电磁能。内燃机将汽油中潜在的化学能转换成热能，随后又被转化成动能以驱动车辆。太阳能电池将太阳能辐射转换成电能，该电能可以用于为灯泡或计算机供电。进入一个转换装置或一个过程的能量被转换为其他形式的能量，从而维持前后的能量相等。这就意味着，在一个系统的所有形式的能量转换中，能量是守恒的。

由于在汽油和糖中的高度结构化的化学键最为集中，因此它们的能量是最实用的。其他所有形式的能量都可以完全转换成热能，但是无法将热能转换成其他形式的能量。由于摩擦、热损失与其他因素的低效率，能量转换的热效率通常远远低于 100%。例如，在一个蒸汽发电厂中，只有 35%～40% 的热能可以被转换成电力，而一个典型的汽油汽车发动机的效率则是 25% 左右。对于每种能量转换来说，一部分能量通常会以低可用性和发散的热能形式损失掉，如图 7.1 所示。例如，一个灯泡大约只有 10% 的电能转换光，其余的能量被转换成难以用于做功的热能。这表明，能量转换的效率是有极限的。只有一部分能量可以转换为有用功，而剩余部分的能量必须被传递给温度较低的储热器[2,4,5,13]。

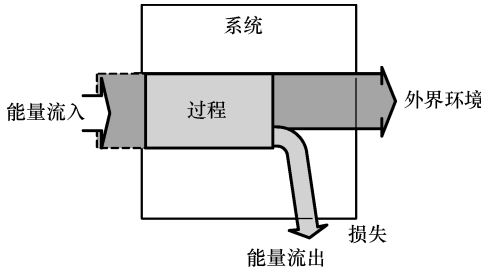


图 7.1　在一个过程中的能量使用和转换的示意图。以新形式输出的能量总是低于输入能量。输入的总能量会以其他形式各种“恢复”，因此能量是守恒的

有多种不同的过程与装置可以将能量从一种形式转换成另一种形式。表 7.1 为这些过程与装置的短名单。当电流在一个电路中流动时，它能够传递能量来做

功。这些装置能将电能转换为许多有用的形式，比如热（电加热器）、光（灯泡）、运动（电动机）、声音（扬声器）与信息技术处理装置（计算机）等。电能是一种最有用的能量输出形式，它能够通过各种机械与（或）化学装置来产生。将其他形式的能量直接转换成电能有七种基本方法[5,31]：

表 7.1 将能量从一种形式转换成另一种形式的部分过程与装置

过程与装置	能量输入	有用能输出
蒸汽机	热能	机械能
光合作用	太阳能	化学能
水电站大坝	重力势能	电能
风力机	机械能	电能
发电机	机械能	电能
柴油或汽油发动机	化学能	机械能
电动机	电能	机械能
燃料电池	化学能	电能
电池	化学能	电能
电灯泡	电能	热能和光能
电阻加热器	电能	热能
海洋温差能	热能	电能
生物发光	化学能	光能
神经脉冲	化学能	电能
肌肉活动	化学能	机械能
地热发电站	热能	电能
波浪能	机械能	电能
摩擦	动能	热能
热电	热能	电能
压电	应变	电能

注：Granet 和 Bluestein[13]，Chih[4]。

- 静电产生于电荷的物理分离和传输。电子被机械地分离开和传输以提高它们的电势能，正电荷与负电荷的不平衡导致了静电的产生。例如，雷电是静态放电的一个自然的例子。管道中的低传导率流体也能够产生静电。
- 电磁感应是利用各种发电机（electricalgenerator、dynamo 或者 alternator）将动能转换为电力。几乎所有的商业发电都是使用电磁感应来实现的，它利用机械能来推动发电机旋转。开发机械能有许多不同的方法，具体包括热机、水电、风能与潮汐能等。
- 电化学直接将化学能转换为电能，比如在普通电池、燃料电池或者神经脉冲当中。
- 光电效应为将光能转换为电能，比如在太阳能电池当中。

- 热电效应直接将温差转换为电能，比如在热电偶、热电堆与热离子转换器当中。
- 压电效应是从电性质各向异性的分子或晶体的机械应变中获得的电能。
- 核变换是带电粒子的产生和加速过程。通过 β 衰变直接将核能转换为电能，只有小规模应用。

7.2　系列能量转换

在一种有用的形式能量变为可用之前，要在各种过程中发生一系列的能量转换。例如，当使用计算机时，就会涉及下列能量转换过程：

- 当煤燃烧时，煤中储存的化学能以热能的形式释放出来。
- 热能用于产生蒸汽，汽轮机再将该蒸汽转换成机械能。
- 发电机将机械能转换成电能，电能通过输电线传输到人们的家中。
- 计算机通过家中的电源插座接收电能。

在一个传统的内燃机中，涉及下列能量变换：

- 在燃烧之后，燃料中的潜能被转换为膨胀气体的动能。
- 膨胀气体的动能被转换为活塞运动，并因此推动旋转曲柄轴运动。
- 旋转的曲柄轴运动被传递给变速器总成，驱动一辆小汽车的轮子。

7.3　燃料的化学能转换成热能

燃料的化学能在燃烧或氧化反应期间被转换成热能。燃烧反应是放热反应并释放热量。对燃烧反应来说，燃烧热与反应热相同，这已在 4.3.4 节中讨论。例如，丙烷（C_3H_8）的标准燃烧热可以通过使用表 C1 中列出的生成标准热来估算。

1mol 丙烷的燃烧反应为

$$C_3H_8(g) + 5O_2(g) \rightarrow 3CO_2(g) + 4H_2O(g) + \text{热量} \tag{7.1}$$

当产物和反应物均处于标准状态时（理想气体状态为 1bar 和 25°C），标准反应热可以表示为

$$\Delta H_r^\circ = \sum_i v_i \Delta H_{fi}^\circ = v_{CO_2}\Delta H_{fCO_2}^\circ + v_{H_2O}\Delta H_{fH_2O}^\circ + v_{C_3H_8}\Delta H_{fC_3H_8}^\circ \tag{7.2}$$

式中，v_i 为物质 i 的化学计量系数，对于一个产物来说，该系数为正，而对一个反应物来说，该系数为负，例如，对于上述反应，有 $v_{CO_2}=3$、$v_{H_2O}=4$ 和 $v_{C_3H_8}=-1$。

7.3.1　燃料的热值

一种燃料的热值为其燃烧期间释放的热量[35]。它通过每单位物质（通常是

质量）的单位能量来测量，比如：kJ/kg、Btu/m^3 或者 kcal/kg。燃料的热值表示为高热值（HHV）、低热值（LHV）或总热值（GHV）。HHV 是通过将所有的燃烧产物换算回到最初的预燃温度，特别是将产生的所有水蒸气冷凝来确定。一种含有碳和氢的燃料的燃烧过程可以近似表示为

$$[C+H](燃料)+[O_2+N_2]空气 \rightarrow CO_2+H_2O(液体)+N_2+热量(HHV) \tag{7.3}$$

$$[C+H](燃料)+[O_2+N_2]空气 \rightarrow CO_2+H_2O(气体)+N_2+热量(LHV) \tag{7.4}$$

式中，C = 碳；H = 氢；O = 氧；N = 氮。

总热值需要考虑用于蒸发在燃料燃烧反应期间生成的以及在燃烧之前已经含有的水分的那些热量。此值对木材或煤等燃料来说特别重要，因为它们在燃烧之前含有部分水分。2.4 节也讨论了热值的相关内容。表 2.7、表 2.8 和表 2.9 列出了一些常见燃料的高热值、低热值与能量密度。

低热值（或净卡值）是通过从高热值中减去水蒸气的汽化热来确定的。高热值与低热值之间的关系通常为

$$LHV = HHV - (\Delta H_{vap})(n_{H_2O.\,out}/n_{fuel,in})(MW_{H_2O,out}/MW_{fuel,in})$$

或

$$LHV = HHV - (\Delta H_{vap})(m_{H_2O,out}/m_{fuel,in}) \tag{7.5}$$

式中，ΔH_{vap}为水的汽化热（单位为：kJ/kg 或 Btu/lb）；$n_{H_2O,out}$为水蒸发的摩尔数；$n_{fuel,in}$为燃料燃烧的摩尔数；MW_{H_2O}为水的分子量；MW_{fuel}为燃料的分子量。

例 7.1 给出了根据高热值估算低热值的例子，而例 7.2 则是根据标准燃烧热来估算热值。

例 7.1　根据高热值估算低热值

在室温（70°F）时测得的天然气高热值为 23875 Btu/lb。将这种高热值转换成低热值。水的汽化热为 $\Delta H_{vap}=1055$Btu/lb（70°F）。

解：

假设天然气可以表示为甲烷 CH_4。

甲烷燃烧：$CH_4+3/2O_2 \rightarrow CO_2+2H_2O$

高热值：HHV（甲烷）= 23875 Btu/lb

从表 A1 中可得

$$MW_{H_2O}=(H_2)+1/2(O_2)=2+16=18\text{lb/lb mol}$$

$$MW_{CH_4}=(C)+4(H)=12+4=16\text{lb/lb mol}$$

$$n_{CH_4}=1\text{lb mol},n_{H_2O}=2\text{lb mol},n_{H_2O}/n_{CH_4}=2/1$$

汽化热：$\Delta H_{vap}=1055$Btu/lb（70°F）

低热值：$LHV = HHV - (\Delta H_{vap})(n_{H_2O,out}/n_{fuel,in})(MW_{H_2O;out}/MW_{fuel,in})$［式 7.5)］

$LHV = 23875\ Btu/lb - (1055\ Btu/lb)(2/1)(18/16) = 21500\ Btu/lb$

例 7.2　根据标准燃烧热来估算热值

1mol 丙烷的燃烧反应为

$$C_3H_8(g) + 5O_2(g) \rightarrow 3CO_2(g) + 4H_2O(g)$$

估算 1kg 丙烷在室温下的高热值和低热值。

假设汽化热为 $\Delta H_{vap} = 2442kJ/kg$（25°C）

解：

当产物和反应物均处于标准状态（理想气体状态为 1bar 和 25°C）时，标准反应热可以表示为

$$\Delta H_r^o = \sum_i v_i \Delta H_{fi}^o = v_{CO_2}\Delta H_{fCO_2}^o + v_{H_2O}\Delta H_{fH_2O}^o + v_{C_3H_8}\Delta H_{fC_3H_8}^o$$

化学计量系数：$v_{CO_2} = 3$，$v_{H_2O} = 4$，$v_{C_3H_8} = -1$。

使用来自表 C1 的标准生成热，1mol 丙烷（C_3H_8）的燃烧热可以估算为

$$\Delta H_{r298}^o = 3(-393.51)kJ/g\ mol + 4(-241.818)kJ/g\ mol - (-104.7)kJ/g\ mol$$
$$= -2043.1kJ/g\ mol$$

其中，氧气的标准反应热为零，因为它的分子是在环境中自然存在的。

丙烷的分子量：$MW = 44g/g\ mol = 0.044kg/mol$（见表 A1）。

因为水的产物为汽态，1kg 丙烷燃烧之后所释放的热量为低热值：

$$\Delta H_{r298}^o = LHV = (2043.1kJ/g\ mol)(g\ mol/0.044\ kg) = 46430kJ/kg$$

高热值：

$$MW_{H_2O} = (H_2) + 1/2(O_2) = 2 + 16 = 18kg/k\ mol$$
$$MW_{C_3H_8} = 3(C) + 8(H) = 36 + 8 = 44kg/k\ mol$$
$$n_{C_3H_8} = 1g\ mol\ 和\ n_{H_2O} = 4g\ mol$$
$$\Delta H_{vap} = 2442kJ/kg(25°C)$$

在重新整理式（7.5）之后，高热值变为

$$HHV = LHV + (\Delta H_{vap})(n_{H_2O,out}/n_{C_3H_8,in})(MW_{H_2O,out}/MW_{C_3H_8,in})$$
$$HHV = 46430kJ/kg + (2442kJ/kg)(4/1)(18/44) = 50426kJ/kg$$

7.4　能量转换的热效率

热效率是热能可以被转换成另一种有用形式的一种度量。对于一个能量转换装置（比如一个锅炉或燃烧炉），热效率 η_{th} 为有用能与进入转换的能量

之比：

$$\eta_{\text{th}} = \frac{q_{\text{useful}}}{q_{\text{in}}} \tag{7.6}$$

没有能量转换装置的效率是100%的。每天使用的大多数转换装置和过程，比如灯泡和蒸汽发电的效率都很低。例如，大多数白炽灯泡的效率只有5%～10%，因为大部分电能以热量的形式损失到外界环境之中了。电阻加热器的热效率接近于100%。当对加热设施进行比较时，比如对高效的电阻加热器和效率为80%的天然气燃烧炉进行比较，需要采用经济分析以确定最佳成本效益方案[10,23,33,36]。

热效率通常涉及燃料总化学能与以动能的形式提取自燃料的有用能的比较。热值的定义被用作输入能量对效率值的影响，该效率值通过输出能量除以燃料释放的输入能量来确定。

如果使用液态流动水在一个锅炉中产生饱和蒸汽，水获得的热量可以被表示为提高的显热加上汽化潜热的总和：

$$\dot{q} = \dot{m}(C_{\text{p,av}}\Delta T + \Delta H_{\text{vap}}) \tag{7.7}$$

式中，$\dot{q}$为获得的热量；$\dot{m}$为质量流量；$C_{\text{p,av}}$为比热容；ΔT为锅炉入口和出口之间的水温差；ΔH_{vap}为汽化热。

汽化过程需要热量，而冷凝过程则释放热量，具体如下：

$$H_2O(\text{液体}) + \Delta H_{\text{vap}} \rightarrow H_2O(\text{蒸汽}) \quad \text{汽化} \tag{7.8}$$

$$H_2O(\text{蒸汽}) \rightarrow H_2O(\text{液体}) + \Delta H_{\text{cond}} \quad \text{冷凝} \tag{7.9}$$

汽化热等于在相同的温度和压强时的冷凝热：

$$\Delta H_{\text{vap}} = \Delta H_{\text{cond}}(\text{在相同的温度和压强时}) \tag{7.10}$$

来自锅炉的烟气通常不会冷凝，因此，锅炉实际可用的热量为低热值，因为燃料的部分燃烧热用于水的蒸发。提供精确的空气控制对锅炉效率是必不可少的。过量的空气会冷却燃烧炉并带走有用热，而空气不足将会导致不完全燃烧，未燃烧的燃料将会被推迟燃烧并产生烟雾。一种燃料的净热值不包括燃烧过程中排放至烟囱的水蒸气中的能量在内。加热系统的峰值稳态热效率通常表示为：例如，这种燃烧炉的效率为90%，不过，年度燃料利用效率（AFUE）是一种更为详细的季节性能量效率测量方法，这将在9.4节中讨论。

7.5　理想流体流动的能量转换

对于流体流动系统来说，由于流体流动功（PV）被考虑在焓之内，在工程中使用的是焓而不是内能。图7.2所示为一个开口稳态流动系统。

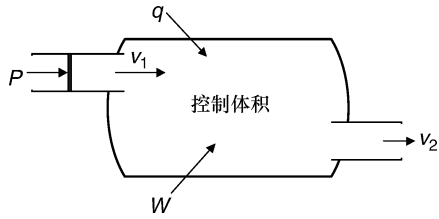


图 7.2　流动流体在控制体积与外界之间的热和功相互作用：

$\dot{m}\ (\Delta H + \Delta v^2/2 + g\Delta z) = \dot{q} + \dot{W}_s$（在等压条件下）

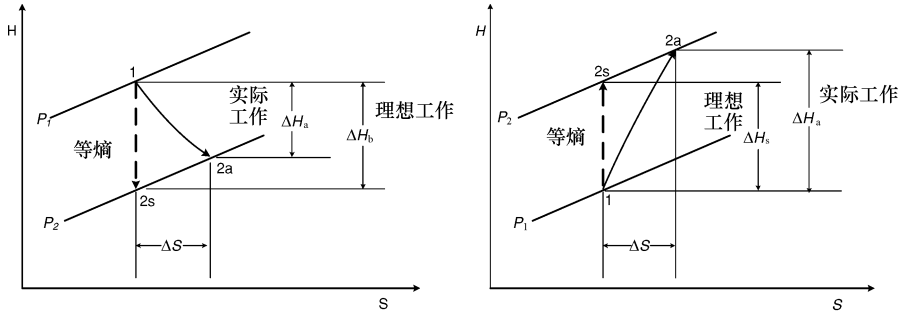


图 7.3　流体流动的功　a）在一个汽轮机内（$P_1 > P_2$），b）在一个压缩机内（$P_1 < P_2$）。在一个汽轮机内理想工作是等熵的，并产生最大功；在一个压缩机中理想工作是等熵的，并需要最小功

对流体流动来说，热和功之间的关系通常可以表示为

$$\dot{m}\left(\Delta H + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z\right) = \dot{q} + \dot{W}_s \tag{7.11}$$

热传递和功传递应该基于熵传递来区分：

- 伴有熵传递的能量交换为热传递。
- 未伴有熵传递的能量交换为功。

对于一个产生功的过程，比如图 7.3a 所示的汽轮机，理想功为可能产生的最大功（等熵）。不过，对于一个需要功的过程，比如图 7.3b 所示的压缩机，理想功为所需要的最小功（等熵）。这些功的极限值出现在过程中的状态变化是可逆的情况下[5,27,37]。对于这种过程，摩擦、热损失与其他损失可以忽略不计。当动能和势能的变化可以忽略不计时，式（7.11）变为

$$\dot{m}\Delta H = \dot{q} + \dot{W}_s \tag{7.12}$$

对于均匀的外界温度 T_o，使用如下热流动定义：

$$\dot{q} = T_o\Delta(\dot{m}S) \tag{7.13}$$

理想功将变为

$$\dot{W}_{\text{idea}} = \dot{W}_{\text{rev}} = \Delta(\dot{m}H) - T_{\text{o}}\Delta(\dot{m}S) \tag{7.14}$$

不过，一个可逆过程是一种假定的情况，而且主要用于理想功极限值的计算以及在相同的性质变化下与实际功的比较。例如在一个汽轮机中，当理想功产生时（见图 7.3a），可以得到绝热或等熵效率，其定义为

$$\eta_{T_{\text{s}}} = \frac{W_{\text{prod}}}{W_{\text{ideal}}} = \frac{H_1 - H_{2\text{a}}}{H_1 - H_{2\text{s}}} = \frac{\Delta H_{\text{a}}}{\Delta H_{\text{s}}}(\text{产生的功}) \tag{7.15}$$

根据所需要的理想功（见图 7.3b），比如在一个压缩机中，等熵效率 η_{s} 可以通过下式得到：

$$\eta_{C_{\text{s}}} = \frac{W_{\text{ideal}}}{W_{\text{req}}} = \frac{H_{2\text{s}} - H_1}{H_{2\text{a}} - H_1} = \frac{\Delta H_{\text{s}}}{\Delta H_{\text{a}}}(\text{需要的功}) \tag{7.16}$$

考虑在一个过程的特定初始状态和最终状态之间的火用值[20]的可逆功 $\dot{W}_{\text{rev}}$ 被定义为

$$\dot{W}_{\text{rev}} = \dot{m}(\text{Ex}_1 - \text{Ex}_2) + \left(1 + \frac{T_{\text{o}}}{T}\right)\dot{q} \tag{7.17}$$

式中，T_{o} 为参考温度。

例 7.3 给出了最大膨胀功的计算，而例 7.4 则是计算等熵效率。

例 7.3 最大功（理想功）计算

1mol 空气从初始状态 500K 和 10atm 膨胀至外界环境条件 300K 和 1atm。气体的平均热容量为 $C_{\text{p,av}} = 29.5$ J/mol K。请估算其最大功。

解：

假设：空气为理想气体系统，而且其状态变化完全可逆。

$T_1 = 500\text{K}$，$P_1 = 10\text{atm}$，$T_2 = 300\text{K}$，$P_2 = 1\text{atm}$，$C_{\text{p,av}} = 29.5$ J/mol K，$R = 8.314$ J/mol K

对于理想气体，焓与压强无关，而且其变化为

$$\Delta H = \int_1^2 C_{\text{p,av}}\text{d}T = C_{\text{p,av}}(T_2 - T_1) = -5900\text{J/mol}$$

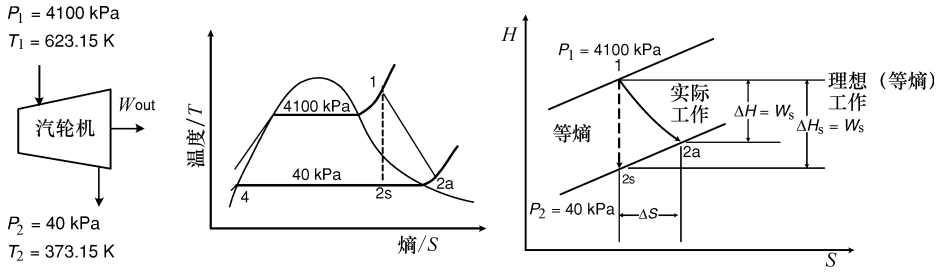
熵的变化：$\Delta S = C_{\text{p,av}}\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = 34.21\text{J/mol K}$，式（4.50）

理想功：$W_{\text{ideal}} = W_{\text{rev}} = \Delta H - T_{\text{o}}\Delta S = -16163\text{J/mol}$

负号表明膨胀功是向外界传递。

例 7.4 等熵汽轮机的效率

一个绝热汽轮机通过将状态为 4100kPa 和 350°C的过热蒸汽膨胀来实现发电。蒸汽流出汽轮机时的状态为 40kPa 和 100°C。蒸汽的质量流量为 8kg/s。请确定等熵汽轮机的效率。



解：

假设：稳态绝热运行。动能和势能的变化可以忽略不计。

入口条件：过热蒸汽（见表 F4）

$$P_1 = 4100\text{kPa}, T_1 = 623.15\text{K}, H_1 = 3092.8\text{kJ/kg}, S_1 = 6.5727\text{kJ/kg K}$$

出口条件：饱和蒸汽（见表 F3）

$$P_2 = 40\text{kPa}, T_2 = 373.15\text{K}, H_{2a} = 2683.8\text{kJ/kg}$$

$$S_{2\text{sat vap}} = 7.6709\text{kJ/kg K}, S_{2\text{sat liq}} = 1.2026\text{kJ/kg K}(\text{在 40kPa 时})$$

$$H_{2\text{sat vap}} = 2636.9\text{kJ/kg}, H_{2\text{sat liq}} = 317.6\text{kJ/kg}(\text{在 40kPa 时，见表 F4})$$

对于等熵运行，$S_1 = S_2 = 6.5727\text{kJ/kg K}$

因为 $S_{2\text{sat liq}} < S_2 = S_{2\text{sat vap}}$，出口处的蒸汽为饱和液汽混合物，混合物的蒸汽干度 x_{2s} 为

$$x_{2s} = \frac{S_2 - S_{2\text{sat liq}}}{S_{2\text{sat vap}} - S_{2\text{sat liq}}} = \frac{6.5727 - 1.2026}{7.6709 - 1.2026} = 0.83$$

$$H_{2s} = (1 - x_{2s}) H_{2\text{sat liq}} + x_{2s} H_{2\text{sat vap}} = 2243.1\text{kJ/kg}(\text{等熵})$$

$$H_{2a} = 2683.8\text{kJ/kg}(\text{实际运行})$$

$$H_1 = 3092.8\text{kJ/kg}$$

等熵效率变为 $\eta_{T_s} = \dfrac{H_1 - H_{2a}}{H_1 - H_{2s}} = 0.48$（或 48%）

7.6　损失功

理想功与实际功之间的差异来自于一个过程的初始状态和最终状态之间所选路径内的不可逆性。不可逆的程度相当于火用损失，而且是潜在损失功的测度[7]。损失功被定义为实际功和理想功之间的差异，并与熵增益率有关。实际功为

$$\dot{W}_{\text{act}} = \Delta\left[\dot{m}\left(H + \frac{v^2}{2} + gz\right)\right] - \dot{q} \tag{7.18}$$

对于外界温度 T_o，理想功为 $\dot{W}_{ideal}$：

$$\dot{W}_{ideal} = \Delta\left[\dot{m}\left(H + \frac{v^2}{2} + gz\right)\right] - T_o\Delta(\dot{m}S) \tag{7.19}$$

那么损失功为

$$\dot{W}_{lost} = \dot{W}_{act} - \dot{W}_{ideal} = \dot{q} - T_o\Delta(\dot{m}S) \tag{7.20}$$

由于熵增益率 $\dot{S}_{prod}$［根据 5.4 节式（5.20）中的熵平衡定义］，发生了损失功：

$$\dot{S}_{prod} = \Delta(\dot{m}S) - \frac{\dot{q}}{T_o} \tag{7.21}$$

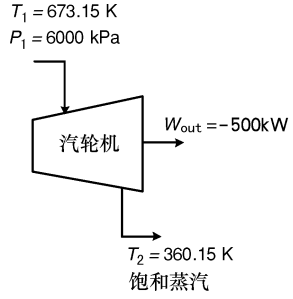
因此，式（7.20）变为

$$\dot{W}_{lost} = T_o\ \dot{S}_{prod} \tag{7.22}$$

由于对于不可逆过程，熵增益率总为正（$\dot{S}_{prod} > 0$），那么，$\dot{W}_{lost} > 0$。只有当一个过程是完全可逆的，才会有 $\dot{W}_{lost} = 0$，因为 $\dot{S}_{prod} = 0$。熵增益率进而损失功将会提高，因为一个过程的不可逆性增加了。这就导致不可用能量值的增加，因此，浪费的能量也增加了。例 7.5 给出了损失功的计算，而例 7.6 则给出了一个压缩机中所需的最小功率的估算。

例 7.5　损失功的估算

一个汽轮机的入口蒸汽为 6MPa 和 400°C，释放的饱和蒸汽为 360.15K，同时产生 500kW 轴功。外界环境温度为 290K。请确定可能生产的最大功率（单位为：kW）和损失功。



解：

假设：汽轮机以稳态运行。动能和势能的变化可以忽略不计。

计算基础：1kg/s 蒸汽流量

入口：过热蒸汽：$H_1 = 3180.1$kJ/kg，$S_1 = 6.5462$kJ/kg K（见表 F4）

出口：饱和蒸汽：$H_2 = 2655.3$kJ/kg，$S_2 = 7.5189$kJ/kg（见表 F3）

$$W_{out} = -500\text{kW}, T_o = 290\text{K}$$

$$\Delta H = H_2 - H_1 = (2655.3 - 3180.1)\text{kJ/kg} = -524.8\text{kJ/kg}$$

热传递量：$q = -W + H_2 - H_1 = -24.8\text{kJ/kg}$

根据以稳态运行且与外界只有热交换的汽轮机的熵平衡，能够确定其熵增益：

$$S_{prod} = S_2 - S_1 - \frac{q}{T_o} = 7.5189 - 6.5462 + 24.8\text{kJ/kg/(290)K} = 1.06\text{kJ/kg K}$$

损失功：$W_{lost} = T_o S_{prod} = 307.4\text{kJ/kg}$

最大功输出：

$$W_{ideal} = W_{max} = W_s - T_o S_{prod} = (-500 - 307.4)\text{kJ/kg} = -807.4\text{kJ/kg}$$

例 7.6　压缩机所需最小功率的估算

一个压缩机接收的空气为 15psia 和 80°F，流量为 1.0lb/s。出口处的空气状态为 40psia 和 300°F。请估算压缩机的最小输入功率。外界环境温度为 520 °R。

解：

假设势能影响可以忽略不计，而且是处于稳态过程。绝热压缩，$q_{loss} = 0$。

计算基础：空气流量 $= \dot{m} = 1\text{lb/s}$。外界环境温度为 520 °R。

根据表 D1 查得的空气性质从国际单位制转换之后：

状态 1：$P_1 = 15\text{psia}$，$T_1 = 540\ °\text{R}$，$H_1 = 129.0\text{Btu/lb}$，$S_1 = 0.6008\text{Btu/lb °R}$

状态 2：$P_2 = 40\text{psia}$，$T_2 = 760\ °\text{R}$，$H_2 = 182.0\text{Btu/lb}$，$S_2 = 0.6831\text{Btu/lb °R}$

压缩机做功：

$$\dot{W}_s = \dot{m}(H_2 - H_1) = (1\text{lb/s})(182.08 - 129.06)\text{Btu/lb} = 53.0\text{Btu/s}$$

熵增益：$\dot{S}_{prod} = \dot{m}(S_2 - S_1) = 0.0823\text{Btu/s °R}$［式（7.21）］

损失功：$\dot{W}_{lost} = \dot{m} T_o S_{prod} = 42.8\text{Btu/s}$

最小功所需要的：

$$\dot{W}_{ideal} = \dot{W}_{min} = \dot{m}(\Delta H - T_o S_{prod}) = (53.0 - 42.8)\text{Btu/s} = 10.2\text{Btu/s}$$

7.7　机械转换的效率

机械能的传递通常是通过一个旋转轴来完成的。当没有损失（例如，以摩擦形式）时，机械能可以从一个机械能形式完全转化为另一种形式。机械能的转换效率可以估算为

$$\eta_{\text{mech}} = \frac{\text{能量输出}}{\text{能量输入}} \tag{7.23}$$

例如，机械能的转换效率为95%表示：由于摩擦和其他损失，5%的机械能被转换成热能[6,10]。

在流体流动系统中，一个泵通常从一个电动机接收轴功，并将这种轴功部分作为机械能传递给流体，部分通过摩擦以热量的形式损失了。因此，流体压强或者速度或者高度增加了。不过，涡轮机会将流体的机械能转换成轴功。一个泵的能量效率定义为

$$\eta_{\text{pump}} = \frac{\text{机械能输出}}{\text{机械能输入}} = \frac{\dot{E}_{\text{mech out}}}{\dot{W}_{\text{shaft in}}} \tag{7.24}$$

一个风扇的机械能效率为在出口处空气的动能与机械输入功之比。例如，如果一个风扇为50 W的电动机，产生的空气流速为15m/s，空气的质量流量为0.3kg/s，那么，风扇的机械能效率变为

$$\eta_{\text{fan}} = \frac{\dot{E}_{\text{mech out}}}{\dot{W}_{\text{shaft in}}} = \frac{(0.3\text{kg/s})(15\text{m/s})^2/2}{50\text{W}} = 0.675$$

其中，入口处速度为零，$v_1 = 0$，压力能和势能为零（$\Delta P = 0$ 与 $\Delta z = 0$）。一个汽轮机的能量效率被定义为

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{\text{机械能输出}}{\text{机械能(从流中获得)输入}} = \frac{\dot{W}_{\text{shaft out}}}{\dot{E}_{\text{mech in}}} \tag{7.25}$$

另一方面，电动机效率和发电机效率定义为

$$\eta_{\text{motor}} = \frac{\text{机械功率输出}}{\text{电能输入}} = \frac{\dot{W}_{\text{shaft out}}}{\dot{W}_{\text{elect in}}}(\text{电动机}) \tag{7.26}$$

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{\text{电能输出}}{\text{机械能输入}} = \frac{\dot{W}_{\text{elect out}}}{\dot{W}_{\text{shaft in}}}(\text{发电机}) \tag{7.27}$$

一个水轮机在发电循环中与其发电机联合，如图7.4所示。泵也是与其电动机相联合。因此，水轮发电机与泵-电动机系统的联合效率或总体效率定义如下：

$$\eta_{\text{turb-gen}} = \eta_{\text{turb}}\eta_{\text{gen}} = \frac{\dot{W}_{\text{elect out}}}{\Delta\dot{E}_{\text{mech in}}}(\text{水轮发电机系统}) \tag{7.28}$$

水轮发电机的总体效率表示的是水的机械能转换成电能的比值。

$$\eta_{\text{pump-motor}} = \eta_{\text{pump}}\eta_{\text{motor}} = \frac{\Delta\dot{E}_{\text{mech}}}{\dot{W}_{\text{elect in}}}(\text{泵-电动机系统}) \tag{7.29}$$

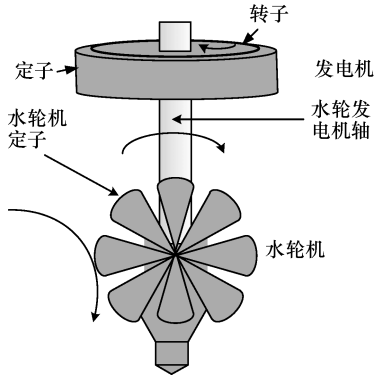


图 7.4　一个典型的水轮机转子和发电机。水轮发电机的总体效率为水的热能与转换成的电能之比；如果水轮机的效率为 0.8，发电机的效率为 0.9，则有：$\eta_{\text{turb-gen}} = \eta_{\text{turb}}\eta_{\text{gen}} = (0.8)(0.95) = 0.76$

一个泵-电动机系统的总体效率表示的是电能转换成流体机械能的比值[5,37]。例 7.7 给出了电动机热损失的估算，而例 7.8 则给出了泵的机械效率的估算。

例 7.7　电动机的热损失

连接泵的电动机抽水时电压为 110V，电流为 10.0A。在负载稳定时，电动机传输的机械能为 1.32hp。请估算该电动机的热损失。

解：

假设电动机负载是稳定的。

$$I = 10.0\text{A}, V = 110\text{V}, \dot{W}_{\text{s}} = 1.32\text{hp} = 983\text{W}$$

电动机接收的电能用于泵做功何产生热量：

接收的电能：$\dot{W}_{\text{e}} = IV = 1100\text{W}$

热损失：$\dot{q}_{\text{loss}} = \dot{W}_{\text{e}} - \dot{W}_{\text{s}} = (1100 - 983)\text{W} = 117\text{W}$

1100kW 的电能只有 983kW 被转换为泵的功。

例 7.8　泵的机械效率

一个储水器的泵由 16kW 电动机驱动，其效率为 90%。水流量为 55L/s。入口管道和出口管道的直径是相同的，而且入口和出口之间的高度差可以忽略不计。入口和出口的绝对压强分别为 100kPa 和 300kPa。请确定该泵的机械效率。

解：

假设：稳态一维和绝热流动。动能和势能的变化可以忽略不计。

$$\rho_{\text{water}} = 1000\text{kg/m}^3 = 1\text{kg/L}$$

水的质量流量：$\dot{m}_{\text{water}} = \rho\ \dot{q} = (1\text{kg/L})(55\text{L/s}) = 55\text{kg/s}$

电动机传递的机械轴功：

$$W_{\text{pump}} = \eta_{\text{motor}} \dot{W}_{\text{electric}} = (0.9)(16\text{kW}) = 14.4\text{kW}$$

水增加的机械能：

$$\Delta\ \dot{E}_{\text{mech}} = \dot{m}\left(\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{\nu_2^2 - \nu_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)\right)$$

在忽略不计动能和势能之后：

$$\Delta\ \dot{E}_{\text{mech}} = \dot{m}\left(\frac{P_2 - P_1}{\rho}\right) = (55\text{kg/s})\left(\frac{(300 - 100)\text{kPa}}{1000\text{kg/m}^3}\right)\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kPa m}^3}\right) = 11.0\text{kW}$$

泵的机械效率为

$$\eta_{\text{pump}} = \frac{\Delta\ \dot{E}_{\text{mech}}}{\dot{W}_{\text{pump}}} = \frac{11\text{kW}}{14.4\text{kW}} = 0.763\ \text{或}\ 76.3\%$$

泵所接收的 14.4kW 能量中只有 11kW 被转换为泵的功，剩余的 3.4kW 能量由于摩擦而以热量的形式损失了。

7.8　通过热机实现的热能转换

热机将热能 q_{in} 转换为机械能或功 W_{out}。热机的一些例子包括蒸汽机、热泵、汽车的汽油发动机、柴油发动机与气体动力循环等，所有这些热机都是通过加热气体的膨胀来驱动发动机的机械运动。一些热机运行带有相变循环，比如使用朗肯循环的蒸汽发电，其中液态水在增加热量之后变为蒸汽。在循环中膨胀之后，蒸汽冷凝为液态水。其他类型的热机运行无相变循环，比如布雷顿循环，其中热气体在热机中膨胀之后被冷却。典型的气体动力循环包含压缩冷气体、加热气体、膨胀热气体以及在重复循环之前的最终冷却气体。表 7.2 列出了一些重要的发动机和它们的循环过程。工业发电厂中，典型的燃煤电站和燃油电站热效率约为 33%，联合循环燃气电站则高达 50%。气体-水轮机联合循环电站由蒸汽和天然气来驱动[13,15,28]。

表 7.2　一些热机的过程比较

循　环	压　缩	热 增 加	膨　胀	热 损 失
朗肯	绝热	等压	绝热	等压
卡诺	等熵	等温	等熵	等温
埃里克森	等温	等压	等温	等压
斯特灵	等温	等容	等温	等容
狄塞尔	绝热	等压	绝热	等容
奥托	绝热	等容	绝热	等容
布雷顿	绝热	等压	绝热	等压

表 7.3　热机的不同循环类型

外部燃烧循环	无相变：布雷顿，卡诺，埃里克森，斯特灵
	有相变：朗肯，两相斯特灵
内燃循环	无相变：柴油，奥托
制冷循环	蒸汽-压缩
热泵循环	蒸汽-压缩

一个循环的各个过程为以下状态之一：

- 等温（在恒温条件下）；
- 等压（在恒压条件下）；
- 等容（在恒容条件下）；
- 绝热（无热量吸入或释放）。

热机类型的变化见表 7.3。在燃烧循环中，一旦空气和燃料的混合物被点燃并燃烧，有效能能够被热机转化为功。在一个往复式发动机中，在气缸之内的高压气体驱动发动机的活塞。一旦有效能被转换为机械功，其余的热气体就被排出热机，这会使活塞返回到它们以前的位置[15]。

一些可用的热输入不是转化为功，而是以废热 q_{out} 的形式消散到环境之中。热机的热效率为转化为功的热能的百分比，可以估算为

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{out}}}{q_{\text{in}}} = 1 - \frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}} \tag{7.30}$$

即便是最好的热机，它的效率也是很低的：通常要低于 50%，而且经常是远远低于这个数字。因此，通过热机损失到环境中的能量是主要的能源浪费，尽管现代的热电联产、混合加热循环与能量再循环方案正在开始将这种废热用于其他目的。引起这种低效率的原因主要有三种：

- 任何热机的热效率均受限于卡诺效率。
- 特定类型的热机可能会有较低的效率极限，由于它们使用的热机循环所固有的不可逆性。
- 实际热机的非理想行为，比如机械摩擦和燃烧过程中的损失，可以引起效率的进一步损失。

热机循环的热效率不能超过卡诺循环所定义的极限，卡诺循环表明总体效率取决于热机较低的与较高的工作温度之间的差异。这种极限假设热机工作在理想条件下：无摩擦过程、理想气体、完美的绝缘体与工作时间无限长。一辆小汽车发动机的实际燃料经济性通常以 mile/gal（或每 100km 消耗燃料多少升）来测量。甚至当辅以涡轮增压器和辅助设计时，大多数发动机的平均效率为 18% ~ 20%。不过，火箭发动机效率依然很高，甚至可以高达 70%，因为它们在很高的温度和压强下燃烧，可以实现很高的膨胀率。对于固定的轴式发动机，可以通过计算制动器比油耗来测量燃料消耗，它度量燃料消耗的质量流量除以产生的功

率。例 7.8 给出了一辆小汽车的燃料消耗的估算。

热机效率只是一个因素。一个更有意义的比较应该考虑从燃料源到消费者的整个能量供应链的总体效率。虽然热机浪费的热量通常是低效率的最大来源，燃料精炼和运输的能量成本与输电线的能量损失等因素可以抵消一个更为有效的热机的优势。除了低污染等效率目标之外，发动机必须优化用于其他目标。车辆发动机的设计还必须实现低排放、适当的加速度、快速起动、轻重量与低噪声等目标。这些需求可能会导致带来效率降低的妥协设计。大型的固定发电厂受这些竞争性需求的限制较小，因此朗肯循环的效率要显著地高于车辆发动机。电动小汽车依靠发电厂燃料燃烧产生的电力而充电的电池来运行，因此，使用电动小汽车来取代内燃式车辆，理论上具有提高交通运输所用能量热效率的潜力，进而降低了对于化石燃料的需求[6,29]。

实际的发动机与理想行为有很多偏离，它们会浪费能量，使得其实际效率远远低于上面给出的理论值。非理想行为的例子有：

- 运动部分的摩擦；
- 不完全燃烧；
- 燃烧室的热损失；
- 工作流体的非理想行为；
- 低效率的压缩机和涡轮机；
- 非理想的气门正时。

例 7.9 热机的热效率

从一个燃烧炉到一个热机的热传递率为 90 MW。废热释放至外界的释放率为 55 MW。如果忽略其他所有的能量损失，请估算热机的净输出功率和热效率。

解：

假设：热损失可以忽略不计的稳态过程。

$$\dot{q}_{\text{in}} = 90\text{MW}, \dot{q}_{\text{out}} = 55\text{MW}$$

净输出功率：
$$\dot{W}_{\text{net out}} = \dot{q}_{\text{in}} - \dot{q}_{\text{out}} = 35\text{MW}$$

热效率：$\eta_{\text{th}} = \dfrac{\dot{W}_{\text{net}}}{q_{\text{in}}} = \dfrac{35}{90} = 0.388$ 或 38.8%

热机能够转换从燃烧炉传入热量的 38.8%。

例 7.10 一辆小汽车的燃料消耗

汽油小汽车发动机的总体效率为 25%～28%，柴油发动机为 34%～38%，大型发电厂为 40%～60%[6]。一辆功率输出为 120hp 的小汽车发动机热效率为 24%。如果其燃料的高热值为 20400Btu/lb，请确定小汽车的燃料消耗。

解：

假设：小汽车具有恒定的功率输出。

净热值约等于高热值（0.9）= 18360Btu/lb（近似值）

小汽车发动机的输出功率和效率为：$\dot{W}_{\text{net}} = 120\text{hp}$，$\eta_{\text{th}} = 0.24$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{q}_{\text{in}}} \rightarrow \dot{q}_{\text{in}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\eta_{\text{th}}} = \frac{120\text{hp}}{0.24}\left(\frac{2545\text{Btu/h}}{\text{hp}}\right)$$

$$\dot{q}_{\text{in}} = 1272500\text{Btu/h}$$

净热值约等于高热值（0.9）= 18360Btu/lb

燃料消耗 = $\dot{q}_{\text{in}}$/净热值 = 1272500Btu/h/18360Btu/lb = 69.3 lb/h

假设平均密度为 0.75kg/L：

ρ_{gas} = (0.75kg/L)(2.2lb/kg)(1/0.264gal) = 6.25lb/gal

消耗的燃料（燃料单位：gal）：(69.3lb/h)/(6.25lb/gal) = 11.1gal/h

7.8.1　空气标准假设

奥托和狄塞尔热机的内燃循环以及燃气轮机是一些依靠气体循环来工作的著名发动机。在气体动力循环中，整个循环的工作流体都是气体。在分析气体动力循环时，使用被称为空气标准假设的下列假设：

- 工作流体为空气，而且总是作为一种理想气体；
- 循环中的所有过程都是本质可逆的（等熵）；
- 热增加过程使用外部热源；
- 热损失过程将工作流体恢复至其原始状态。

另外还假设空气具有恒定的比热值（在室温下 25°C或 77°F 时测定）。这种空气标准假设称为冷空气标准假设。这些假设简化了气体动力循环的分析，同时并没有显著地偏离实际循环[6]。

7.8.2　理想气体的等熵过程

理想气体的熵变可以表示为

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 C_{\text{p}}(T)\frac{\text{d}T}{T} - R\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \tag{7.31}$$

在等熵条件（$\Delta S = 0$）和恒定热容量 $C_{\text{p,av}}$之下，式（7.31）变为

$$0 = C_{\text{p,av}}\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \tag{7.32}$$

对于理想气体，热容量关系为

$$C_p - C_v = R \tag{7.33}$$

从式（7.32）与式（7.33），可以导出以下关系：

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{(\gamma-1)} \text{和} \left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \tag{7.34}$$

式中，$\gamma = C_p/C_v$

在等熵条件（$\Delta S = 0$）和变热容量之下，式（7.31）变为

$$0 = S_{T_2} - S_{T_1} - R \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \tag{7.35}$$

式中，S_{T_1}和S_{T_2}分别为温度 T_1 和 T_2 时的熵值。

在重新整理式（7.35）之后可得

$$\frac{P_2}{P_1} = \exp\left(\frac{S_{T_2} - S_{T_1}}{R}\right) = \frac{\exp\ (S_{T_2}/R)}{\exp\ (S_{T_1}/R)} = \frac{P_{r_2}}{P_{r_1}} \tag{7.36}$$

式中，P_{r_1}称为相对压强，它是由 exp（S_{T_1}/R）给出的无量纲值。使用理想气体关系：

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \tag{7.37}$$

相对比容 V_r（$V_r = T/P_r$）可以由下式导出：

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2/P_{r_2}}{T_1/P_{r_1}} = \frac{V_{r_2}}{V_{r_1}} \tag{7.38}$$

附录 D 的表 D1 中以表的形式列出了空气与温度有关的 P_r 和 V_r 值。式（7.35）~式（7.38）考虑了比热随温度的变化，而且仅适用于理想气体的等熵过程。式（7.36）与式（7.38）适用于以等熵过程运行的气体动力循环的分析[5]。

7.8.3　通过发电机转换的机械能

在发电时，一个发电机通常使用电磁感应将机械能转换成电能。电磁感应是运动导体穿过磁场产生电势能（电压）。发电机驱使线圈中的电子流过外部电路。机械能的来源可以是一个水轮机或水轮的落水、一个内燃机和一个风力发电机组等。相反的是电能转换为机械能，这要通过一个电动机来完成。图 7.4 所示为一台发电机的示意图。

一台发电机的效率要根据负载电路的功率与发电机产生的总功率来确定。对于大多数商业发电机来说，这个比值可以高达 95%。它的损失通常来自变压器、铜线圈、铁心内的磁化损失与发电机的旋转摩擦等。水轮发电机的总体效率为水的热能转换成电能的比值，可以通过下式得到：

$$\eta_{\text{turb-gen}} = \eta_{\text{turb}} \eta_{\text{gen}} \tag{7.39}$$

迈克尔·法拉第（Michael Faraday）发现了电磁发电机的工作原理。这个定律后来被称为法拉第定律，它是指：在一个包围了变化的磁通量的电导体中产生了电动力。一台发电机的两个主要部分是转子和定子。转子是发电机的旋转部分，而定子则是其固定部分。发电机绕组的电枢产生电流。电枢可以设计在转子上，也可以设计在定子上。由于被传递入磁场电路的功率远低于电枢电路，交流发电机通常在转子和定子上带有励磁绕组作为电枢绕组。

一个发电机或者电动机使用磁场线圈。如果磁场线圈未通电，发电机的转子能够旋转而没有产生任何可用的电能。当发电机最初开始转动时，铁心中出现的小磁力为其起动提供磁场，并在电枢中产生了一个小电流。该电流流过励磁绕组，创建了一个更大的磁场，产生一个更大的电枢电流。这种“自举”的过程一直持续，直到铁心内的磁场由于饱和而稳定而且发电机达到稳态功率输出。大型发电厂的发电机经常利用一个单独的小发电机来激励更大的发电机的励磁绕组[6]。

Dynamo（发电机）是第一个能够为工业供电的发电机。发电机利用电磁定律将机械旋转转换成直流电。一台发电机包含一个固定的结构，它提供一个恒定磁场和在该磁场之内转动的一组旋转绕组。换向器是电动机或发电机专用型的旋转电开关，它会周期性地逆转转子与外部电路之间的电流方向。

7.8.4　卡诺热机效率

一个卡诺热机，通过将工作流体从高温状态 T_H 变为低温状态 T_C，从而将热能转换为机械能。图 7.5 所示为理想发动机循环的典型压强-容积（*PV*）图与温度-熵（*TS*）图。在 *PV* 图和 *TS* 图中，循环过程曲线所包围的面积均表示由发动机净热传递转换而来的机械能。因此，任何能够改善净热传递率的改进措施也将会改进热效率[37]。

一个热“源”对高温状态的工作流体进行加热。工作流体在发动机中产生功，同时将剩余的热量传递给较冷的“散热设备”，直到它达到一个低温状态。工作流体通常是液体或气体。在发动机运行期间，部分热能被转化为功，而且剩余的能量被散热装置（主要是普通的外界环境）所损耗。

卡诺循环总体上包含四个可逆过程，如图 7.5 所示：

- 过程 1-2：在恒温 T_H 条件下热能增加。
- 过程 2-3：在恒熵 $S_2 = S_3$ 条件下等熵膨胀。
- 过程 3-4：在恒温 T_C 条件下热能损失。
- 过程 4-1：在恒熵 $S_4 = S_1$ 条件下等熵压缩。

卡诺热机的热效率计算公式如下：

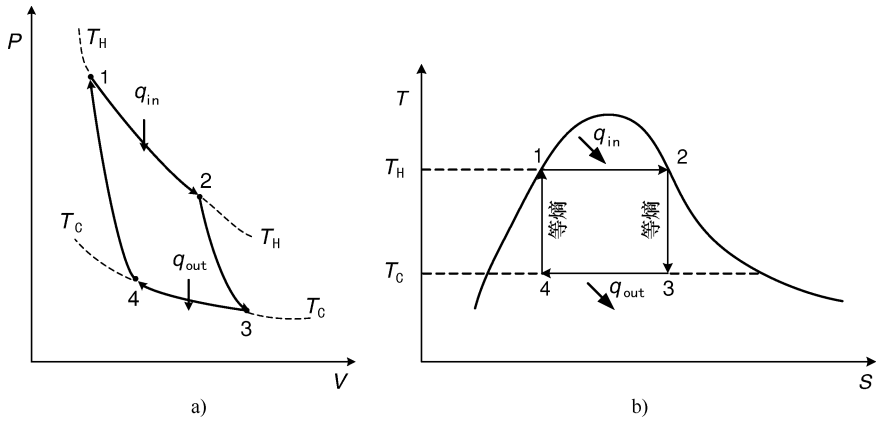


图 7.5　典型的理想发动机循环

a）压强-容积（*PV*）图　b）温度-熵（*TS*）图

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} \tag{7.40}$$

根据图 7.5b，可以估算吸收的热量 q_{in} 和散发掉的热量 q_{out}：

$$q_{in} = T_H(S_2 - S_1) \tag{7.41}$$

$$q_{out} = T_C(S_4 - S_3) \tag{7.42}$$

将式（7.41）与式（7.42）代入式（7.40），可以得到

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_C(S_4 - S_3)}{T_H(S_2 - S_1)} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \tag{7.43}$$

因为功率循环是等熵的，可以得到 $S_2 = S_3$ 和 $S_4 = S_1$。式（7.4）表示热机效率受限于卡诺效率，它等于在热（T_H）和冷（T_C）之间的温差除以热端的温度，所有的温度均以绝对温度来表示。卡诺循环是一个实际循环或理想循环可以比较的标准。在运行于相同的热源温度 T_H 和相同的散热设备温度 T_C 之间的所有热机中，卡诺循环具有最高的热效率。

所有热机的冷侧均接近于大约为 300K 的环境温度，比如湖泊、河流或者外界空气等。因此，大多数针对各种热机热力学效率的改进措施均致力于在材料极限限制之内来提高热源的温度。其最高值 T_H 受限于热机的组成结构（比如活塞或汽轮机叶片）所能承受的最高温度。

卡诺热机的热效率与工作流体的类型无关，也与循环是否运行在一个封闭或稳流系统之中无关。例如，如果一个汽车发动机燃烧汽油时的温度为 T_H = 1200K，排气温度为 T_C = 800K，那么，它可能的最大效率为

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{800\text{K}}{1200\text{K}} = 0.33 \text{ 或 } 33\%$$

总体来说，可逆发动机循环在实际当中很难达到，因为它需要非常大的热交换器，同时也需要很长的时间。实际的发动机效率要远远低于卡诺极限。例如，汽车发动机的平均效率要低于 35%。由于卡诺定理仅适用于热机，那些将燃料的能量直接转换为功而没有燃烧它的装置（比如燃料电池）的效率能超过卡诺效率。在实际循环的各个过程中，涉及摩擦、压降与热损失，因此它们运行的热效率较低[2,4,13,21]。

7.8.5　内可逆热机效率

卡诺热机必须以极小的温度梯度运行，因此卡诺效率的极限也是极小的。内可逆发动机给出了能量的上限值，它能够从低于根据卡诺循环预测而得的实际过程中导出，并且涵盖了因为热传递而发生的热损失。通过下面的关系式，这种模型能够预测实际热机能够实现的效率[3,16]：

$$\eta_{\max} = 1 - \sqrt{\frac{T_C}{T_H}} \tag{7.44}$$

表 7.4 比较了以卡诺循环、内可逆循环与实际循环工作的发动机的效率。由于实际工作的效率是可视的，因此它的测量值接近于那些可从内可逆循环获得的效率值。

表 7.4　以卡诺循环、内可逆循环与实际循环工作的发动机的效率

发电厂/站	T_C/°C	T_H/°C	η（卡诺）	η（内可逆）	η（测量值）
燃煤发电厂	25	565	0.64	0.40	0.36
核电站	25	300	0.48	0.28	0.30
地热发电站	80	250	0.33	0.18	0.16

注：Callen[3]。

7.8.6　朗肯热机效率

朗肯循环用于蒸汽轮机发电厂。一个汽轮机将运动流体的动能转换为机械能。蒸汽由一系列安装于蒸汽轮机轴上的叶片推动，而该轴则与发电机相连接。进而，发电机基于在磁力和电力之间的关系，将它的机械能转换为电能。世界上大部分电力是使用朗肯循环产生的。由于在循环期间，循环的工作流体从液体变化为蒸汽，然后再回到液态水，它们的效率取决于水的性质。使用再热循环的现代化蒸汽轮机发电厂的热效率能够达到 47%，而且在联合循环发电厂中，热效率能够接近 60%。

图 7.6 描述了在朗肯循环之内的主要过程。主要的过程朗肯循环如下：

- 过程 4-1：水泵将水从低压抽到高压。
- 过程 1-2：高压液体进入一个锅炉中，它在锅炉中由外部热源在等压条件

下加热变为蒸汽。

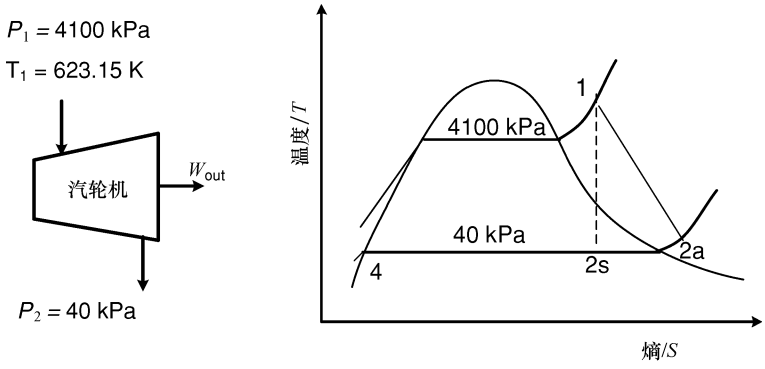
- 过程2-3：蒸汽膨胀通过一个汽轮机，产生功率。这样会降低该蒸汽的温度和压强，并会出现部分冷凝。

- 过程3-4：然后，湿蒸汽流入一个冷凝器中，它在冷凝器中被等压冷凝变为饱和液体。

由于在一个理想的朗肯循环中，泵和汽轮机运行于等熵过程，而且该过程中没有熵产生，从而实现了输出功的最大化，因此，朗肯循环有时候被视为一种实际的卡诺循环（见图7.5）。两者的主要差异在于：在朗肯循环中，热增加（在锅炉中）和热损失（在冷凝器中）是等压过程，而在理论上的卡诺循环中，它们是等熵过程[13,37]。例7.11给出了一个理想朗肯循环的热效率估算，而例7.12则分析了蒸汽发电厂的功率输出。

例7.11　蒸汽轮机的效率和功率输出

一个绝热汽轮机通过将状态为4100kPa和350°C的过热蒸汽膨胀来实现发电。蒸汽流出汽轮机时的状态为40kPa。蒸汽的质量流量为8kg/s。如果等熵效率为0.75，请确定该汽轮机的实际功率输出。



解：

假设：稳态绝热运行。动能和势能的变化可以忽略不计。

根据表F4查得的数据如下：

入口条件：

$P_1 = 4100\text{kPa}$，$T_1 = 623.15\text{K}$，$H_1 = 3092.8\text{kJ/kg}$，$S_1 = 6.5727\text{kJ/kg K}$

出口条件：

$P_2 = 40\text{kPa}$，$S_{2\text{sat vap}} = 7.6709\text{kJ/kg K}$，$S_{2\text{sat liq}} = 1.0261\text{kJ/kg K}$

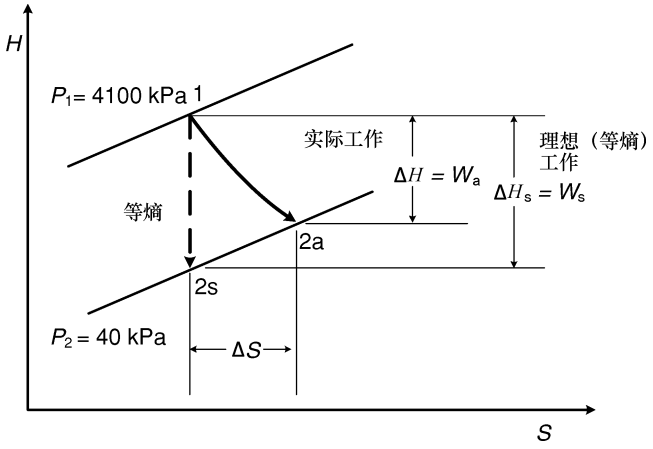
$H_{2\text{sat vap}} = 2636.9\text{kJ/kg}$，$H_{2\text{sat liq}} = 317.6\text{kJ/kg}$（在40kPa时，见表F3）

对于等熵运行 $S_1 = S_2 = 6.5727\text{kJ/kg K}$

因为 $S_1 < S_{2\text{sat vap}}$，出口处的蒸汽为饱和液-汽混合物

饱和混合物的干度：$x_{2s}=\dfrac{S_2-S_{2\text{sat liq}}}{S_{2\text{sat vap}}-S_{2\text{sat liq}}}=\dfrac{6.5727-1.0261}{7.6709-1.0261}=0.83$

$$H_{2s}=(1-x_{2s})H_{2\text{sat liq}}+x_{2s}H_{2\text{sat vap}}=2243.1\text{kJ/kg}$$



根据等熵的效率为 0.75，能够估算实际的焓 H_{2a}：

$$\eta_t=\frac{H_1-H_{2a}}{H_1-H_{2s}}=0.75\rightarrow H_{2a}=2455.5\text{kJ/kg}$$

非等熵的实际功率输出 $\dot{W}_a$（参见上图）：

$$\dot{m}\Delta H=\dot{W}_a=\dot{m}(H_{2a}-H_1)=(8\text{kg/s})(2455.5-3092.8)=-5098.4\text{kW}$$
$$=-5.098\text{MW}$$

最大功率输出：$\dot{W}_s$（参见上图）只有通过等熵膨胀方可实现：

$$\dot{m}\Delta H=\dot{W}_a=\dot{m}(H_{2s}-H_1)=(8\text{kg/s})(2243.1-3092.8)=-6797.6\text{kW}$$
$$=-6.797\text{MW}$$

上面的焓-熵（*HS*）图解释了实际的汽轮机和理想汽轮机工作之间的差异。对于功输出来说，符号为负。

例 7.12　朗肯循环的热效率估算

一个朗肯循环（见图 7.6）使用天然气来产生 0.12MW 的功率。供应给锅炉的燃烧热产生的蒸汽为 10000kPa 和 798.15K，该蒸汽被输送到一个汽轮机中。汽轮机的效率为 0.7。从汽轮机中排出的蒸汽为 30kPa。泵的效率为 0.75。请确定：

① 理想朗肯循环的热效率。

② 实际朗肯循环的热效率。

解：

假设动能和势能的变化可以忽略不计，而且系统处于稳态。

考虑图 7.6。

① 基础为 1kg/s 蒸汽。

汽轮机输入：

$H_2 = 3437.7\text{kJ/kg}$，$S_2 = 6.6797\text{kJ/kg K}$，$T_2 = 798.15\text{K}$；$P_2 = 10000\text{kPa}$（见表 F4）

汽轮机输出：

$$H_{4\text{sat liq}} = H_{3\text{sat liq}} = 289.3\text{kJ/kg K}；\ H_{4\text{sat vap}} = H_{3\text{sat vap}} = 2625.4\text{kJ/kg K}；$$

$$P_3 = P_4 = 30\text{kPa}，\ S_{3\text{sat liq}} = 0.9441\text{kJ/kg K}；\ S_{3\text{sat vap}} = 7.7695\text{kJ/kg K}；$$

$$P_3 = 30\text{kPa}\ （见表\ \text{F3}）$$

$$\eta_{\text{turb}} = 0.70；\ \eta_{\text{pump}} = 0.75；\ V = 1020\text{cm}^3/\text{kg}，\ T = 342.15\text{K}$$

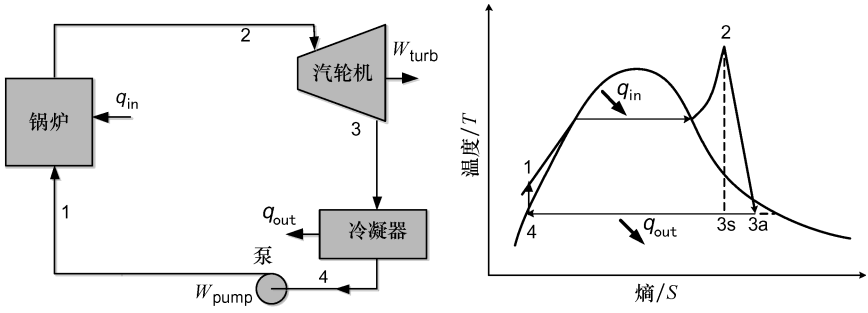


图 7.6　a）朗肯循环的示意图，b）*TS* 图中的朗肯循环过程；过程 2-3s 所示为等熵膨胀，而过程 2-3a 则为实际膨胀过程，其中熵不是恒定值，而且增大了废热量

对于理想朗肯循环，其工作是等熵过程，而且有 $S_2 = S_3$。不过，$S_2 < S_{3\text{sat vap}}$，从汽轮机中排出的蒸汽为湿蒸汽。湿蒸汽的蒸汽干度为 $x_{3\text{s}}$：$x_{3\text{s}} = \dfrac{S_2 - S_{3\text{sat liq}}}{S_{3\text{sat vap}} - S_{3\text{sat liq}}} = 0.84$

湿蒸汽的焓 $H_{3\text{s}}$ 为

$$H_{3\text{s}} = (1 - x_{3\text{s}})H_{3\text{sat liq}} + x_{3\text{s}}H_{3\text{sat liq}} = 2252.4\text{kJ/kg}$$

理想工作：$W_{\text{s}} = \Delta H_{\text{s}} = H_{3\text{s}} - H_2 = -1185.3\text{kJ/kg}$（等熵膨胀）

$$P_3 = P_4，\ P_1 = P_2$$

根据泵的等熵工作过程有　$W_{\text{ps}} = V(P_2 - P_3) = 10.2\text{kJ/kg}$

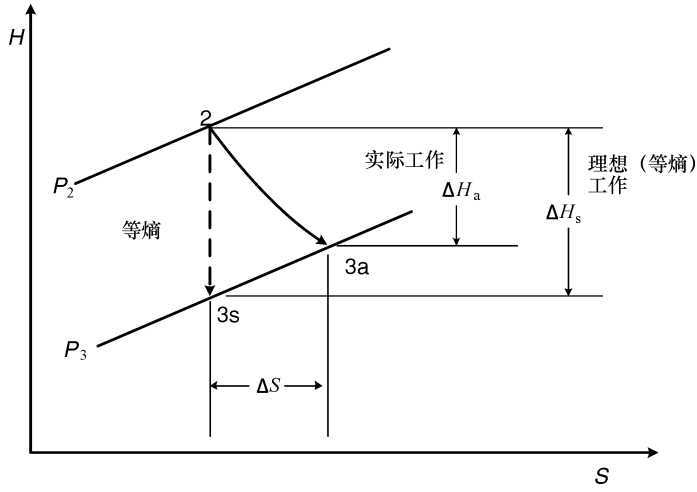
因此，在点 1 处的焓为　$H_{1\text{s}} = \Delta W_{\text{ps}} + H_4 = 10.2 + 289.3 = 299.5$（kJ/kg）

锅炉中所需要的热量为　$q_{\text{in}} = H_2 - H_{1\text{s}} = 3138.2\text{kJ/kg}$

理想朗肯循环的净功为

$$W_{\text{net,s}} = W_{\text{p}} + \Delta H_{\text{s}} = (10.2 - 1185.3)\text{kJ/kg} = -1175.1\text{kJ/kg}$$

理想朗肯循环的效率：$\eta_{\text{ideal cycle}} = \dfrac{W_{\text{net,s}}}{q_{\text{in}}} = 0.374$ 或 37.4%



② 实际循环效率：$\dfrac{\Delta H_a}{\Delta H_s}=\eta_{t,actual}$

在汽轮机效率 $\eta_t=0.7$ 时有 $\Delta H_a=\eta_t\Delta H_s=-829.7\text{kJ/kg}$

泵的效率：$\dfrac{\Delta W_{ps}}{\Delta W_{pa}}=\eta_{pump}$，于是有：$W_{pa}=\dfrac{W_{ps}}{\eta_{pump}}=13.6\text{kJ/kg}$

实际循环的净功：$W_{net,act}=W_{pa}+\Delta H_a=-816.1\text{kJ/kg}$

$$H_{1a}=\Delta W_{pa}+H_4=(13.6+289.3)\text{kJ/kg}=302.9\text{kJ/kg}$$

$$q_{in,act}=H_2-H_{1a}=(3437.7-302.9)\text{kJ/kg}=3134.81\text{kJ/kg}$$

因此，实际循环的效率：$\eta_{actual}=\dfrac{W_{net,act}}{q_{in,act}}=0.260$ 或 26%

两个效率的比较表明，两者的运行效率都相对较低，尽管实际循环要比理想朗肯循环（37.4%）的效率低很多。实际循环涉及在各个过程中的摩擦、压降和热损失，因此其热效率要低于那些理想循环。

7.8.7　布雷顿热机效率

布雷顿循环（Brayton cycle）是由乔治·布雷顿（George Brayton）在 19 世纪 70 年代左右首先提出的。用于燃气轮机的布雷顿循环运行在一个开口循环上，如图 7.7 所示。布雷顿热机包含三个主要组成部分：一个压缩机、一个燃烧室和一个汽轮机。空气在压缩机中压缩之后，再由空气中的燃料燃烧来加热。加热过的空气在汽轮机中膨胀并产生功率。燃气轮机的两种主要应用是喷气发动机和发电。喷气发动机从一个燃烧过程中吸入大量的热气，并将其注入一个喷管以便将飞机加速到较高速度（见图 7.8）。燃气轮机循环发动机使用一个连续燃烧系统，

在发动机的不同位置同时进行压缩、燃烧和膨胀[32]。燃烧发生在等压条件下。燃料必须可运输至燃烧室，而且燃料释放足够的燃烧热来产生必要的功率。

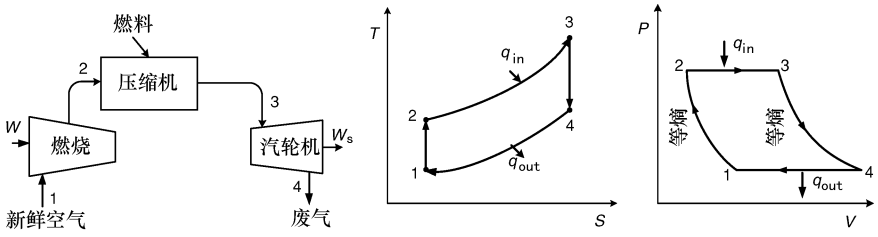


图 7.7　a）开口布雷顿循环示意图，b）理想布雷顿循环的 *TS* 图，其过程为等熵绝热压缩、等压加热、等熵绝热膨胀与等压热损失，c）理想布雷顿循环的 *PV* 图

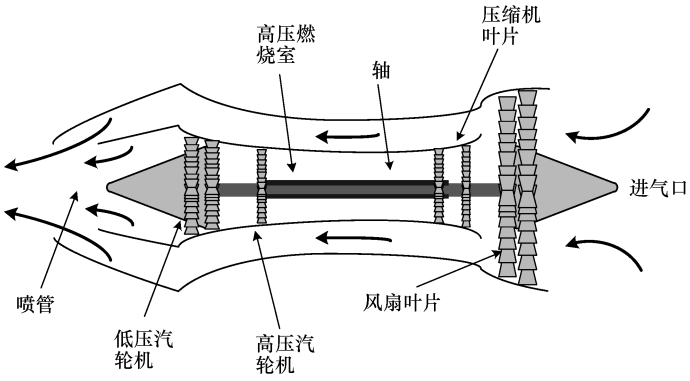


图 7.8　使用气体功率循环的喷气发动机示意图

燃气轮机发电厂的汽轮机产生的部分功率用来驱动压缩机。压缩机做功与汽轮机做功之比称为回功比。有时候，超过一半的汽轮机功可供压缩机使用[21]。

布雷顿循环是作为开口系统进行分析的。通过忽略动能和势能的变化，基于单位质量的能量平衡为

$$\Delta H = (q_{in} - q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) \tag{7.45}$$

假设热容量为恒定值，可以使用增加的热量 q_{in} 和排放的热量 q_{out} 来导出热效率：

$$\eta_{Brayton} = 1 - \left(\frac{q_{out}}{q_{in}}\right) = 1 - \left(\frac{C_{p,av}(T_4 - T_1)}{C_{p,av}(T_3 - T_2)}\right) \tag{7.46}$$

重新整理式（7.46）可以简化为

$$\eta_{Brayton} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_2}\right)\left(\frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1}\right) \tag{7.47}$$

图 7.7 显示过程 1-2 和 3-4 是等熵的，而且 $P_2 = P_3$，$P_4 = P_1$，由此，此前导出的等熵过程方程可以表示为

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \text{和} \left(\frac{T_3}{T_4}\right) = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

因此，热效率可以估算为

$$\eta_{\text{Brayton}} = 1 - \left(\frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}\right) \text{（对于恒定的热容量值）} \tag{7.48}$$

式中，r_p 为压缩比（P_2/P_1），而且 $\gamma = C_p/C_v$。式（7.48）表示布雷顿循环取决于燃气轮机的压强比以及工作流体的比热比。典型的值压强比在 5 ~ 20 变化[5]。如图 7.7 所示，产生的部分电力用于驱动压缩机。回功比 r_{bw} 表示产生的部分能量是转移到压缩机之中：

$$r_{bw} = \frac{W_{\text{comp,in}}}{W_{\text{turb,out}}} \tag{7.49}$$

例 7.13 给出了一个理想布雷顿循环的分析，其中热容量取决于温度，而例 7.14 则给出了一个实际布雷顿循环的分析。例 7.15 给出了一个定比热的理想布雷顿循环分析。

例 7.13　变比热条件下简单的理想布雷顿循环计算

一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_p = 9$。在压缩机入口处，新鲜空气的温度为 295K，而在压缩机出口（汽轮机入口）处为 1300K。假设使用标准空气，请确定该循环的热效率。

解：

假设循环处于稳态流动，而且动能和势能的变化可以忽略不计。空气的热容量取决于温度，气体为理想气体。

考虑图 7.7。

计算基础：1kg 空气。使用来自附录的数据：表 D1

过程 1-2 为等熵压缩

在 $T_1 = 295\text{K}$，$H_1 = 295.17\text{kJ/kg}$ 时（P_r 为式（7.36）中定义的相对压强）：

$$\frac{P_{r_2}}{P_{r_1}} = \frac{P_2}{P_1} = P_r \rightarrow P_{r_2} = (9)(1.3068) = 11.76$$

在压缩机出口 $P_{r_2} = 11.76$ 时，从表 D1 中查得近似值

$$T_2 = 550\text{K}，\quad H_2 = 555.74\text{kJ/kg}$$

过程 3-4 在汽轮机中的等熵膨胀如图 7.7 中的 *TS* 图所示。

$T_3 = 1300\text{K}$，$H_3 = 1395.97\text{kJ/kg}$；$P_{r_3} = 330.9$（根据表 D1 查得）

$$\frac{P_{r_4}}{P_{r_3}} = \frac{P_4}{P_3} \rightarrow P_{r_4} = \left(\frac{1}{9}\right)(330.9) = 36.76$$

在压缩机出口 $P_{r_4}=36.76$ 时，从表 D1 中查得近似值：

$$T_4=745\text{K},\quad H_4=761.87\text{kJ/kg}$$

压缩机的输入功为

$$W_{\text{comp,in}}=H_2-H_1=(555.74-295.17)\text{kJ/kg}=260.6\text{kJ/kg}$$

汽轮机的输出功：

$$W_{\text{turb,out}}=H_4-H_3=(761.87-1395.97)\text{kJ/kg}=-634.1\text{kJ/kg}$$

净功输出：$W_{\text{net}}=W_{\text{out}}-W_{\text{in}}=-(634.1-260.6)\text{kJ/kg}=-373.5\text{kJ/kg}$

回功比 r_{bw} 变为：$r_{\text{bw}}=\dfrac{W_{\text{comp,in}}}{W_{\text{turb,out}}}=\dfrac{260.6}{634.1}=0.41$ 或 41%

这表明 41% 的汽轮机输出已经用于压缩机。

增加的热量：$q_{\text{in}}=H_3-H_2=(1395.97-555.74)\text{kJ/kg}=840.23\text{kJ/kg}$

排放的热量：$q_{\text{out}}=H_1-H_4=(295.17-761.87)\text{kJ/kg}=-466.7\text{kJ/kg}$

热效率：$\eta_{\text{th}}=\dfrac{W_{\text{net}}}{q_{\text{in}}}=1-\dfrac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}}=0.444$ 或 44.4%

例 7.14　变比热条件下一个实际布雷顿循环的热效率

一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_{\text{p}}=9$。在压缩机入口处，新鲜空气的温度为 295K，在压缩机出口和汽轮机入口处为 1300K。假设在燃气轮机循环运行中，压缩机的效率为 85%，汽轮机的效率为 85%。请确定该循环的热效率。

解：

假设循环处于稳态流动，而且动能和势能的变化可以忽略不计。空气的热容量取决于温度，气体为理想气体。标准空气假设是适用的。

计算基础：1kg 空气。

在 $T_1=295\text{K}$，$H_1=295.17\text{kJ/kg}$ 时；$P_{r_1}=1.3068$；（见表 D1）P_{r} 为相对压强［式（7.36）］。

$$\frac{P_{r_2}}{P_{r_1}}=\frac{P_2}{P_1}=P_{\text{r}}\rightarrow P_{r_2}=(9)(1.3068)=11.76$$

从表 D1 中查得时，当 $P_{r_2}=11.76$ 时，压缩机出口的近似值：

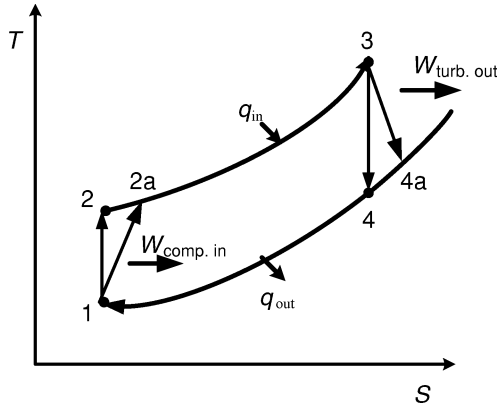
$$T_2=550\text{K},\quad H_2=555.74\text{kJ/kg}$$

过程 3-4 在汽轮机中的等熵膨胀如以上 *TS* 图所示

$T_3=1300\text{K}$，$H_3=1395.97\text{kJ/kg}$；$P_{r_3}=330.9$（根据表 D1 查得）

$$\frac{P_{r_4}}{P_{r_3}}=\frac{P_4}{P_3}\rightarrow P_{r_4}=\left(\frac{1}{9}\right)(330.9)=36.76$$

在压缩机出口 P 为 36.76 时，从表 D1 中查得近似值：



$$T_4 = 745\text{K},\quad H_4 = 761.87\text{kJ/kg}$$

压缩机的输入功为

$$W_{\text{comp,in}} = H_2 - H_1 = (555.74 - 295.17)\text{kJ/kg} = 260.57\text{kJ/kg}$$

汽轮机的输出功为

$$W_{\text{turb,out}} = H_4 - H_3 = (761.87 - 1395.97)\text{kJ/kg} = -634.10\text{kJ/kg}$$

根据压缩机和汽轮机的效率定义，可以得到

$$\eta_{\text{C}} = \frac{W_{\text{Cs}}}{W_{\text{Ca}}} \rightarrow W_{\text{Ca}} = \frac{W_{\text{Cs}}}{\eta_{\text{C}}} = \frac{260.6\text{kJ/kg}}{0.85}$$

$$= 306.6\text{kJ/kg}\ （实际的压缩功）$$

（其中，$W_{\text{comp,in}} = W_{\text{Cs}} = 260.6\text{kJ/kg}$，参见例 7.13）

汽轮机输出功效率的 85% 为

$$\eta_{\text{T}} = \frac{W_{\text{Ta}}}{W_{\text{Ts}}} \rightarrow W_{\text{Ta}} = \eta_{\text{T}}(W_{\text{Ts}}) = 0.85(634.1\text{kJ/kg}) = 539.0\text{kJ/kg}$$

（其中，在理想工况下，$W_{\text{turb,out}} = W_{\text{s}} - 634.1\text{kJ/kg}$，参见例 7.13）

净功输出：$W_{\text{net}} = W_{\text{out}} - W_{\text{in}} = -(539.0 - 306.6)\text{kJ/kg} = -232.4\text{kJ/kg}$

回功比 r_{bw} 变为 $r_{\text{bw}} = \dfrac{W_{\text{comp,in}}}{W_{\text{turb,out}}} = \dfrac{306.6}{539.0} = 0.568$

这表明压缩机现在消耗了汽轮机输出能量的 56.8%。

由于循环中的摩擦、热损失以及其他非理想条件，回功比的值从 41% 增长到 56.8%。

压缩机出口处的焓：

$$W_{\text{Ca}} = H_{2\text{a}} - H_1 \rightarrow H_{2\text{a}} = W_{\text{Ca}} + H_1 = (306.6 + 295.2)\text{kJ/kg} = 601.8\text{kJ/kg}$$

增加的热量：$q_{\text{in}} = H_3 - H_{2\text{a}} = (1395.97 - 601.8)\text{kJ/kg} = 794.2\text{kJ/kg}$

热效率：$\eta_{\text{th}} = \dfrac{W_{\text{net}}}{q_{\text{in}}} = \dfrac{232.4\text{kJ/kg}}{794.2\text{kJ/kg}} = 0.292$ 或 29.2%

实际的布雷顿气体循环热效率从 0.444 降至 0.292。压缩机和汽轮机的效率影响循环的性能。因此，为了实现更高的循环热效率，有必要对压缩机和汽轮机运行进行较大程度的改进。

	理　想	实　际
W_{net}/(kJ/kg)	373.5	232.4
W_C/(kJ/kg)	260.6	306.6
W_T/(kJ/kg)	634.1	539.0
q_{in}/(kJ/kg)	840.2	794.2
q_{out}/(kJ/kg)	466.7	561.8
η_{th} (%)	44.4	29.2

例 7.15　定比热条件下的理想布雷顿循环

一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_p = 9$。在压缩机入口处的气温为 300K，在压缩机出口处为 1200K。假设使用标准空气，$\gamma = 1.4$，请确定该循环的热效率。

解：

假设循环处于稳态流动，而且动能和势能的变化可以忽略不计。比热容恒定不变，而且气体视作理想气体。

考虑图 7.7。

计算基础：1kg 空气，$\gamma = 1.4$。

使用来自附录的数据：表 D1

过程 1-2 为等熵压缩

$T_1 = 300\text{K}$，$H_1 = 300.2\text{kJ/kg}$；

根据式（7.34）：$\dfrac{T_2}{T_1} = \left(\dfrac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \rightarrow T_2 = 300(9)^{0.4/1.4} = 562\text{K}$

过程 3-4 在汽轮机中的等熵膨胀如以上 *TS* 图所示：

$$T_3 = 1200\text{K} \text{ 和} \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \rightarrow T_4 = 1200\left(\frac{1}{9}\right)^{0.4/1.4} \rightarrow T_4 = 640.5\text{K}$$

根据式（7.46）：$\eta_{th} = 1 - \dfrac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \dfrac{C_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)_4}$

$$= 1 - \frac{640.5 - 300}{1200 - 562} = 0.466 \text{ 或 } 46.6\%$$

根据式（7.48）：$\eta_{\text{Brayton}} = 1 - \left(\dfrac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}\right) = 0.463 \text{ 或 } 46.3\%$

效率计算的结果互相接近；对于定热容量，很容易通过式（7.48）使用压缩比 r_p 来直接估算效率。

7.8.8　奥托热机效率

奥托循环（Otto cycle）是以尼古拉斯 A. 奥托（Nikolaus A. Otto）而命名的，奥托于 1876 年在德国加工出了一个四冲程发动机。奥托循环描述了一个典型的点燃式往复活塞发动机理想循环的功能。这种循环常见于使用化学燃料和空气中氧气的汽车内燃机。燃烧过程在甚高温条件下产生热量、蒸汽、二氧化碳与其他化学物。柴油燃料、汽油和石油气等石油馏分是最常见的燃料。生物乙醇、生物柴油与氢气也可以被用作改进的发动机的燃料。

内燃机需要对压缩空气-燃料混合物进行点燃或压燃[5,15]。汽油发动机吸入一种空气和汽油的混合物，并将其压缩至 12.8bar（1.28MPa）左右，然后使用一个高压电火花来点燃混合物。柴油发动机的压缩水平通常是汽油发动机的两倍或以上。柴油发动机仅吸入空气，而且在峰值压缩之前的很短时间内，少量柴油燃料通过一个燃料喷嘴喷入气缸，从而实现燃料的立即点燃。大多数柴油发动机还配有一个电池和充电系统。柴油发动机通常比汽油发动机更重、噪声更大、动力更强。在大多数情况下它们的燃油消耗也更低，而且多用于重载车辆、某些汽车、轮船、铁路机车以及轻型飞行器等。

图 7.9 所示为奥托热机循环的 *PV* 图和 *TS* 图。理想循环过程如下：

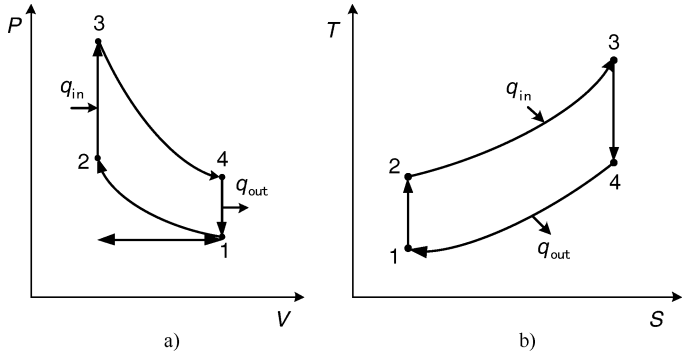


图 7.9　奥托循环热力图

a）奥托循环的 *PV* 图　b）奥托循环的 *TS* 图

- 过程 1-2 是空气等熵压缩，活塞从下止点运动至上止点（吸气冲程）。
- 过程 2-3 是从外源向空气等容传递量，此时活塞处于上止点。这个过程实现了燃料-空气混合物的点火（压缩冲程）。
- 过程 3-4 是等熵膨胀（做功冲程）。

• 过程 4-1 通过等容过程完成循环，其中，排放空气热量，此时活塞处于下止点（排气冲程）。

在使用四冲程奥托循环时，技术上有两个额外的过程，如图 7.9a 所示：一个是废热和燃烧产物的排放（通过等压压缩）；另一个是富氧冷空气的吸入（通过等压膨胀）。不过，这些问题通常会在简化分析中省略。过程 1-2 和过程 3-4 对系统做功，但是在绝热膨胀和压缩期间无热传递发生。过程 2-3 和过程 4-1 是等容的（体积恒定），因此，会发生热传递但不做功，因为活塞容积并无变化。

图 7.9b 中奥托循环的理想化 *PV* 图显示了输入的燃烧热 q_{in} 和废物排放输出 q_{out}。顶部曲线为做功冲程，而底部曲线则为压缩冲程。

将奥托循环作为一种封闭系统来分析。基于单位质量的能量平衡为

$$\Delta U = (q_{in} - q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) \tag{7.50}$$

假设热容量为恒定值，可以使用增加的热量 q_{in} 和排放的热量 q_{out} 来导出热效率：

$$\eta_{Otto} = 1 - \left(\frac{q_{out}}{q_{in}}\right) = 1 - \left(\frac{C_{v,av}\ (T_4 - T_1)}{C_{v,av}\ (T_3 - T_2)}\right) \tag{7.51}$$

在一个理想的奥托循环中，在过程 1-2 和过程 3-4 期间无热传递发生，因为它们是可逆绝热过程。只有在等容过程 2-3 期间提供热量，而且仅在等容过程 4-1 期间排放热量。

重新整理：

$$\eta_{Otto} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_2}\right)\left(\frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1}\right) \tag{7.52}$$

因为 $T_4/T_1 = T_3/T_2$（见图 7.8），式（7.52）简化为

$$\eta_{Otto} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_2}\right) \tag{7.53}$$

根据理想气体的等熵方程，可以得到

$$C_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = 0 \tag{7.54}$$

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{(\gamma-1)} = r^{(\gamma-1)} \tag{7.55}$$

其中，r 为压缩比（V_1/V_2），而且对于理想气体，$\gamma = C_p/C_v$，$R = C_p - C_v$。那么，热效率可以被表示为

$$\eta_{Otto} = 1 - \left(\frac{1}{r^{(\gamma-1)}}\right)\text{（恒定比热）} \tag{7.56}$$

空气-燃料混合物比热 γ 在某种程度上随燃料变化，但它通常接近于空气的比热值 1.4，而当使用这种近似时，该循环称为一个空气标准循环。不过，燃料/

空气混合物燃烧产物的实际值 γ 接近于 1.3。

式（7.56）表明奥托循环取决于压缩比 $r = V_1/V_2$。压缩比越高，效率就越高，而且气缸中的温度也越较高。不过对于典型的汽车来说，最大压缩比被限制为 10:1 左右。通常情况下，这样并不会提高太多，因为它存在自动点火的可能性，当压缩的燃料/空气混合物的温度变得太高时，会在被火焰锋点燃之前发生自动点火，从而导致发动机爆震现象的出现。例 7.16 给出了一个热容量依赖于温度的理想奥托热机的分析，而例 7.17 则给出了恒定热容量时的情况。

例 7.16　变比热理想奥托热机的效率计算

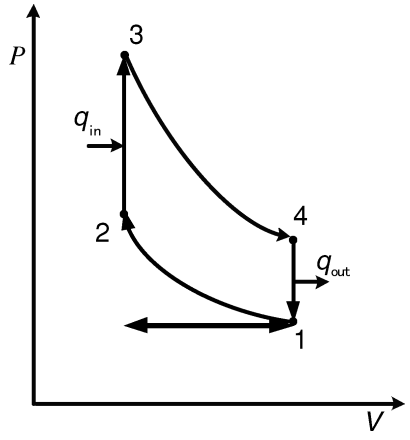
一个理想奥托循环工作的压缩比（$r = V_{max}/V_{min}$）为 8.8。开始压缩（状态 1）时空气的状态为 101.3kPa 和 280K。在等容加热过程期间，从温度为 1900K 的热源向空气传递的热量为 1000kJ/kg。放热的外界环境温度为 280K。请确定其能量转换的热效率。

解：

假设外界环境温度为 280K，而且动能和势能的变化可以忽略不计。比热取决于温度。

空气的热容量取决于温度，气体为理想气体。下面的 *PV* 图所示为循环及其四个过程。

循环中的各个过程如下：



- 过程 1-2 等熵压缩；
- 过程 2-3 等容热传递；
- 过程 3-4 等熵膨胀；
- 过程 4-1 等容热释放。

计算基础：1kg 空气。使用来自附录的数据：

$$q_{\text{in}} = 1000\text{kJ/kg}$$

根据表 D1，在 $T = 280\text{K}$ 时，$U_1 = 199.75\text{kJ/kg}$；$V_{r_1} = 783.0$［V_r 为式（7.38）中定义的相对比容］

$$\frac{V_{r_2}}{V_{r_1}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{8.8} \rightarrow V_{r_2} = \frac{V_{r_1}}{r} = \frac{783}{8.8} = 88.97$$

在 $V_{r_2} = 88.97$ 时，根据表 D1 可查得空气性质：$U_2 = 465.5\text{kJ/kg}$，$T_2 = 640\text{K}$

根据空气的等熵压缩，可以估算出：

$$P_2 = P_1\left(\frac{T_2}{T_1}\right)\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = 101.3\left(\frac{640}{280}\right)8.8 = 2037\text{kPa}\text{（理想气体方程）}$$

过程 2-3 传递的热量为

$$q_{\text{in}} = 1000\text{kJ/kg} = U_3 - U_2 \rightarrow U_3 = 1465.5\text{kJ/kg}$$

在 $U_3 = 1465.5\text{kJ/kg}$ 时，使用数据以下插值估算 T_3 和 V_{r_3}：

T/K	U/(kJ/kg)	V_r
1750	1439.8	4.328
1800	1487.2	3.994
1777	1465.5	4.147

在 $T_3 = 1777\text{K}$ 时，$V_{r_3} = 4.147$

同上，估算状态 3 时的压强：

$$P_3 = P_2\left(\frac{T_3}{T_2}\right)\left(\frac{V_2}{V_3}\right) = 2037\left(\frac{1777}{640}\right)\ (1) = 5656\text{kPa}$$

在状态 4 时的空气内能为

$$\left(\frac{V_{r_4}}{V_{r_3}}\right) = \left(\frac{V_4}{V_3}\right) = 8.8 \rightarrow V_{r_4} = (8.8)(4.147) = 36.5$$

在 $V_{r_4} = 36.5$ 时，从表 D1 中查得近似值：$U_4 = 658\text{kJ/kg}$，$T_4 = 880\text{K}$

过程 4-1 为恒定热排放。估算释放的热量 q_{out}：

$$q_{\text{out}} = U_1 - U_4 \rightarrow q_{\text{out}} = -458.2\text{kJ/kg}$$

$$P_4 = P_3\left(\frac{T_4}{T_3}\right)\left(\frac{V_3}{V_4}\right) = 5656\left(\frac{880}{1777}\right)\left(\frac{1}{8.8}\right) = 318.3\text{kPa}$$

净热传递等于净输出功：

$$W_{\text{net}} = q_{\text{in}} - q_{\text{out}} = (1000 - 458.2)\text{kJ/kg} = 541.8\text{kJ/kg}$$

因此，热效率为：$\eta_{\text{th}} = \dfrac{W_{\text{net}}}{q_{\text{in}}} = 0.542$ 或 54.2%

尽管所有的过程都是本质可逆的，但是热传递和热释放发生在有限的温差

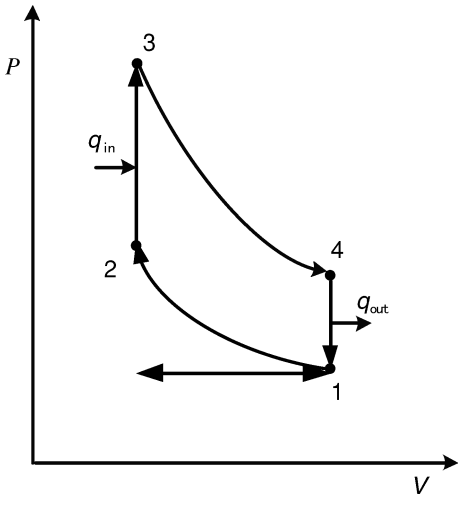
下，而且是不可逆的。

例 7.17　定比热的理想奥托循环的效率计算

一个理想奥托循环工作的压缩比（$r = V_{max}/V_{min}$）为 8。开始压缩（状态 1）时空气的状态为 101.3kPa 和 300K。在等容加热过程期间，从温度为 1900K 的热源向空气传递的热量为 730kJ/kg。放热的外界环境温度为 300K。请确定其能量转换的热效率。平均比热：$C_{p,av} = 1.00\text{kJ/kg K}$，$C_{v,av} = 0.717\text{kJ/kg K}$。

解：

假设：空气标准假设是适用的。动能和势能的变化可以忽略不计。比热为恒定值。



下面的 *PV* 图所示为该奥托循环及其四个状态：

循环中的各个过程如下：

- 过程 1-2 等熵压缩；
- 过程 2-3 等容热传递；
- 过程 3-4 等熵膨胀；
- 过程 4-1 等容热释放。

计算基础：1kg 空气。

$$q_{in} = 730\text{kJ/kg}$$

使用来自表 D1 的数据：$T_o = 300\text{K}$ 时，$U_1 = 214.1\text{kJ/kg}$。

平均比热为

$C_{p,av} = 1.0\text{kJ/kg K}$，$C_{p,av} = 0.717\text{kJ/kg K}$，$\gamma = 1/0.717 = 1.4$。

根据式（7.34）：

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{(\gamma-1)} \rightarrow T_2 = \frac{V_1}{V_2}T_1 = 8(300\text{K})^{0.4} = 689\text{K}$$

根据在过程 2-3 中等容条件下的热量传递，估算 T_3：

$$q_{in} = U_3 - U_2 = C_{v,av}\ (T_3 - T_2) \rightarrow T_3 = 1703\text{K}$$

过程 3-4 为等熵膨胀：

$$T_4 = T_3\left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{(\gamma-1)} = 1703.0\left(\frac{1}{8}\right)^{0.4} = 741.3\text{K}$$

过程 4-1：$q_{out} = U_4 - U_1 = C_{v,av}(T_4 - T_1) = 316.4\text{kJ/kg}$，$q_{in} = 730\text{kJ/kg}$

净热传递等于净输出功：

$$W_{net} = q_{in} - q_{out} = (730.0 - 316.4)\text{kJ/kg} = 413.6\text{kJ/kg}$$

根据式（7.56），因此热效率为

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \left(\frac{1}{r^{(\gamma-1)}}\right) = 0.564 \text{ 或 } 56.4\%$$

7.8.9　狄塞尔热机效率

图 7.10 所示为一个理想的狄塞尔循环（Diesel cycle）的 *PV* 图和 *TS* 图。压燃式发动机是由鲁道夫·狄塞尔（Rudolph Diesel）于 1890 年首先提出的。大多数卡车和汽车用狄塞尔发动机使用与点燃式汽油发动机类似的循环，但是它使用的是压缩加热点火系统，而不需要独立的点火系统。在燃烧点燃式发动机中，气体被压缩至温度高于燃料的自燃温度。因此，当燃料在等压条件下被注入热空气时，开始燃烧过程。这种变化称为狄塞尔循环。

以封闭系统的活塞-气缸系统来分析狄塞尔循环。在等压条件下传递给单位质量的工作流体空气的热量为

$$q_{\text{in}} = P_2(V_3 - V_2) + (U_3 - U_2) = H_3 - H_2 = C_{\text{p,av}}(T_3 - T_2) \tag{7.57}$$

在等容条件下排放的热量为

$$q_{\text{out}} = U_1 - U_4 = C_{\text{v,av}}(T_1 - T_4) \tag{7.58}$$

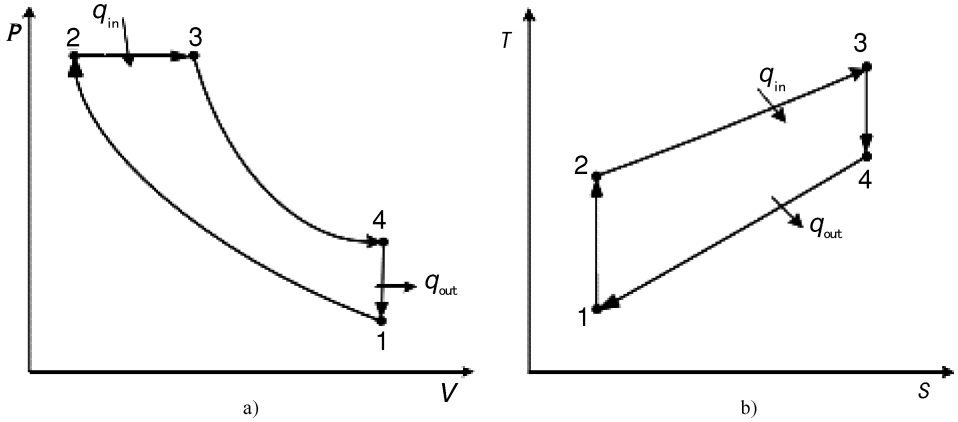


图 7.10 理想狄塞尔循环（循环沿 1-4 的顺时针方向）

a）*PV* 图　b）*TS* 图

另外，可以使用增加的热量 q_{in} 和排放的热量 q_{out} 来导出热效率：

$$\eta_{\text{Diesel}} = 1 - \left(\frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}}\right) = 1 - \left(\frac{(T_4 - T_1)}{\gamma(T_3 - T_2)}\right) = 1 - \left(\frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{\gamma T_2(T_3/T_2 - 1)}\right) \tag{7.59}$$

式中，$\gamma = C_{\text{p}}/C_{\text{v}}$。

在一个理想的狄塞尔循环中，定压预胀比 r_{c} 定义为燃烧后和燃烧前的容积之比：

$$r_{\text{c}} = \frac{V_3}{V_2} \tag{7.60}$$

使用 r_c 和压缩比 $r = V_1/V_2$，根据式（7.33）中给出的等熵理想气体关系，能量转换的热效率变为

$$\eta_{\text{Diesel}} = 1 - \frac{1}{r^{(\gamma-1)}}\left(\frac{r_c^{\gamma}-1}{\gamma(r_c-1)}\right)\text{（恒定比热）} \tag{7.61}$$

式（7.61）表明随着定压预胀比 r_c 的下降，狄塞尔循环的效率提高了。对于极限比 $r_c = 1$，式（7.61）括号中的值变为统一，奥托循环和狄塞尔循环的效率也变得相同。大型狄塞尔热机的热效率范围可以为 35% ~40%[5,15]。例 7.18 给出了定热容量狄塞尔热机的分析，而例 7.19 则给出了热容量依赖于温度的狄塞尔热机分析实例。

例 7.18　定比热的理想狄塞尔热机的热效率

一个理想狄塞尔循环空气压缩比为 20，截止率为 2。在开始压缩时，流体的压强、温度和容积分别为 14.7psia、70°F 和 120in^3。在室温下，空气的平均比热为 $C_{p,av} = 0.24\text{Btu/lb°R}$ 和 $C_{v,av} = 0.171\text{Btu/lb°R}$。请根据冷空气标准假设来估算其热效率。

解：

假设：冷空气标准假设是适用的。空气为理想气体。动能和势能的变化可以忽略不计。

考虑图 7.10。

$P_1 = 14.7\text{psia}$，$T_1 = 70°F$，$V_1 = 120\text{in}^3$，$C_{p,av} = 0.24\text{Btu/lb°R}$，$C_{v,av} = 0.171\text{Btu/lb°R}$，$R = 10.73\text{psiaft}^3\text{/lb mol°R}$，$\text{MW} = 29\text{lb/lb mol}$，$\gamma = C_{p,av}/C_{v,av} = 1.4$，$r = 20$，$r_c = 2$。

空气质量：$m_{\text{air}} = \text{MW}\dfrac{PV}{RT} = 0.0052\text{lb}$

每个过程的容积为

$$V_1 = V_4 = 120\text{in}^3$$
$$V_2 = V_1/r = 6\text{in}^3$$
$$V_3 = V_2/r_c = 12\text{in}^3$$

过程 1-2：等熵压缩：

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{(\gamma-1)} \rightarrow T_2 = 1756.6°\text{R}\ \text{（方程 7.34）}$$

过程 2-3：理想气体在等压条件下增加的热量为

$$\left(\frac{T_3}{T_2}\right) = \left(\frac{V_3}{V_2}\right) \rightarrow T_3 = 3513°\text{R}$$

$$q_{\text{in}} = m(H_3 - H_2) = mC_{p,av}(T_3 - T_2) = 2.19\text{Btu}$$

过程 3-4：等熵膨胀：$\left(\dfrac{T_1}{T_3}\right) = \left(\dfrac{V_1}{V_4}\right)^{(\gamma-1)} \rightarrow T_4 = 1398°\text{R}$

过程 4-1：理想气体在等容条件下的热损失 $q_{out} = m(H_1 - H_4) = mC_{v,av}(T_4 - T_1) = 0.772\text{Btu}$

净输出功等于输入的热量（q_{in}）和排出的废热（q_{out}）之差。

$$W_{out} = q_{in} - q_{out} = (2.19 - 0.772)\text{Btu} = 1.418\text{Btu}$$

热效率：$\eta_{th} = \dfrac{W_{net}}{q_{in}} = 0.647$ 或 64.7%

也可以根据式（7.61）来估算热效率：

$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{(\gamma-1)}}\left(\frac{r_c^{\gamma} - 1}{\gamma(r_c - 1)}\right) = 0.647 \text{ 或 } 64.7\%\, T$$

例 7.19　变比热的理想狄塞尔热机的热效率

一个理想狄塞尔循环空气压缩比为 18，截止率为 2。在开始压缩时，流体压强与温度分别为 100kPa、300K。请利用冷空气标准假设，确定其热效率。

解：

假设：冷空气标准假设是适用的。空气为理想气体。动能和势能的变化可以忽略不计。比热取决于温度。

考虑图 7.10。

$P_1 = 100\text{kPa}$，$T_1 = 300\text{K}$，$r = V_1/V_2 = 18$，$r_c = V_3/V_2 = 2$。

在 300K 时，$U_1 = 214.1\text{kJ/kg}$，$V_{r_1} = 621.2$

（V_r 为相对比容）（见表 D1）

根据式（7.38）：

$$\frac{V_{r2}}{V_{r1}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{18} \rightarrow V_{r2} = \frac{V_{r1}}{r} = \frac{621.2}{18} = 34.5$$

在 $V_{r_2} = 34.5$ 时，近似值为

$H_2 = 932.9\text{kJ/(kg K)}$，$T_2 = 900\text{K}$（见表 D1）

过程 2-3 中在等压条件下传递的热量：

$$\frac{V_3}{T_3} = \frac{V_2}{T_2} = \rightarrow T_3 = \frac{V_3}{V_2}T_2 = 2T_2 = 1800\text{K}$$

$$H_3 = 2003.3\text{kJ/kg}，\ V_{r_3} = 4.0\ （\text{见表 D1}）$$

$$q_{in} = H_3 - H_2 = 1070.4\text{kJ/kg}$$

过程 3-4：接下来，需要估算空气在状态 4 时的内能：

$$\left(\frac{V_{r4}}{V_{r3}}\right) = \left(\frac{V_4}{V_3}\right) = \left(\frac{V_4}{2V_2}\right) = \left(\frac{18}{2}\right) \rightarrow V_{r_4} = (9)(4.0) = 36$$

在 $V_{r_4} = 36$ 时，$U_4 = 659.7\text{kJ/kg}$（见表 D1）

过程 4-1 是在等容条件下排放的热量。估算排放的热量 q_{out}：

$$q_{out} = U_4 - U_1 = (659.7 - 214.1)\text{kJ/kg} = 445.6\text{kJ/kg}$$

净热传递等于净输出功：

$$W_{net} = q_{in} - q_{out} = (1070.4 - 445.6)\text{kJ/kg} = 624.8\text{kJ/kg}$$

因此，热效率为 $\eta_{th} = \dfrac{W_{net}}{q_{in}} = 0.583$ 或 58.3%

7.8.10　埃里克森热机和斯特灵热机的效率

由于埃里克森热机是由外部供热，所以它是一个“外燃机”。一个理想的埃里克森循环的四个过程如下：

- 过程 1-2：等温压缩。压缩空气在等压条件下流入储存容器。
- 过程 2-3：等压加热。压缩空气流过回热器，并吸收热量。
- 过程 3-4：等温膨胀。气缸膨胀空间进行外部加热，同时气体经历等温膨胀。
- 过程 4-1：等压放热。在气体被作为废气排放之前，通过回热器回传，由此，将低压等压气体冷却，同时对回热器加热，用于下一次循环。

斯特灵热机的工作原理是：通过空气或其他气体在不同的温度水平下的循环压缩和膨胀，将热气的热量转换为机械功。与蒸汽机相比，斯特灵热机效率较高，而且能够使用几乎任何热源[14,15,29]。总体上，斯特灵循环有四个可逆过程：

- 过程 1-2：在等温条件下通过外部热源加热。
- 过程 2-3：在等容条件下实现从工作流体向回热器的内部热传递。
- 过程 3-4：在等温条件下放热。
- 过程 4-1：在等容条件下实现从回热器到工作流体的内部热传递。

在过程 1-2 中温度为 T_H 的加热和过程 3-4 中温度为 T_C 的放热均为等温过程。对于可逆等温过程，热传递可以估算为

$$q = T\Delta S \tag{7.62}$$

理想气体在等温条件下的熵变为

$$\Delta S_{1-2} = -R\ln\frac{P_2}{P_1} \tag{7.63}$$

使用式（7.62）与式（7.63），热量输入和输出可以估算为

$$q_{in} = T_H(S_2 - S_1) = T_H\left(-R\ln\frac{P_2}{P_1}\right) = RT_H\ln\frac{P_1}{P_2} \tag{7.64}$$

$$q_{out} = T_C(S_4 - S_3) = T_C\left(-R\ln\frac{P_4}{P_3}\right) = RT_C\ln\frac{P_3}{P_4} \tag{7.65}$$

埃里克森循环的热效率变为

$$\eta_{\text{Ericsson}} = 1 - \frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}} = 1 - \frac{RT_{\text{C}}\ln(P_4/P_3)}{RT_{\text{H}}\ln(P_1/P_2)} = 1 - \frac{T_{\text{C}}}{T_{\text{H}}} \tag{7.66}$$

因为 $P_1 = P_4$ 而且 $P_3 = P_2$。

理想的埃里克森循环和斯特灵循环都是外燃机。作为卡诺循环，这两个循环总体上都是可逆的，而且当使用理想气体作为工作流体时，两者在相同的温度极限之间具有相同的热效率：

$$\eta_{\text{Ericsson}} = \eta_{\text{Stirling}} = \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{\text{C}}}{T_{\text{H}}} \tag{7.67}$$

这两个循环都利用回热器来改进效率。在压缩机和膨胀机之间，热量在循环的某一阶段被传递给一个称为回热器的热能储存装置，而在循环的另一阶段又被传回给工作流体。式（7.67）对于发动机的封闭循环和稳态流动循环都是有效的。

7.8.11　阿特金森热机效率

阿特金森热机（Atkinson engine）是一种内燃机，用于一些现代的混合电应用系统。图 7.11 所示为阿特金森热机的循环过程。在该热力发动机中，膨胀比可以不同于压缩比，而且该发动机能够达到比传统的活塞发动机更高的热效率[15]。膨胀率可以根据活塞位于下止点和上止点时的燃烧室容积之比来获得。

理想的阿特金森循环包含下列工作过程：

- 过程 1-2 等熵或可逆绝热压缩；
- 过程 2-3 等容加热；
- 过程 3-4 等压加热；
- 过程 4-5 等熵膨胀；
- 过程 5-6 等容冷却；
- 过程 6-1 等压冷却。

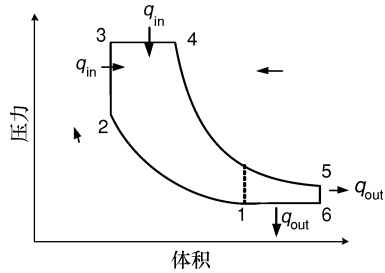


图 7.11　理想的阿特金森（Atkinson）气体循环

在阿特金森循环中，进气阀允许反向进气。现代的阿特金森循环的目标是实现：在做功冲程的末端，燃烧室的压力等于大气压。如果实现了这个目标，来自燃烧过程的所有有效能那就都被全部利用了。对于任何给定的空气部分，膨胀比越大，从热量转换为有用的机械能的能量就越多，进而发动机的效率也就更高。四冲程阿特金森循环的缺点是，因为一小部分的压缩冲程用于压缩吸入的空气，从而降低了功率输出。阿特金森循环带有一个称为米勒热机（Miller engine）的增压器来补偿功率密度的损失[15,29]。阿特金森热机的功率能够通过一个电动机来补充，从而奠定了基于阿特金森循环的混合动力传动的基础。

7.9　热机的效率改进

以下是提高热机效率的可选措施[4,10,13,21]：

- 现代的联合循环燃气轮机使用提高热侧温度的方法。设备材料的熔点和有关 NO_x 排放的环境关注限制了热机的最高温度。
- 通过使用混合化学工作流体（比如，将氨和水以 70∶30 混合作为工作流体）来降低输出温度，这样也可以提高效率。这种混合物允许循环以非常低的温度来产生有用功率。
- 使用超临界流体，比如使用 CO_2 作为工作流体，可以提高效率。
- 利用工作流体的化学性质，比如二氧化氮（NO_2），它有一个自然二聚物四氧化二氮（N_2O_4）。在低温时压缩 N_2O_4，然后再将其加热。温度的升高会导致每个 N_2O_4 分解为两个 NO_2 分子。这样就减小了工作流体的分子量，从而大大地提高了循环的效率。一旦 NO_2 通过汽轮机实现膨胀，它被冷却并重新组合为 N_2O_4，然后，再被送回压缩机中开始另一个循环。
- 氢气等新燃料可能会对发动机的性能产生积极的影响，因为氢气的能量密度远远高于电池的能量密度。

7.10　水电

水电是利用水位下降的重力或水的流动来发电。图 7.12 所示为一个传统的水电站大坝示意图，其中，水电能是来自驱动水轮机和发电机的库坝蓄水的势能。从水中提取的能量取决于体积以及水源与出水口之间的高度差。这种高度差称为水头。水的势能与水头成正比。一个称为压力管道的大管道将水输送给水轮机。例 7.20 给出了一个水轮机的效率计算。

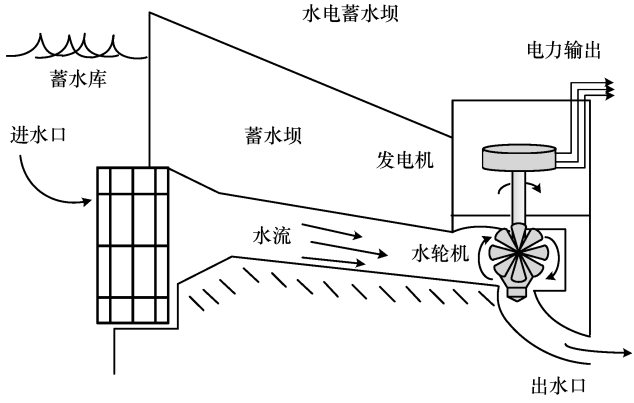


图 7.12　一个传统水电站大坝的横截面

抽水蓄能方法通过水在不同高度的蓄水库之间的运动来发电，以满足高峰用电需求。在用电需求低谷，使用过剩的发电容量将水泵到较高的蓄水库中。当用电需求较高时，再通过水轮机将水泄入较低的蓄水库中。与风电场相比，水电站的负载因子更容易预测。如果某工程项目有一个蓄水库，它就能够在需要的时候发电。水电站易于调节以满足功率需求的变化[12]。满足额外的高峰用电需求的一种方法是，在需要时或者电的成本较低时，将一部分水从水源（比如一个湖泊）抽到较高的水电站蓄水库中。例 7.21 给出了一个水电站中的抽水能量。

例 7.20　水轮机的效率

将一个水轮机安装在一个大型湖泊附近用来发电。湖水平均深 45m。水的质量流量为 600kg/s。发电量为 220kW。发电机效率为 95%。请确定水轮发电机的总机械效率以及从水轮机传递给发电机的轴功。

解：

假设：水轮机出水口处水的机械能很小而且可以忽略不计。

水的密度为 1000kg/m^3。

$\dot{m}=600\text{kg/s}$，$\eta_{\text{gen}}=0.95$

$\dot{W}_{\text{out}}=220\text{kW}$

$\dot{W}_{\text{fluid}}=\dot{m}gz=(600\text{kg/s})(9.81\text{m/s}^2)(45\text{m})(\text{kJ/kg}=1000\text{m}^2/\text{s}^2)=264.9\text{kW}$

水轮发电机的总机械效率为

$$\eta_{\text{overall}}=\eta_{\text{turb}}\eta_{\text{gen}}=\frac{\text{能量输出}}{\text{能量输入}}=\frac{220\text{kW}}{264.9\text{kW}}=0.83$$

$\eta_{\text{gen}}=0.95$

$$\eta_{\text{overall}}=\eta_{\text{turb}}\eta_{\text{gen}}=0.83\rightarrow\eta_{\text{turb}}=\frac{\eta_{\text{overall}}}{\eta_{\text{gen}}}=0.87$$

$\dot{W}_{\text{turb}}=\eta_{\text{turb}}\dot{W}_{\text{fluid}}=0.87\ (264.9\text{kW})=230.5\text{kW}$

从水轮机传递来的轴功为

$$\dot{W}_{\text{turb}}=\eta_{\text{turb}}\dot{W}_{\text{fluid}}=0.87\ (264.9\text{kW})=230.5\text{kW}$$

湖泊给水轮机提供了 264.9kW 的机械能。它所提供的能量只有 87% 被转换为轴功。该轴功驱动发电机产生 220kW 的电力。

例 7.21　一个水电站中的抽水能量

假设一个水电站蓄水库的蓄水容量为 $1\times10^6\text{kWh}$。这些能量被储存于地平面以上 60m 的高度处。请估算被泵回蓄水库的最小水量。

解：

假设水的蒸发可以忽略不计。

$$PE = 1 \times 10^6 \text{kWh},\ \Delta z = 60\text{m},\ g = 9.8\text{m/s}^2$$

水的潜在势能功：$PE = mg\Delta z$

水量：

$$m = \frac{PE}{g\Delta z} = \frac{1 \times 10^6 \text{kWh}}{9.8\text{m/s}^2\ (60\text{m})}\left(\frac{3600\text{s}}{\text{h}}\right)\left(\frac{1000\text{m}^2/\text{s}^2}{1\text{kJ/kg}}\right) = 6.122 \times 10^9 \text{kg}$$

7.11　风电

一个风力发电机组的发电量与它所获取的风的动能成正比，并且可以估算为

$$\dot{W}_{\text{wind}} = \eta_{\text{wind}}\rho\frac{\pi v^3 D^2}{8} \tag{7.68}$$

式中，ρ 为空气的密度；v 为空气的流速；D 为风力发电机组的叶片直径；η_{wind} 为风力发电机组的效率。

因此，风力发电机组的发电量与风速的三次方和叶片翼展直径的二次方成正比。风的强度在不断变化，而且仅靠给定位置的强度平均值并不能表示该位置的风力发电机组所能产生的能量值[24]。例 7.22 给出了一个风力发电机组的效率计算。

例 7.22　风力发电机组的效率

一个风力发电机，叶片直径为 25ft，出力为 0.5kW。在风力发电机组所处的位置，风速为 11mile/h。请确定该风力发电机组的效率。

解：

假设：风的流动是稳定的。风的流动是一维的，而且是不可压缩的。

摩擦影响可以忽略不计。

$$\rho_{\text{air}} = 0.076\text{lb/ft}^3,\ D = 25\text{ft}$$

实际的发电量 $= 0.5\text{kW}$

动能可以被完全转换为功。

风的潜在能量是它的动能。

平均风速为　$v_1 = (11\text{mile/h})\left(\frac{1.4667\text{ft/s}}{1\text{mile/h}}\right) = 16.13\text{ft/s}$

空气的质量流量为　$\dot{m} = \rho v_1 A = \rho v_1\frac{\pi D^2}{4} = 601.4\text{lb/s}$

$$\dot{W}_{\max} = \dot{m}\frac{v_1^2}{2g_c} = (601.4\text{lb/s})\ \frac{(16.13\text{ft/s})^2}{2}\left(\frac{1\text{lb}_\text{f}}{32.2\text{lb}_\text{m}\text{fts}^2}\right)\left(\frac{1\text{kW}}{737.56\text{lb}_\text{f}\text{ft/s}}\right) = 3.29\text{kW}$$

这是风力发电机组的可用能量。风力发电机的效率为

$$\eta_{\text{wind turb}} = \frac{\dot{W}_{\text{act}}}{\dot{W}_{\max}} = \frac{0.5\text{kW}}{3.29\text{kW}} = 0.152 \text{ 或 } 15.2\%$$

只有 15.2% 的流入动能被转换为电力，其余部分以流出动能的形式流出风力发电机组。

7.12　地热发电

地热发电是指将地热能转化为电能。使用的技术包括干蒸汽发电站、闪蒸发电站与双循环发电站等。地热发电站被认为是可持续的，因为提取的热量与地球的热含量相比非常小。对地热发电潜能的估计从 35GW 到 2000GW 不等。目前，世界范围的地热发电装机容量约为 11GW。

直到最近，地热发电站也只是建在接近地表的高温可用地热资源附近。双循环发电站的发展以及钻探和提取技术的改进可以促进在更大的地理范围内利用地热系统[8]。

地热发电站的热效率很低，为 10% ~23%，因为地热流体的温度要远低于来自锅炉的蒸汽温度。这种低温限制了热机在发电时获取有用能的效率。排出的热量被浪费掉了，除非它能够被直接使用，例如，用于温室、木材厂和区域供热等。为了产生比泵所消耗的更多的能量，发电需要高温地热田和专业的热循环。

7.13　海洋热能转换

海洋热能转换使用较冷的深水和较温的浅水或海洋表面水之间的温差来驱动热机，并产生有用功（通常是电力形式，见图 7.13）。抽取海洋表面的温海水，

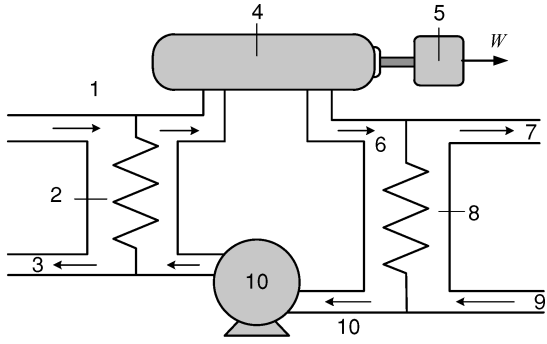


图 7.13　一个封闭循环海洋热能转换（OTEC）电站示意图

令其通过一个热交换器来蒸发流体。膨胀的蒸汽推动汽轮发电机转动。通过二级热交换器抽取冷水，将该蒸汽冷凝为液体，该液体再通过系统实现再循环。在回归线附近的热带区域，表面和深水之间的温差适中，为 20 ~ 25 °C。海洋热能转换系统依然被认为是一种新兴技术，它的热效率为 1% ~ 3%，这要远远低于该温差在理论上能实现的 6% ~ 7% 的最大效率[1,17]。最常见的海洋热能转换系统热循环是使用低压汽轮机系统的朗肯循环。封闭循环汽轮机使用氨或 R-134a 作为工作流体。开启循环汽轮机使用来自海水自身的蒸汽作为工作流体。

7.14　热电效应

热电效应涉及热能和电能之间的能量转换：温差产生了电势，或者是电势产生了导致温差的热量流动[31]。热电效应有两种：

- 赛贝克效应（Seebeck effect）是指热能转换为电能。
- 帕尔帖效应（Peltier effect）是指电能转换为热能。

使用工作在热连接和冷连接之间的热电偶来测量温度是基于赛贝克效应。这种应用常见的一种热电材料是碲化铋（Bi_2Te_3）。热电效应的效率接近卡诺极限。

热电材料可以被用作称为“热电制冷器”或者“帕尔帖制冷器”的制冷设备，尽管它远不如蒸汽压缩式制冷常用。与蒸气压缩式制冷设备相比，帕尔帖冷却器的主要优点是它没有运动部分或循环液体，而且它尺寸很小，形状灵活。帕尔帖冷却器的另一个优点是不需要制冷液，制冷液能够对环境产生有害的影响。帕尔帖冷却器的主要缺点就是它们无法同时兼顾低成本和高功效。热电材料的技术进步可能会创造出便宜而且高效的帕尔帖冷却器。

7.15　热泵和制冷机的效率

热泵、制冷机和空调都是使用外功将热量从较冷的区域转移到较热的区域，因此它们的功能与热机相反。因为它们也是热力机械，所以这些设备也受限于卡诺效率。

一个热泵可以用作暖通空调[18]应用的加热或冷却的部分。热泵能够加热，而且在必要时，它使用基本制冷循环来冷却。为了实现这个目的，热泵能够通过换向阀来控制制冷剂流动的方向，实现冷凝器和蒸发器的相互转换。因此，热量能够被双向泵送。在寒冷地区，通常将热泵设计成只有加热功能。在加热模式下，外面的热交换器为蒸发器，而室内的交换器则为冷凝器，以实现向室内空气释放热量。相反，在冷却模式下，外面的热交换器变为冷凝器，而室内的交换器则为蒸发器，以实现从空气之中吸收热量。后面各节将对热泵和制冷机进行

讨论[5,37]。

7.15.1　热泵

热泵使用蒸发时吸收热量、冷凝时释放热量的流体。图 7.14 所示为一个典型的从环境空气中抽取热量的热泵。一个热泵需要外功从环境空气（冷区）中提取热量 $q_C(q_{in})$，并向外部空气（热区）传递热量 $q_H(q_{out})$。最常见的热泵是相变热泵。在这种热泵循环期间，压缩机将气体泵过冷凝器，气体在冷凝器中冷却下来，最终在释放出冷凝热 q_{out} 之后冷凝为液相。然后，该液体流过膨胀阀，这时它的压强和温度下降都非常大。接下来，该液体流过蒸发器，通过从外界获得的汽化热 q_{in}，它被加热并再次蒸发至汽相。

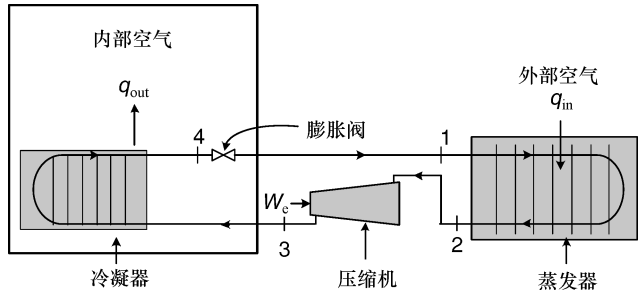


图 7.14　一个典型的为房间供热的热泵，压缩机将气体从低温区泵到高温区。在蒸发器内，汽化热吸收自外界环境。压缩机提高了蒸汽的压强与温度，并通过循环将其泵出。在冷凝器内，蒸汽冷凝并向环境内部释放冷凝热。由于压强突然下降，膨胀阀会引起液体的闪腾。液体的完全汽化发生在蒸发器中

在热泵中，主要以电力的形式提供的功的能量 W_{in} 被转化成热量，而且这个能量和从冷蓄能器（q_C）中转移来的能量之和等于加到热蓄能器 q_H 中的总热能：

$$\dot{q}_H = \dot{q}_C + \dot{W}_{in} \tag{7.69}$$

热泵的热效率通过性能系数 COP_{HP} 来测量，其定义为

$$COP_{HP} = \frac{\dot{q}_H}{\dot{W}_{in}} \tag{7.70}$$

它们转移的热量能够大于输入功。因此，与在一个电加热器或燃烧炉中简单地将输入功转换为热量相比，热泵能够以更为有效的方式来实现加热。热泵卡诺效率的极限值为

$$COP_{HP} \leqslant \frac{T_H}{T_H - T_C}\ （加热） \tag{7.71}$$

式（7.71）表明，COP 随着热区和冷区之间温差的增大而降低。

图 7.15 比较了当热泵用于加热和用于冷却时的工作流体的流动方向。一个换向阀逆转流体的流动方向，因此夏季的内部线圈在冬季用作外部线圈。这表明在夏季，工作流体从暖空气内获得热量在内部线圈中蒸发，而且在外部冷凝，将热量释放给较热的外界环境[6]。例 7.23 给出了一个热泵的分析。

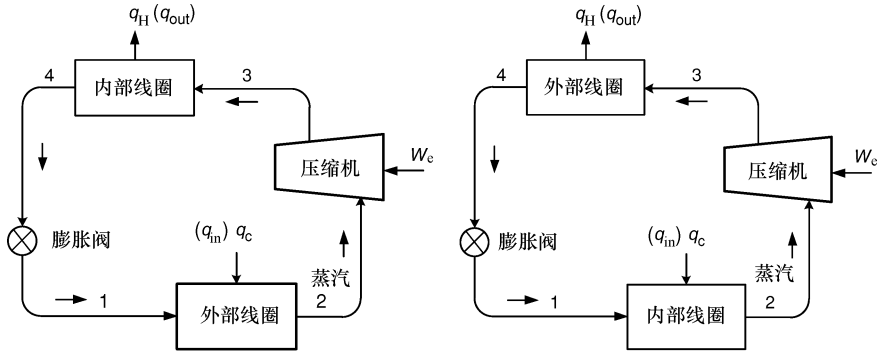


图 7.15　一个热泵能够被用于：a）在冬季为房间加热；b）在夏季为房间降温。一个换向阀逆转流体的流动方向，因此夏季的内部线圈在冬季用作外部线圈

例 7.23　热泵计算

一个热泵为房间提供的热量为 60MJ/h。如果压缩机需要的电能输入为 5kW，请计算其 COP。如果电力成本为 0.08 美元/kWh，而且热泵每月工作 100h，通过使用热泵代替一个电阻加热器，房主能节省多少钱？

解：

热泵以稳态运行。

带有热供应量为 60MJ/h = 16.66kW 而且 W_{HP} = 5kW 的热泵，COP：

$$\mathrm{COP}_{HP} = \frac{q_{out}}{W_{HP}} = 3.33$$

电阻加热器将提供的所有电功 W_e 转换为热量 q_H。因此，为了使房子获得 16.66kW 的热量，必须购买 16.66kW 的电能。电阻加热器的成本：

能量 = 16.66kW

成本（美元/月）= 电力（0.08 美元/kWh）功率（16.66kW）时间（100h/月）= 133.3 美元/月

功率为 5kW 的热泵的成本：

成本（美元/月）= 电力（0.08 美元/kWh）功率（5.0kW）时间（100h/月）=

40.0 美元/月

因此，每月节省（133.3 – 40.0）美元/月 = 93.3 美元/月。

电阻加热器不是很流行，特别是在寒冷气候地区。当外部温度下降时，热泵的热效率会显著地降低。当外部温度下降幅度足够大使得 COP_{HP} 约等于 1 时，电阻加热器变得更为实用。

7.15.2　制冷机

图 7.16 所示为一个典型的制冷循环。制冷机（冰箱）是热机的一种，其中，需要做功从冷冻室中提取能量，并通过制冷机后部的冷凝器将吸收的热量释放到房间当中，这会导致冷区的进一步冷却。常用的制冷剂之一是被称为 R-134a 的1，1，1，2-四氟乙烷（CF_3CH_2F）。R-134a 在 1.013bar 时的沸点温度为 –26.2°C（–15.0°F），潜热为 216.8kJ/kg。这与大多数现有的制冷设备相兼容。R-134a 对地球的大气臭氧层不会产生有害的影响。它没有腐蚀性，也不可燃。R-134a 用于中温应用，比如空调和商业制冷。另一种制冷剂是被称为 R-125 的五氟乙烷（C_2HF_5），它用于低温和中温应用。R-125 在大气压下的沸点为 –55.3°F，它无毒、不可燃，也没有腐蚀性。

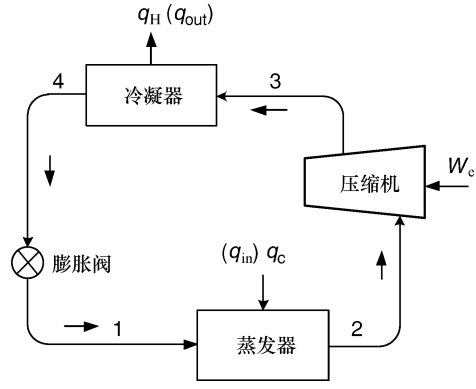


图 7.16　一个典型的制冷循环。蒸发器为制冷机的冷冻室，其中制冷剂吸收热量后蒸发。冷凝器通常位于制冷机后部，其中冷凝热被释放至外部的热环境

制冷机和空调的热效率称为性能系数 COP_R：

$$COP_R = \frac{\dot{q}_C}{\dot{W}_{in}} \tag{7.72}$$

制冷过程的卡诺效率极限值为

$$COP_R \leqslant \frac{T_C}{T_H - T_C}\ （冷却） \tag{7.73}$$

式（7.73）表明，COP_R 随着热区和冷区之间温差的增大而降低。例 7.24 给出了一个制冷机的分析。当需要冷却时，因输入功而带来的热能就是一个多余的副产品。在日常使用中，空调的效率通常是根据季节性能量效率比（SEER）来额定，9.4 节中将讨论有关细节。例 7.25 给出了制冷循环中散失热量的估算，而例 7.26 则给出了性能系数的估算。

例 7.24　制冷循环分析

在一个制冷循环中，过热的 R-134a（状态 2）流入压缩机时为 263.15K 和 0.18MPa。R-134a（状态 3）流出压缩机时为 313.15K 和 0.6MPa，随后流入一个冷凝器中，并在该冷凝器中由冷却水来实现冷却。R-134a（状态 4）作为饱和液体流出冷凝器时为 293.15K 和 0.57MPa，并流过一个节流阀。部分蒸发的R-134a（状态 1）流出阀门时为 0.293MPa。当 R-134a 流过蒸发器来吸收来自被冷藏物质的热量时，它就完成了循环。R-134a 的流量为 0.2kg/s，输入总功率为 60kW，外界环境温度为 290K。请确定该循环的性能系数和火用损失。

解：

假设动能和势能的变化可以忽略不计，而且系统处于稳态。

考虑图 7.16。

根据表 E1 和表 E2 中的 R-134a 数据：

$H_2 = 242.06\text{kJ/kg}$，$T_2 = 263.15\text{K}$，$P_2 = 0.18\text{MPa}$（过热蒸汽）

$H_3 = 278.09\text{kJ/kg}$，$T_3 = 313.15\text{K}$，$P_3 = 0.6\text{MPa}$（过热蒸汽）

$H_4 = 77.26\text{kJ/kg}$，$T_4 = 293.15\text{K}$，$P_4 = 0.571\text{MPa}$（饱和液体）

$P_1 = 0.293\text{MPa}$，$T_1 = 273.15\text{K}$

$$W_{\text{in}} = 60\text{kW}，\ \dot{m}_{\text{r}} = 0.2\text{kg/s}$$

$T_{\text{o}} = 290\text{K}$，$T_{\text{evaporator}} = 273\text{K}$，$T_{\text{condenser}} = 290\text{K}$

节流过程（其中 $H_4 = H_1 = 77.26\text{kJ/kg}$）（第 1 阶段）会引起来自冷凝器的饱和液体的部分汽化。

混合物中的蒸汽部分（称为“蒸汽干度”）可以根据 0.293MPa 时的焓值来计算：

$H_{1,\text{sat liq}} = 50.02\text{kJ/kg}$，$H_{1,\text{sat vap}} = 247.23\text{kJ/kg}$

$$x_1 = \frac{77.26 - 50.02}{247.23 - 50.02} = 0.138$$

对于该循环，总焓变为零。

在压缩机中，需要外部能量 W_{in}。

在蒸发器中，来自待冷却物质的热传递 q_{in}被用于制冷剂 R-134a 的蒸发。

在蒸发器中吸收的、来自制冷机内容物的热量为

$$\dot{q}_{\text{in}} = \dot{m}_{\text{r}}(H_2 - H_1) = 32.96\text{kW}$$

能量平衡表示需要除去的总能量（$W_{\text{in}} + q_{\text{in}}$）为

$$\dot{W}_{\text{in}} + \dot{q}_{\text{in}} = \dot{q}_{\text{out}} = 92.96\text{kW}$$

$$\dot{W}_{\text{ideal,in}} = \dot{m}_{\text{r}}(H_3 - H_2) = 7.20\text{kW}$$

制冷机的性能系数（COP）为

$$\text{COP} = \frac{\dot{q}_{\text{in}}}{\dot{W}_{\text{ideal,in}}} = \frac{H_2 - H_1}{H_3 - H_2} = 4.57$$

总功（火用）损失为

$$\dot{E}x_{\text{total}} = \dot{W}_{\text{in}} + \left(1 - \frac{T_{\text{o}}}{T_{\text{evaporator}}}\right)\dot{q}_{\text{in}} - \left(1 - \frac{T_{\text{o}}}{T_{\text{condenser}}}\right)(-\dot{q}_{\text{out}}) = 58.94\text{kW}$$

火用分析得出了单个过程的性能。寻求改进单个步骤的热力学性能的方式是同等重要的。

例 7.25　通过制冷机的热量排放

制冷机（冰箱）的食品冷藏室通过以 350kJ/min 的速率除热，从而将维持 4°C的温度。如果制冷机所需的输入功率为 1.8kW，请确定①该制冷机的性能系数（COP），②向外界排放热量的速率。

解：

假设：稳态运行。

①　$\dot{q}_{\text{C}} = 350\text{kJ/min}$，$\dot{W}_{\text{net,in}} = 1.8\text{kW}$

$$\text{COP}_{\text{R}} = \frac{\dot{q}_{\text{C}}}{\dot{W}_{\text{net,in}}} = \frac{350\text{kJ/min}}{1.8\text{kW}}\left(\frac{\text{kW}}{60\text{kJ/min}}\right) = 3.2$$

这意味着，每提供 1kJ 能量就可以从制冷机中吸收走 3.2kJ 热量。

② 能量平衡

$$\dot{q}_{\text{H}} = \dot{q}_{\text{C}} + \dot{W}_{\text{net,in}} = 350\text{kJ/min} + 1.8\text{kW}\left(\frac{60\text{kJ/min}}{\text{kW}}\right) = 458\text{kJ/min}$$

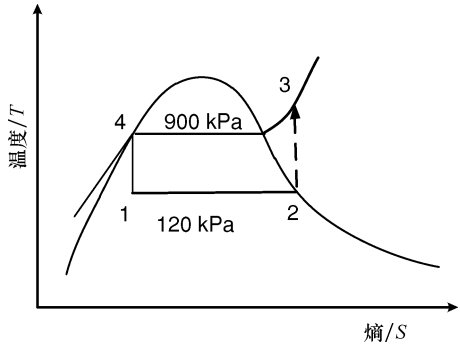
从制冷机空间吸收的热量与以电功形式提供给制冷机的能量都被释放到外界空气当中。

例 7.26　蒸汽压缩式制冷循环的性能系数

一个理想的蒸汽压缩式制冷循环使用 R-134a。压缩机入口和出口压强为 120kPa 和 900kPa，制冷剂的质量流量为 0.04kg/s。请确定其性能系数。

解：

假设：稳态运行。动能和势能的变化可以忽略不计。



解：

假设：稳态绝热运行。动能和势能的变化可以忽略不计。

制冷剂质量流量 $=0.04\text{kg/s}$

$$P_2=120\text{kPa},\ H_2=233.86\text{kJ/kg},\ S_2=0.9354\text{kJ/kg K}$$

$P_3=900\text{kPa}$，对于等熵压缩：

$S_3=S_2=0.9354\text{kJ/kg K}\rightarrow H_3=276.7\text{kJ/kg}$，

$P_4=900\text{kPa}$，$H_{4\text{ Sat liq}}=99.56\text{kJ/kg}$；$H_{1\text{ Sat liq}}=H_{4\text{ Sat liq}}$（节流）

压缩机的输入功率为

$$\dot{W}_{\text{in}}=\dot{m}(H_3-H_2)=(0.04\text{kg/s})(276.7-233.86)\text{kJ/kg}=1.71\text{kW}$$

从制冷机空间中吸收走的热量为

$$\dot{q}_{\text{C}}=\dot{m}(H_2-H_1)=(0.04\text{kg/s})(233.86-99.56)\text{kJ/kg}=5.37\text{kW}$$

制冷机向外界排放的热量为

$$\dot{q}_{\text{H}}=\dot{m}(H_3-H_4)=(0.04\text{kg/s})(276.7-99.56)\text{kJ/kg}=7.08\text{kW}$$

$$\text{COP}_{\text{R}}=\frac{\dot{q}_{\text{C}}}{\dot{W}_{\text{in}}}=\frac{5.37\text{kW}}{1.71\text{kW}}=3.14$$

这个制冷机每消耗 1 个单位的电能就能够从冷藏空间中带走 3.14 个单位的能量。

7.16　燃料电池的效率

燃料电池是一种电化学电池，它将燃料的化学能转换为电能。电能产生于

提供的燃料和氧化剂之间的反应。氢燃料电池使用氢气作为燃料，使用氧气（通常来自空气）作为氧化剂。其他燃料包括碳氢化合物和乙醇等（参见6.15节）。典型的燃料电池在全额定负载时产生的电压为0.6～0.7V。为了传递所需的能量值，燃料电池可以在串联和并联电路中联合使用，其中，使用串联电路可以得到较高的电压，而使用并联电路则能够提供一个较高的电流。这样的设计称为一个燃料电池组，可以增加电池的表面积来允许更强的电流流过每个电池[22]。

燃料电池的效率取决于从其中抽取的功率。抽取的功率越大，意味着抽取的电流越大，从而增加了燃料电池的损失。大多数损失表现为电池的电压下降，因此一个电池的效率与它的电压大约成比例。鉴于此，通常会给出燃料电池的电压-电流（极化曲线）图。一个典型的工作于0.7V的电池效率大约为50%，这意味着氢气所含的50%的能量被转化成电能，剩余的50%将被转化成热量。燃料电池不是热机，因此它们的效率并不受限于卡诺循环效率。因此，它们能够以很高的效率将化学能转换为电能，特别地当它们以低功率密度工作并且使用纯氢气和氧气作为反应物时。使用压缩氢气工作的燃料电池车辆，如果氢气被储存为高压气体，它的从发电厂到车轮（power-plant-to-wheel）的效率能够达到22%[19,39]。表7.5比较了几种燃料电池的效率。

表7.5 使用聚合物膜作为电解质的电池类型

燃料电池	功率输出	T/°C	电池效率（%）
质子交换膜燃料电池	100W～500kW	150～120（全氟磺酸）	50～70
直接甲醇燃料电池	100mW～1kW	90～120	20～30
微生物燃料电池	较低	<40	较低

注：Mench[26]；Vielstich等人[39]。

根据工况的不同，这种发电站的总体效率（电能到氢气再回到电能，称为往返效率）在30%～50%。更便宜的铅酸电池可能会返回90%左右，而电解槽/燃料电池系统则能够储存无限量的氢气，因此更适合长期储存。

7.17 生物系统中的能量转换

所有的生命系统不得不以富含能量化合物的形式将能量转换为化学能。这种转换的两种生化循环过程是动物的氧化磷酸化作用和植物的光合作用。下一节将会对这些循环进行简要讨论。

7.17.1　通过氧化磷酸化实现的能量转换

在氧化磷酸化中，电子被从电子传递链的食物分子中去除。线粒体膜中的一系列蛋白，利用来自被还原分子（比如 NADH）的电子与氧结合所释放的能量，将质子泵穿透线粒体膜。质子的流动引起称为 ATP 酶的一个大蛋白的秸秆亚基（stalk subunit）的旋转。ATP 酶的旋转改变了活性位点（active site）的形状，并通过二磷酸腺苷（ADP）与无机磷（Pi）合成了三磷酸腺苷（ATP）：

$$ADP + Pi = ATP \tag{7.74}$$

ATP 是一种富含能量的化合物，具有三个附属于腺嘌呤核苷（即腺苷）的磷酸盐基。在这三个磷酸盐基中，末端的磷酸盐基有一个弱键。在 ATP 与酶形成一个复合物时，这个磷酸盐基能够自发地断裂。这个键的断裂会释放化学能，引起键能量的直接转移从而生成了 ADP。ATP 的能量用于活细胞的所有活动，比如离子和分子的运输、新蛋白与其他底物的合成、生长与进化。ATP 因此成为了“细胞的能量货币”，用于在不同的生化反应循环之间传递化学能[7,25]。

7.17.2　来自光合作用的能量

光合作用是通过太阳光和二氧化碳（CO_2）来合成碳水化合物。太阳能的获取本质上类似于氧化磷酸化，由质子原动力来驱动 ATP 合成。驱动这种电子传递链所需的电子，来自称为光合作用反应中心的光线收集蛋白。在植物中，蓝藻和藻类，生氧光合作用将水分解，同时生成氧气作为一种废弃产物。这个过程要使用光合作用反应中心产生的 ATP 和 NADPH。这种碳固定反应由酶 RUBisCO 活化酶（1，5-二磷酸核酮糖羧化酶/加氧酶）来完成。

7.17.3　代谢

代谢是发生在生物体内以维持生命的一组生物化学反应。代谢通常分为两类：分解代谢与合成代谢。分解代谢分解有机物质，例如在细胞呼吸中收集能量。在合成代谢中，能量用于构造蛋白质和核酸等细胞成分。三磷酸腺苷（ATP）用于在不同的生化反应循环之间传递化学能。细胞中的 ATP 连续地再生，并作为分解代谢与合成代谢之间的一个桥梁，同时，分解代谢反应产生 ATP，而合成代谢反应则通过能量耦联来消耗该 ATP。

7.17.4　生物燃料

生物燃料可以分为三大类：碳水化合物（CH，单糖、双糖与多糖的混合物）、脂肪（F）和蛋白质（Pr）[25]。碳水化合物是带有多个羟基群的直链醛或

酮，这些羟基群能以直链或者环的形式存在。碳水化合物是最为丰富的生物分子，而且具有多种功能，比如：能量（淀粉、糖原）的储存和转运、构成结构成分（如植物的纤维素等）。

燃料值等于反应燃烧热（氧化）。碳水化合物和脂肪可以被完全氧化，而蛋白质只能被部分氧化，因此，它的燃料值也较低。能量消耗可以根据能量平衡来计算。假设①氧化过程仅涉及碳水化合物（CH）、脂肪（F）和蛋白质（Pr）三类化合物；②其他化合物是固定不变的；③氧气、二氧化碳和氮气的吸收和消除是瞬时的。能量平衡方程为

$$\dot{E} = \sum_i (\dot{n}\Delta H_r)_i = (\dot{n}\Delta H_r)_{CH} + (\dot{n}\Delta H_r)_F + (\dot{n}\Delta H_r)_{Pr} = \dot{q} + \dot{W} \quad (7.75)$$

7.17.5　将生物质转化为生物燃料

将生物质转化为生物燃料的技术，通常主要分为两类：热化学转化与生物转化。

- 热化学转化涉及应用热量将生物质断裂为可以用于生产燃料替代品的化学中间体。这些热技术许多已经流行了一个多世纪，主要用于将煤转化为燃料。汽化与合成气（一氧化碳和氢气）催化转化成燃料（例如，氢气、液体燃料、混合乙醇或二甲基醚等）相结合。生物质的高温分解产生能够在石油精炼厂中用作中间体的生物油。
- 生物转化聚焦于将生物质当中的碳水化合物发酵成乙醇和其他化学品。当然，发酵技术处于最早的转换过程之中[38]。生物和热化学燃料生产的最优组合可能会为将生物质能量转化为可用燃料带来更高的能量效率。

2005 年，在美国产生并销售了主要是从玉米粒淀粉发酵而生产的 39 亿 gal 乙醇燃料。估计显示一个从玉米中生产乙醇的上限大约为每年 100 亿 gal，它只占美国汽油需求的很小一部分[23,34]。由于 1gal 乙醇仅含的能量仅为 1gal 汽油的 67%，每年 100 亿 gal 乙醇意味着 70 亿 gal 汽油，这只能满足美国汽油需求的 5%。

获取木质纤维生物质中的能量大大地提高了生物燃料提供能量的潜能。图 7.17 提供了一个表示纤维素原料到生物燃料转换过程的示意图。纤维素生物质在通过发酵被转换成生物燃料之前，需要进行预处理和酶化处理。关键的技术进步需要能够以成本效益方式将生物质中的糖类聚合物分解为糖的生物催化剂，以及能将生物质中所有的糖发酵为乙醇的微生物[9,11,30]。

政府对生物柴油使用的鼓励大大促进了植物油基生物柴油燃料替代品的显著增长。将植物油转换为生物柴油是一个相对简单的热化学过程，其中，天然油与甲醇合成会生成甲基脂肪酸酯[23]。

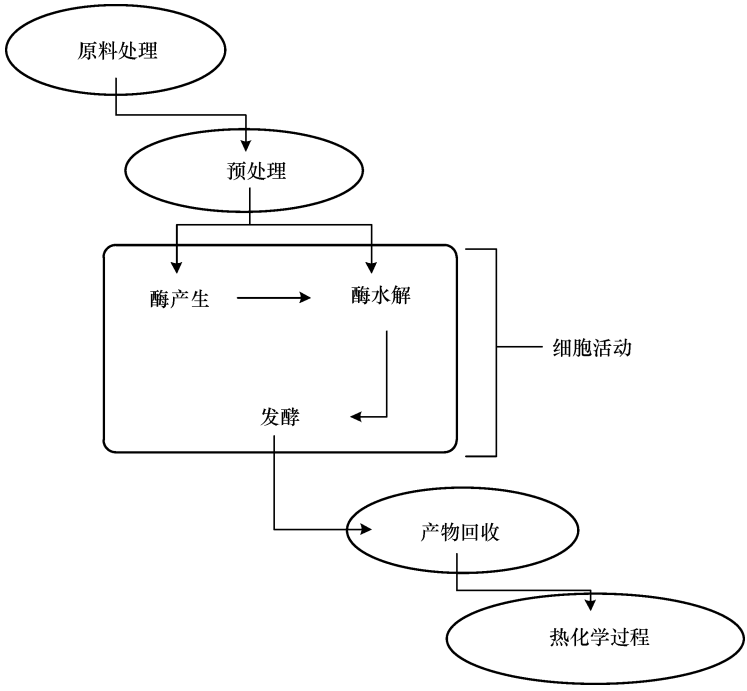


图 7.17　将木质纤维生物质转换为乙醇的生物转化过程示意图

习　　题

7.1　一个泵从储水箱的底部抽水，该储水箱向大气开口，水温为 75°F。储存容器中的水深为 10ft，而且容器底部高出地面 50ft。该泵在 80°F 和 100psia 时将水泵入另一个储水箱，它高于地面 10ft。如果水的流量为 5000lb/h，泵的效率为 80%，请估算所需要的功率（单位：hp）。

7.2　一个储水箱的泵由 18kW 电动机驱动，其效率为 90%。水流量为 40L/s。入口管道和出口管道的直径是相同的，而且入口和出口之间的高度差可以忽略不计。入口和出口的绝对压强分别为 100kPa 和 400kPa。请确定该泵的机械效率。

7.3　一个储水箱的泵由 18kW 电动机驱动，其效率为 85%。水流量为 30L/s。入口管道和出口管道的直径是相同的，而且入口和出口之间的高度差可以忽略不计。入口和出口的绝对压强分别为 100kPa 和 500kPa。请确定该泵的机械效率。

7.4　一个风力发电机组的叶片直径为 24ft，产生 0.35kW 电力。在风力发电机组所处的位置，风速为 11mile/h。请确定该风力发电机组的效率。

7.5　一个风力发电机组的叶片直径为 27ft，产生 0.4kW 电力。在风力发电机组所处的位置，风速为 10mile/h。请确定该风力发电机组的效率。

7.6　一个水电站通过 25m 的高度落差来工作。水电站的水轮机将势能转换成电能，其效

率假定为85%。电力传输的损失大约为8%。请估算为一个500W灯泡供电所需的水的质量流量。

7.7 一个水电站产生125kW的功率。如果它的水轮机对水的势能转换效率只有75%，如果水的流量为480kg/s，为了连续提供125kW的功率，请估算必需的高度落差。

7.8 一个水电站通过40m的高度落差来工作。水电站的水轮机将势能转换成电能，其效率假定为80%。电力传输的损失大约为8%。请估算为一个1500W灯泡供电所需的水的质量流量。

7.9 一个水电站通过150ft的高度落差来工作。水电站的水轮机将势能转换成电能，其效率假定为82%。电力传输的损失大约为6%。请估算为一个3500W灯泡供电所需的水的质量流量。

7.10 一个水电站通过高度落差为200ft的水来工作。水电站的水轮机将势能转换成电能，其效率假定为85%。电力传输的损失大约为5%，因此可用的能量为95%。请估算为一个3500W灯泡供电所需的水的质量流量。

7.11 一个水电站通过高度落差为200ft的水来工作。水电站的水轮机将势能转换成电能，其效率假定为85%。电力传输的损失大约为5%，因此可用的能量为95%。如果水的质量流量396lb/s，请估算水电站的出力。

7.12 一个泵的电动机的工作电流为10.2A，电压为110V。在负载稳定时，发动机传输的机械能为1.32hp。请估算来自电动机的热传递率。

7.13 一个泵的电动机的工作电流为12A，电压为110V。在负载稳定时，发动机传输的机械能为1.5hp。请估算来自电动机的热传递率。

7.14 1.0bar、300K的空气流入一个稳态运行的隔热压缩机，流入的质量流量为3.6kg/s，流出时为2.76bar。动能和势能的影响可以忽略不计。①请确定所需的最小理论输入功率（单位为：kW）与相应的出口温度（单位为：K）。②如果实际的出口温度为420K，请确定等熵压缩机的输入功率（单位为：kW）及其效率。

7.15 1.0bar、300K的空气流入一个稳态运行的隔热压缩机，流入的质量流量为2.5kg/s，流出时为2.6bar。动能和势能的影响可以忽略不计。①请确定所需的最小理论输入功率（单位为：kW）与相应的出口温度（单位为：K）。②如果实际的出口温度为420K，请确定等熵压缩机的输入功率（单位为：kW）及其效率。

7.16 一个压缩机将二氧化碳的压强从100kPa提高到600kPa。入口温度为300K，出口温度为400K。二氧化碳的质量流量为0.01kmol/s。压缩机所需功率为55kW。外界的温度为290K。请确定所需要的最小功与性能系数。

7.17 一个压缩机将二氧化碳的压强从100kPa提高到500kPa。入口温度为300K，出口温度为400K。二氧化碳的质量流量为0.015kmol/s。压缩机所需功率为60kW。外界的温度为290K。请确定所需要的最小功与性能系数。

7.18 一个压缩机接收的空气为15psia和80°F，流量为1.2lb/s。出口处的空气状态为40psia和300°F。在入口处空气流速较低，但在压缩机的出口处提高到250ft/s。如果它被冷却的速率为200Btu/s，请估算压缩机的输入功率。

7.19 一个压缩机接收的空气为15psia和80°F，流量为1.5lb/s。出口处的空气状态为

50psia 和 300°F。在入口处空气流速较低，但在压缩机的出口处提高到 250ft/s。如果它被冷却的速率为 150Btu/s，请估算压缩机的输入功率。

7.20 在一个绝热压缩运行中，空气从 20°C和 101.32kPa 压缩到 520kPa，效率为 0.7。空气的流量为 22mol/s。假设空气在压缩期间保持理想气体特性。外界环境温度为 298.15K。请确定其热力学效率 η_{th}和能量消散率 $\dot{E}_{loss}$。

7.21 在一个绝热压缩运行中，空气从 25°C和 101.32kPa 压缩到 560kPa，效率为 0.7。空气的流量为 20mol/s。假设空气在压缩期间保持理想气体特性。外界环境温度为 298.15K。请确定其热力学效率 η_{th}和能量消散率 $\dot{E}_{loss}$。

7.22 将 0.05kg/s 的蒸汽流从 50°C饱和蒸汽态压缩至 800kPa、200°C所需的能量为 15kW。估算其功率输入与压缩机热损失的转换率。

7.23 将 0.1kg/s 的蒸汽流从 80°C饱和蒸汽态压缩至 1000kPa、200°C所需的能量为 28kW。估算其功率输入与压缩机热损失的转换率。

7.24 一个蒸汽轮机消耗的蒸汽为 540psia 和 800°F，流量为 4000lb/h。排出的蒸汽为 165psia。汽轮机为绝热运行。

① 请确定出口蒸汽温度和汽轮机产生的功。

② 请确定其热效率。

7.25 一个蒸汽轮机消耗的蒸汽为 540psia 和 800°F，流量为 3800lb/h。排出的蒸汽为 180psia。汽轮机为绝热运行。

① 请确定出口蒸汽温度和汽轮机产生的功。

② 请确定其热效率。

7.26 一个过热蒸汽流（蒸汽流 1）在一个汽轮机中从 5000kPa 和 325°C膨胀为 150kPa 和 200°C。蒸汽流量为 15.5kg/s。如果汽轮机产生的功率为 1.1MW，请确定损失到外界的热量和热效率。

7.27 一个过热蒸汽流（蒸汽流 1）在一个汽轮机中从 6000kPa 和 325°C膨胀为 150kPa 和 200°C。蒸汽流量为 16.2kg/s。如果汽轮机产生的功率为 1.2MW，请确定损失到外界的热量和热效率。

7.28 在一个汽轮机中，蒸汽从 6600kPa 和 300°C膨胀为 1atm 的饱和蒸汽。蒸汽流量为 9.55kg/s。如果汽轮机产生的功率为 1MW，请确定其热效率。

7.29 在一个汽轮机中，蒸汽从 7000kPa 和 300°C膨胀为 1atm 的饱和蒸汽。蒸汽流量为 14.55kg/s。如果汽轮机产生的功率为 1.5MW，请确定其热效率。

7.30 在一个汽轮机中，蒸汽从 850psia 和 600°F 绝热膨胀为 12psia 的湿蒸汽，蒸汽干度为 0.9。汽轮机产生的功率输出为 1500Btu/s。如果蒸汽流量为 12.8lb/s，请估算该汽轮机的热效率。

7.31 在一个汽轮机中，蒸汽从 900psia 和 600°F 绝热膨胀为 10psia 的湿蒸汽，蒸汽干度为 0.9。汽轮机产生的功率输出为 1550Btu/s。如果蒸汽流量为 14.2lb/s，请估算该汽轮机的热效率。

7.32 一个汽轮机产生 65000kW 电力，效率为 70%。它所使用的热蒸汽为 8200kPa 和 550°C。排放的蒸汽流是 75kPa 的饱和混合物。如果汽轮机内为绝热膨胀，而外界环境为

298.15K，请确定其热力学效率和损失的功。

7.33 一个汽轮机产生 70MW 电力，效率为 70%。它所使用的热蒸汽为 8800kPa 和 550°C。排放的蒸汽流是 15kPa 的饱和混合物。如果汽轮机内为绝热膨胀，而外界环境为 298.15K，请确定其热力学效率和损失的功。

7.34 在一个卡诺循环稳流过程中，使用水作为工作流体。热量传递源为 250°C，而且水从饱和液体转化为饱和蒸汽。饱和蒸汽在一个汽轮机膨胀为 10kPa，热量在 10kPa 的冷凝器中被传递出去。请估算该循环的热效率与净输出功率。

7.35 在一个卡诺循环稳流过程中，使用水作为工作流体。热量传递源为 200°C，而且水从饱和液体转化为饱和蒸汽。饱和蒸汽在一个汽轮机膨胀为 20kPa，热量在 20kPa 的冷凝器中被传递出去。工作流体的流量为 5.5kg/s，请估算该循环的热效率以及在冷凝器中被传递出去的热量。

7.36 在一个卡诺循环稳流过程中，使用水作为工作流体。热量传递源为 200°C，而且水从饱和液体转化为饱和蒸汽。饱和蒸汽在一个汽轮机膨胀为 10kPa，热量在 10kPa 的冷凝器中被传递出去。工作流体的流量为 7.5kg/s，请估算该循环的热效率以及在冷凝器中被传递出去的热量。

7.37 在一个卡诺循环稳流过程中，使用水作为工作流体。热量传递源为 400°F，而且水从饱和液体转化为饱和蒸汽。饱和蒸汽在一个汽轮机膨胀为 5psia，热量在的冷凝器中被传递出去 5psia。工作流体的流量为 10lb/s，请估算该循环的热效率以及在冷凝器中被传递出去的热量。

7.38 考虑一个简单理想朗肯循环。如果汽轮机的入口温度和冷凝器的压强保持相同，请讨论提高锅炉压强对以下各项的影响：

- 汽轮机功率输出；
- 热量供应；
- 热效率；
- 热量排放。

7.39 考虑一个简单理想朗肯循环。如果锅炉和冷凝器的压强保持相同，请讨论提高过热蒸汽的温度对以下各项的影响：

- 汽轮机功率输出；
- 热量供应；
- 热效率；
- 热量排放。

7.40 一个蒸汽发电厂燃烧的燃料为 1273.15K（T_H），可用的冷却水为 290K（T_C）。锅炉中产生的蒸汽为 8200kPa 和 823.15K。冷凝器产生的饱和液体为 30kPa。汽轮机和泵以可逆和绝热方式工作。请确定蒸汽流量为 1k/s 时，该循环的热效率。

7.41 一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环工作。锅炉的运行工况为 3000kPa 和 350°C。冷凝器的运行条件为 30kPa。蒸汽的质量流量为 22kg/s。请估算该循环的热效率和净输出功率。

7.42 一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环工作，如下所示。输入汽轮机的蒸汽为

698.15K 和 4100kPa，而排出的蒸汽则为 40kPa。蒸汽的质量流量为 3.0kg/s。在锅炉中，热量从 1500K（T_H）的热源传递给蒸汽。在冷凝器中，释放至外界环境的热为 298K（T_C），冷凝器的运行工况为 298K。请确定该循环的热效率。

7.43　一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环工作。锅炉的运行工况为 5000kPa 和 300°C。冷凝器的运行工况为 20kPa。蒸汽的质量流量为 25kg/s。请估算该循环的热效率和净输出功率。

7.44　一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环工作。锅炉的运行工况为 10000kPa 和 400°C。冷凝器的运行工况为 30kPa。循环的功率输出为 140MW。请估算该循环的热效率和蒸汽的质量流量。

7.45　一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环工作。质量流量为 20kg/s 的蒸汽流入蒸汽轮机时为 3500kPa 和 400°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 15kPa。请确定该循环的热效率。

7.46　一个简单理想朗肯循环在一个蒸汽发电厂中使用的。蒸汽流入汽轮机时为 6600kPa 和 798.15K。汽轮机的净输出功率为 35kW。排放的蒸汽为 10kPa。请确定其热效率。

7.47　一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环工作。锅炉的运行工况为 10000kPa 和 500°C。冷凝器的运行工况为 10kPa。循环的功率输出为 175MW。汽轮机等熵运行的效率为 0.80，而泵等熵运行的效率为 0.90。请估算该循环的热效率以及在冷凝器中传递的热量。

7.48　一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环工作。锅炉的运行工况为 10000kPa 和 400°C。冷凝器的运行工况为 10kPa。循环的功率输出为 145MW。汽轮机等熵运行的效率为 0.85，而泵等熵运行的效率为 0.95。请估算该循环的热效率以及在冷凝器中传递的热量。

7.49　一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环工作。锅炉的运行工况为 10000kPa 和 400°C。冷凝器的运行工况为 10kPa。蒸汽的质量流量为 110kg/s。汽轮机等熵运行的效率为 0.85，而泵等熵运行的效率为 0.95。请估算该循环的热效率和功率输出。

7.50　一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环工作。锅炉的运行工况为 8000kPa 和 400°C。冷凝器的运行工况为 20kPa。蒸汽的质量流量为 80kg/s。汽轮机等熵运行的效率为 0.85，而泵等熵运行的效率为 0.90。请估算该循环的热效率和功率输出。

7.51　一个蒸汽发电厂使用天然气来产生 0.1MW 的功率（如下所示）。供应给锅炉的燃烧热产生的蒸汽为 10000kPa 和 798.15K。汽轮机的效率为 0.7。从汽轮机中排出的蒸汽为 30kPa，该蒸汽被输送到一个冷凝器中。冷凝水被泵入锅炉。泵的效率为 0.90。请确定该循环的热效率。

7.52　一个蒸汽发电厂使用天然气来产生 0.12MW 的功率（如下所示）。供应给锅炉的燃烧热产生的蒸汽为 10000kPa 和 798.15K。汽轮机的效率为 0.75。从汽轮机中排出的蒸汽为 30kPa，该蒸汽被输送到一个冷凝器中。冷凝水被泵入锅炉。泵的效率为 0.85。请确定：

① 理想朗肯循环的热效率。

② 实际朗肯循环的热效率。

7.53　一个蒸汽发电厂使用天然气来产生 0.12MW 的功率（如下所示）。供应给锅炉的燃烧热产生的蒸汽为 9000kPa 和 798.15K。汽轮机的效率为 0.8。从汽轮机中排出的蒸汽为 10kPa，该蒸汽被输送到一个冷凝器中。冷凝水被泵入锅炉。泵的效率为 0.9。请确定：

① 理想朗肯循环的热效率。

② 实际朗肯循环的热效率。

7.54 在一个蒸汽发电厂使用简单理想再热朗肯循环（如下所示）。流入汽轮机的蒸汽为9000kPa 和 823.15K，流出时为 4350kPa 和 698.15K。蒸汽在等压条件下被再加热至 823.15K。低压汽轮机排放的蒸汽为 10kPa。汽轮机的净输出功率为 40MW。在锅炉中，热量从 1600K（T_H）的热源传递给蒸汽。在冷凝器中，释放至外界环境的热为 298K（T_C）。冷凝器的运行工况为 298K。汽轮机的效率为 0.8，泵的效率为 0.9。请确定该蒸汽的质量流量和循环的热效率。

7.55 一个蒸汽发电厂使用理想回热朗肯循环（如下所示）。流入高压汽轮机的蒸汽为8200kPa 和 773.15K，冷凝器的运行工况为 20kPa。从汽轮机中提取的蒸汽为 350kPa，用于加热开式加热器的给水。水在通过给水加热器之后成为饱和液体。汽轮机的输出功为 50MW。在锅炉中，热量从 1600K（T_H）的热源传递给蒸汽。在冷凝器中，释放至外界环境的热为 285K（T_C）。请确定该循环的热效率。

7.56 一个蒸汽发电厂使用理想再热回热朗肯循环（如下所示）。流入高压汽轮机的蒸汽为 9000kPa 和 773.15K，流出时为 850kPa。冷凝器的运行工况为 10kPa。从汽轮机中提取的那部分蒸汽为 850kPa，用于为一个开式加热器中的水加热，在该加热器中，蒸汽和来自冷凝器的液态水混合，并进行直接接触热传递。其余的蒸汽被再加热至 723.15K，并在低压汽轮机级中膨胀至冷凝器的压强。水在通过热水器之后成为饱和液体，其压强等于加热器内的压强。汽轮机的输出功为 75MW。在锅炉中，热量从 1600K（T_H）的热源传递给蒸汽。在冷凝器中，释放至外界环境的热为 285K（T_C）。请确定该循环的热效率。

7.57 一个蒸汽发电厂使用地热能源。可用的地热源为 220°C和 2320kPa，流量为 200kg/s。热水通过一个阀门和一个闪蒸罐。蒸汽从闪蒸罐流入汽轮机时为 550kPa 和 428.62K。汽轮机排出蒸汽的干度 $x_4 = 0.96$。冷凝器的运行工况为 10kPa。水在通过冷凝器之后成为饱和液体。请确定该循环的热效率。

7.58 一个地热发电站产生 7MW 的功率。热地热源流体的入口温度为 150°C。液态热水的流量为 220kg/s。基准状态为 25°C。请估算该发电站的第二法则效率（即实际效率/最佳效率）。

7.59 一个蒸汽发电厂中使用再热朗肯循环。流入高压汽轮机的蒸汽为 9000kPa 和 823.15K，流出时为 4350kPa。蒸汽在等压条件下被再加热至 823.15K。蒸汽进入低压汽轮机时为 4350kPa 和 823.15K。低压汽轮机排放的蒸汽为 10kPa。汽轮机的净输出功率为 65MW。等熵汽轮机的效率为 80%。泵的效率为 95%。在锅炉中，热量从 1600K 的热源传递给蒸汽。在冷凝器中，释放至外界环境的热为 298K。冷凝器的运行工况为 298K。请确定其热效率。

7.60 一个蒸汽发电厂中使用再热朗肯循环。流入高压汽轮机的蒸汽为 10000kPa 和 823.15K，流出时为 4350kPa。蒸汽在等压条件下被再加热至 823.15K。蒸汽进入低压汽轮机时为 4350kPa 和 823.15K。低压汽轮机排放的蒸汽为 15kPa。汽轮机的净输出功率为 65MW。等熵汽轮机的效率为 80%。泵的效率为 95%。在锅炉中，热量从 1600K 的热源传递给蒸汽。冷凝器的运行工况为 298K。请确定其热效率。

7.61 一个蒸汽发电厂使用实际回热朗肯循环。流入高压汽轮机的蒸汽为 11000kPa 和 773.15K，冷凝器的工作条件为 10kPa。从汽轮机中提取的蒸汽为 475kPa，用于为一个开式加

热器中的水加热。水在通过热水器之后成为饱和液体。汽轮机的输出功为 90MW。泵的效率为 95%，汽轮机的效率为 75%。在锅炉中，热量从 1700K 的热源传递给蒸汽。在冷凝器中，释放至外界环境的热为 285K。请确定其热效率。

7.62　一个蒸汽发电厂使用实际回热朗肯循环。流入高压汽轮机的蒸汽为 10000kPa 和 773.15K，冷凝器的工作条件为 15kPa。从汽轮机中提取的蒸汽为 475kPa，用于为一个开式加热器中的水加热。水在通过热水器之后成为饱和液体。汽轮机的输出功为 90MW。泵的效率为 90%，汽轮机的效率为 80%。在锅炉中，热量从 1700K 的热源传递给蒸汽。在冷凝器中，释放至外界环境的热为 285K。请确定其热效率。

7.63　一个蒸汽发电厂使用实际再热回热朗肯循环。流入高压汽轮机的蒸汽为 11000kPa 和 773.15K，冷凝器的工作条件为 10kPa。从汽轮机中提取的蒸汽为 2000kPa，用于为一个开式加热器中的水加热。提取的蒸汽为 475kPa，用于过程热。水在通过热水器之后成为饱和液体。汽轮机的输出功为 90MW。汽轮机的效率为 80%。泵等熵运行。在锅炉中，热量从 1700K 的热源传递给蒸汽。在冷凝器中，释放至外界环境的热为 290K。请确定该发电厂的热效率。

7.64　一个蒸汽发电厂使用实际再热回热朗肯循环。流入高压汽轮机的蒸汽为 10000kPa 和 773.15K，冷凝器的工作条件为 15kPa。从汽轮机中提取的蒸汽为 2000kPa，用于为一个开式加热器中的水加热。提取的蒸汽为 475kPa，用于过程热。水在通过热水器之后成为饱和液体。汽轮机的输出功为 85MW。汽轮机的效率为 80%。泵等熵运行。在锅炉中，热量从 1700K 的热源传递给蒸汽。在冷凝器中，释放至外界环境的热为 290K。请确定该发电厂的热效率。

7.65　一个蒸汽发电厂以回热循环运行。流入汽轮机的蒸汽为 700psia 和 800°F，并在冷凝器中膨胀为 1psia。部分蒸汽提取于 60psia。汽轮机和泵的效率分别为 0.80 和 0.95。如果蒸汽的质量流量为 9.75lb/s，请估算该汽轮机的热效率。

7.66　一个蒸汽发电厂以回热循环运行。流入汽轮机的蒸汽为 750psia 和 800°F 并在冷凝器中膨胀为 5psia。部分蒸汽提取于 60psia。汽轮机和泵的效率分别为 0.80 和 0.90。如果蒸汽的质量流量为 10.5lb/s，请估算该汽轮机的热效率。

7.67　一个热电厂使用的蒸汽为 900psia 和 1000°F，用于发电和过程热（如下所示）。来自锅炉的蒸汽流量为 16lb/s。该过程所需的蒸汽为 70psia，流速为 3.2lb/s，由汽轮机中的膨胀蒸汽来提供。提取的蒸汽被冷凝，并与冷凝器的输出水相混合。剩余的蒸汽从 70psia 膨胀至冷凝器压强 3.2psia。在锅炉中，热量从 3000°R 的热源传递给蒸汽。在冷凝器中，释放至外界环境的热为 540°R。如果汽轮机的运行效率为 80%，泵的效率为 85%，请确定该循环的热效率。

7.68　一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_p = 9$。压缩机入口的新鲜空气温度为 300K，在压缩机出口处和汽轮机入口处则为 1200K。假设使用标准空气，请确定该循环的热效率。

7.69　一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_p = 9$。压缩机入口的新鲜空气温度为 300K，在压缩机出口处和汽轮机入口处则为 1200K。假设在燃气轮机循环运行中，压缩机的效率为 80%，汽轮机的效率为 80%。请确定该循环的热效率。

7.70　一个功率循环的净功为 8×10^6Btu/s，传递给冷蓄水库的热量 q_C 为 12×10^6Btu/s。热源的温度为 1400°R，冷源温度为 560°R。该循环可实现的热效率与最大热效率之比为多大？

7.71　一个功率循环的净功为 25MW，传递给冷蓄水库的热量 q_C 为 67MW。热源的温度

为573K，冷源温度为285K。该循环可实现的热效率与最大热效率之比为多大？

7.72 一个功率循环的净功为52000Btu/s，传递给冷蓄水库的热量 q_C 为69000Btu/s。热源的温度为1450°R，冷源温度为550°R。该循环可实现的热效率与最大热效率之比为多大？

7.73 一个功率循环的净功为75000Btu/s，传递给冷蓄水库的热量 q_C 为85000Btu/s。热源的温度为1500°R，冷源温度为530°R。该循环可实现的热效率与最大热效率之比为多大？

7.74 一个理想奥托循环工作的压缩比（V_{max}/V_{min}）为8.9。开始压缩（状态1）时空气的状态为101.3kPa和300K。该循环的最高温度和最低温度分别为1360和300K。比热取决于温度。请确定该循环的热效率以及工作在相同温度区间的卡诺循环的热效率。

7.75 一个理想奥托循环工作的压缩比（V_{max}/V_{min}）为9.2。开始压缩（状态1）时空气的状态为101.3kPa和300K。在等容加热过程期间，温度为1900K的热源向空气传递的热量为730kJ/kg。释放至外界环境的热为280K。请确定其能量转换的热效率。

7.76 一个理想奥托循环工作的压缩比（V_{max}/V_{min}）为9。开始压缩（状态1）时空气的状态为101.3kPa和295K。在等容加热过程期间，温度为1800K的热源向空气传递的热量为900kJ/kg。释放至外界环境的热为295K。请确定其能量转换的热效率。

7.77 一个理想奥托循环工作的压缩比（V_{max}/V_{min}）为8.5。开始压缩（状态1）时空气的状态为101.3kPa和285K。在等容加热过程期间，温度为1800K的热源向空气传递的热量为1000kJ/kg。释放至外界环境的热为280K。请确定其能量转换的热效率。

7.78 一个理想奥托循环工作的压缩比（V_{max}/V_{min}）为10。开始压缩（状态1）时空气的状态为101.3kPa和295K。在等容加热过程期间，温度为1800K的热源向空气传递的热量为1000kJ/kg。释放至外界环境的热为295K。请确定其能量转换的热效率。

7.79 一个理想奥托循环工作的压缩比（$r = V_{max}/V_{min}$）为8。开始压缩（状态1）时空气的状态为101.3kPa和300K。循环的最高温度和最低温度分别为1300和300K。请确定其能量转换的热效率与卡诺热机的热效率。平均比热为 $C_{p,av} = 1.00$kJ/kg K和 $C_{v,av} = 0.717$kJ/kgK。

7.80 一个理想奥托循环工作的压缩比（$r = V_{max}/V_{min}$）为8.8。开始压缩（状态1）时空气的状态为101.3kPa和300K。循环的最高温度和最低温度分别为1400K和300K。请确定其能量转换的热效率与卡诺热机的热效率。平均比热为 $C_{p,av} = 1.00$kJ/kg K和 $C_{v,av} = 0.717$kJ/kg K。

7.81 初始状态为1atm和-13°C的1kmol二氧化碳，完成包括三个串联的本质可逆过程的功率循环。步骤1-2：绝热压缩到5atm。步骤2-3：等温膨胀到1atm。步骤3-1：等压压缩。请确定其净功（单位为：Btu/lb_m）与热效率。

7.82 一个理想的狄塞尔循环空气压缩比为18，最高工作温度为2660°R。在开始压缩时，流体压强与温度分别为14.7psia与540°R。在室温下，空气的平均比热为 $C_{p,av} = 0.24$Btu/lb°R和 $C_{v,av} = 0.171$Btu/lb°R。请利用冷空气标准假设，确定其热效率。

7.83 一个理想的狄塞尔循环空气压缩比为18，最高工作温度为2200K。在开始压缩时，流体压强与温度分别为100kPa与290K。在室温下，空气的平均比热为 $C_{p,av} = 1.0$kJ/kg K和 $C_{v,av} = 0.718$kJ/kg K。请利用冷空气标准假设，确定该循环的热效率。

7.84 一个理想的狄塞尔循环空气压缩比为16，截止率为2。在开始压缩时，流体的压强与温度分别为100kPa与300K。在室温下，空气的平均比热为 $C_{p,av} = 1.005$kJ/kg K和 $C_{v,av} =$

0.7181kJ/kg K。请利用冷空气标准假设，确定该循环的热效率。

7.85 一个理想的狄塞尔循环空气压缩比为16，截止率为2。在开始压缩时，流体的压强与温度分别为100kPa与290K。在室温下，空气的平均比热为 $C_{p,av}=1.005$kJ/kg K 和 $C_{v,av}=0.7181$kJ/kg K。请利用冷空气标准假设，确定该循环的热效率。

7.86 一个制冷机使用四氟乙烷（R-134a）作为制冷剂，容量为10000Btu/h。冷藏空间为15°F。蒸发器和冷凝器在热传递中的运行温差为10°F。冷却水流入冷凝器时为70°F。因此，蒸发器为5°F，冷凝器为80°F。如果压缩机效率为85%，请确定其理想功率和所需的有功功率。

7.87 在一个制冷循环中，过热的R-134a（状态2）流入压缩机时为200°F和90.0psia。R-134a（状态3）流出压缩机时为360°F和140psia，随后流入一个冷凝器中，并在该冷凝器中由冷却水来实现冷却。R-134a（状态4）作为饱和液体流出冷凝器时为90.5°F和120psia，随后流经一个节流阀。部分蒸发的R-134a（状态1）流出节流阀时为100psia。当R-134a流过蒸发器来吸收来自被冷藏物质的热量时，它就完成了循环。R-134a的流量为0.2lb/s。输入总功率为85Btu/s。冷却水流入冷凝器时为80°F，流出时为115°F。外界环境温度为210°F。请确定其总体损失。

7.88 在一个四氟乙烷（R-134a）制冷循环中，过热R-134a（状态1）流入压缩机时为253.15K和0.14MPa。R-134a（状态2）流出压缩机时为303.15K和0.5MPa，随后流入一个冷凝器中，并在该冷凝器中由冷却水来实现冷却。R-134a（状态3）流出冷凝器时为299.87K和0.75MPa，随后流经一个节流阀。部分蒸发的R-134a（状态4）流出节流阀时为0.205MPa。当R-134a流过蒸发器来吸收来自被冷藏物质的热量时，它就完成了循环。R-134a（状态1）流出蒸发器时为过热蒸汽。R-134a的流量为0.16kg/s。输入总功率为750kW。请估算其性能系数。

7.89 一个制冷机使用四氟乙烷（R-134a）作为制冷剂，容量为250Btu/s。冷却水流入冷凝器时为70°F。蒸发器为10°F，冷凝器为80°F。冷藏空间为20°F。如果压缩机效率为75%，请确定其理想功率和所需的有功功率。假设动能和势能的变化可以忽略不计。

7.90 一个制冷机使用四氟乙烷（R-134a）作为制冷剂，容量为2500kW。冷却水流入冷凝器时为280K。蒸发器为271.92K，冷凝器为299.87K。冷藏空间为280K。如果压缩机效率为80%，请确定其理想功率和所需的有功功率。假设动能和势能的变化可以忽略不计。

7.91 一个制冷循环的COP=3.0。该循环的 $q_H=2000$kJ。请确定 q_C 和 W_{net}（单位均为：kJ）。

7.92 一个制冷循环的COP=2.5。该循环的 $q_H=1500$kJ。请确定 q_C 和 W_{net}（单位均为：kJ）。

7.93 在一个五氟乙烷（R-125）制冷循环中，饱和R-125（状态1）流入压缩机时为250K和3bar。R-125（状态2）流出压缩机时为320K和23.63bar，随后流入一个冷凝器中，并在该冷凝器中由冷却水来实现冷却。R-125（状态3）作为饱和液体流出冷凝器时为310K和18.62bar，并流入一个节流阀。部分蒸发的R-125（状态4）流出节流阀时为255K和3.668bar。当R-125流过蒸发器来吸收来自被冷藏物质的热量时，它就完成了循环。R-125流出蒸发器时为饱和蒸汽。蒸发器温度为275.15K。R-125的流量为0.75kg/s。输入总功率为60kW。冷却水流入冷凝器时为293.15K，流出时为295.15K。外界环境温度为298.15K。请确定其性能系数。

7.94 一个制冷机使用四氟乙烷（R-134a）作为制冷剂，容量为10000Btu/h。冷藏空间

为 15°F。蒸发器和冷凝器在热传递中的运行温差为 10°F。冷却水流入冷凝器时为 70°F。因此，蒸发器为 5°F，冷凝器为 80°F。如果压缩机效率为 85%，请确定其性能系数。

7.95 在一个制冷循环中，过热 R-134a（状态 2）流入压缩机时为 200°F 和 90.0psia。R-134a（状态 3）流出压缩机时为 360°F 和 140psia，随后流入一个冷凝器中，并在该冷凝器中由冷却水来实现冷却。R-134a（状态 4）作为饱和液体流出冷凝器时为 90.5°F 和 120psia，并流经一个节流阀。部分蒸发的 R-134a（状态 1）流出节流阀时为 100psia。当 R-134a 流过蒸发器来吸收来自被冷藏物质的热量时，它就完成了循环。R-134a 的流量为 0.2lb/s。输入总功率为 85Btu/s。冷却水流入冷凝器时为 80°F，流出时为 115°F。外界环境温度为 210°F。请确定其性能系数。

7.96 在一个四氟乙烷（R-134a）制冷循环中，过热 R-134a（状态 1）流入压缩机时为 253.15K 和 0.14MPa。R-134a（状态 2）流出压缩机时为 303.15K 和 0.5MPa，随后流入一个冷凝器中，并在该冷凝器中由冷却水来实现冷却。R-134a（状态 3）流出冷凝器时为 299.87K 和 0.75MPa，并流经一个节流阀。部分蒸发的 R-134a（状态 4）流出节流阀时为 0.205MPa。当 R-134a 流过蒸发器来吸收来自被冷藏物质的热量时，它就完成了循环。R-134a（状态 1）流出蒸发器时为过热蒸汽。R-134a 的流量为 0.16kg/s。输入总功率为 750kW。请估算其性能系数。

7.97 一个制冷机使用四氟乙烷（R-134a）作为制冷剂，容量为 250Btu/s。冷却水流入冷凝器时为 70°F。蒸发器为 10°F，冷凝器为 80°F。冷藏空间为 20°F。如果压缩机效率为 75%，请确定其性能系数。假设动能和势能的变化可以忽略不计。

7.98 一个制冷机使用四氟乙烷（R-134a）作为制冷剂，容量为 2500kW。冷却水流入冷凝器时为 280K。蒸发器为 271.92K，冷凝器为 299.87K。冷藏空间为 280K。如果压缩机效率为 80%，请确定其理想功率和所需的有功功率。假设动能和势能的变化可以忽略不计。

参 考 文 献

1. Avery WH, Chih Wu C (1994) Renewable energy from the ocean—A guide to OTEC. Oxford University Press, Oxford
2. Breeze P (2005) Power generation technologies. Newnes, Oxford
3. Callen HB (1985) Thermodynamics and an introduction to thermostatistics, 2nd edn. Wiley, New York
4. Chih W (2004) Thermodynamic cycles: computer-aided design and optimization. Dekker, New York
5. Çengel YA, Boles MA (2002) Thermodynamics: an engineering approach, 4th edn. McGraw Hill, New York
6. Çengel YA, Turner RH (2001) Fundamentals of thermal-fluid sciences. McGraw-Hill, NewYork
7. Demirel Y (2007) Nonequilibrium thermodynamics. Transport and rate processes in physical, chemical and biological systems, 2nd edn. Elsevier, Amsterdam
8. DiPippo R (2008) Geothermal power plants. Principles, applications, case studies and environmental impact, 2nd edn. Elsevier, Oxford
9. DOE (2005) Multi-year program plan 2007–2012, Office of the Biomass Program, Energy Efficiency and Renewable Energy, Department of Energy, Washington. http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/mypp.pdf, accessed in May 2011
10. DOE (2009) Where does the energy go? Advanced technologies and energy efficiency. Fuel Economy Guide. US Department of Energy

11. English B, et al. (2006) A review of the department of energy, energy efficiency and renewable energy's biomass supply curves. Prepared for Oak Ridge National Laboratory, Department of Agricultural Economics, University of Tennessee
12. Forsund FR (2010) Hydropower economics. Springer, Berlin
13. Granet I, Bluestein M (2000) Thermodynamics and heat power, 6th edn. Prentice Hall, Upper Saddle River
14. Hargreaves CM (1991) The philips Stirling engine. Elsevier, Amsterdam
15. Heywood JB (1988) Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill, New York
16. Hoffmann H, Burzler JM, Schubert S (1997) Endoreversible thermodynamics. J Non-Equilib Thermodyn 22:311–355
17. Holthuijsen LH (2007) Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press, Cambridge
18. HVAC (2004) Systems and equipment volume of the ASHRAE handbook. ASHRAE, Atlanta
19. Kakati BK, Mohan V (2008) Development of low cost advanced composite bipolar plate for P.E.M. fuel cell. Fuel Cells 8:45–51
20. Kanoglu M, Dincer I, Rosen MA (2007) Understanding energy and exergy efficiencies for improved energy management in power plants. Energy Policy 35:3967–3978
21. Kehlhofer R, Rukes B, Hannemann F, Stirnimann F (2009) Combined-cycle gas & steam turbine power plants, 3rd edn. PenWell, Tulsa
22. Larminie J, Dicks A (2003) Fuel cell systems explained, 2nd edn. Wiley, New York
23. Lynd L et al. (2005) The role of biomass in America's energy future. Prepared for the National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado
24. Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL (2010) Wind energy explained: theory, design application, 2nd edn. Wiley, New York
25. Marks DB (1999) Biochemistry. Kluwer, New York
26. Mench MM (2008) Fuel cell engines. Wiley, New York
27. Moran MJ, Shapiro HN (2000) Fundamentals of engineering thermodynamics, 4th edn. Wiley, New York
28. Nag PK (2002) Power plant engineering. McGraw-Hill, New York
29. Organ J (2007) The air engine: Stirling cycle power for a sustainable future. Woodhead, Cambridge
30. Perlack R, Wright L et al (2005) Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply. ORNL, Oak Ridge
31. Priya S, Inman DJ (eds) (2009) Energy harvesting technologies. Springer, New York
32. Riegler C, Bichlmaier C (2007) The geared turbofan technology-opportunities, challenges and readiness status. 1st CEAS European air and space conference, Berlin, 10–13 Sept
33. Schobert HH (2002) Energy and society. Taylor & Francis, New York
34. Sheehan J et al (2005) Energy and environmental aspects of using corn stover for fuel ethanol. J Indust Ecol 7:3–4
35. Sheng C, Azevedo JLT (2005) Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. Biomass Bioener 28:499–507
36. Smil V (2003) Energy at the crossroads: global perspectives and uncertainties. MIT Press, Cambridge
37. Smith JM, Van Ness HC, Abbott MM (2005) Introduction to chemical engineering thermodynamics, 7th edn. McGraw Hill, New York
38. Stanbury PF, Hall S, Whitaker A (1999) Principles of fermentation technology, 2nd edn. Butterworth-Heinemann, Oxford
39. Vielstich W et al. (eds) (2009) Handbook of fuel cells: advances in electrocatalysis, materials, diagnostics and durability, Vol 6. Wiley, New York

第 8 章　能 量 储 存

8.1　能量储存与调节

一些装置或物理介质能够储存某些形式的能量供以后使用。电池储存可随时转换的化学能来为手机供电，水电站大坝在蓄水库中储存重力势能，而冰蓄冷器则储存热量以满足冷却的峰值需求。电池和化石燃料（比如煤和汽油等）则储存化学能。三磷酸腺苷（ATP）等一些富含能量的生物分子的合成则能够储存和转换生命系统中的化学能。植物也会收集太阳光作为化学势能，这时，二氧化碳和水被转化成碳水化合物。

储存与调节热能的两个重要物理介质是水和氢。表 8.1 列出了水和氢气的一些物理性质，包括液态和汽态水的生成热。它们的成分和热物理性质使它们不仅在能量储存和转换方面，而且在调节地球温度方面都是独一无二的。氢表示势能的储存，这种势能可以通过太阳中的核聚变以光的形式释放出来。在太阳能到达地球之后，可以通过光合作用储存为化学能。此外，当水从海洋中蒸发并在高于海平面处沉积下来时，它能够驱动涡轮机/发电机实现发电，因此太阳光能可以再次被储存为重力势能。

8.1.1　水

接近 80% 的地球表面都是水。水的比热容较高，为 4.185kJ/kg°C，这要远远高于土壤和岩石的比热容（见表 8.1）。单位体积的水能够吸收并储存大量的热量，使得海洋成为世界最大规模的温度调节器。因此，水的温度比地球表面温度变化更慢。此外，水的汽化热也较高，在 20°C时大约为 2257kJ/kg。这表明大量的潜热能够以蒸汽的形式实现长距离输送，并在冷凝之后以雨水的形式释放（见图 8.1）。雨水在高海拔的蓄水库中蓄积，储存了大量的势能，从而可以驱动水轮机实现发电。海洋能够调节地球的能量平衡，因为它们吸收的日照量几乎是地球表面的 4 倍。

通过将二氧化碳溶解为“碳酸”（苏打水）的形式，液态水也有助于调节大气中二氧化碳的含量。一些溶解的二氧化碳与水中的矿物质结合，沉淀到海床上生成石灰岩。水对于所有的生命形式来说也是必不可少的，因为大多数动物和植物都包含超过 60% 的水（以体积计），它有助于生物调节自身的体温。因此，水可以调节地球与生命系统的温度。

表 8.1　水和氢气的物理性质

化合物	MW	ρ /(kg/m^3)	$C_{p,av}$ /(kJ/kg K)	T_m/°C	T_h/°C	ΔH_v /(kJ/kg)	ΔH_m /(kJ/kg)
水	18.02	1.000	4.18	0.0	100.0	2.257	333.7
氢气	2.02	70.7	10.0	−259.2	−252.8	445.7	59.5

注：1. Cengel 和 Turner[2]；Rigden[18]。

2. MW：分子量，T_m：熔化温度，$C_{p,av}$：平均热容量，ρ：密度，ΔH_m：熔化热，ΔH_{vap}：汽化热。

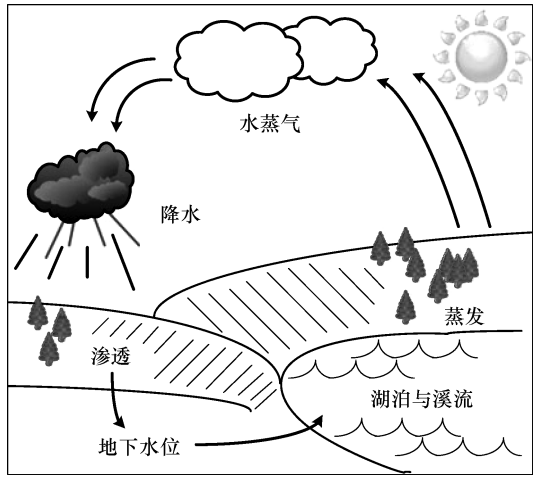


图 8.1　地球上的水循环

8.1.2　氢气

氢是一个多功能的储存介质，由于它可以在燃料电池中转换为有用功实现发电，也可以用于内燃机。氢气还被构建成一种电能储存介质。它首先必须由其他能源加工而来，而且可以变为出色的可再生能源能量储存介质。氢气可以使用天然气蒸汽转化法加工而得。当使用这种方法加工时，它是一种像汽油那样的衍生燃料。当通过水的电解产生时，它是一种化学能储存形式。产生 1kg 氢气大约需要 50kWh（180MJ）的太阳能。在电力成本为 0.09 美元/kWh 时，氢气成本大约为 4.50 美元/kg。大量的气态氢可以在地下洞室、废弃油田或气田中储存多年，而且可以作为多用途储能。

8.2　能量储存的类型

能量储存的方法可以根据稳定性、易于运输、能量获取与释放来选择。能量

储存的主要技术涉及以热、电、化学和机械形式的能量储存：

- 热。热能可以在温度高于或低于环境温度时通过显热和潜热来储存。热也可以储存供短期或长期应用。例如，来自太阳的热能，可以由太阳能集热器来收集，并储存于一个蓄热器中供日常或季节性使用。用于冷却的热能可以被储存在冰中。
- 电。可以使用水坝在高海拔处蓄积大量的水来储存水电能。然后，水推动一个水轮机转动并产生电力。也可以使用抽水蓄能方式将水抽回蓄水库来储存能量。电容能够储存电荷作为电力生产系统的一部分。电池也可以储存电能供便携式电子设备使用。
- 化学。稳定化合物（比如化石燃料等）可以储存化学能。生物系统能够将能量储存在富含能量的分子（比如葡萄糖和 ATP 等）的化学键中。其他形式的化学能储存包括氢气、合成烃类燃料以及电池等。
- 机械。能量可以被储存于加压气体（比如压缩空气）中，并用于驱动车辆和动力工具。液压蓄能器、飞轮和弹簧也可以储存机械能。

下面各节将讨论这些能量储存技术。

8.3 热能储存

热能储存技术用来实现能量需求与能量生产之间的平衡。例如，如果此前太阳能被储存起来，那么在夜间或者冬季就可以使用。还可以在不同于能量获取或者产生的某些位置来使用储存和转化的能量。热量储存介质可以是维持在高于（较热）或低于（较冷）25°C的环境温度。在炎热的气候条件下，由于大规模的空调电力需求，热能储存的主要应用是蓄冷。热能储存可以被计划实现短期或季节性应用。利用热能储存的一些优点如下[7]：

- 减少能源消耗和碳足迹。
- 减少初始设备成本和维护成本。
- 减少污染物排放（比如 CO_2）。
- 提高操作的灵活性、效率以及设备利用的效率。
- 在所需的温度以便携和可充电方式的过程应用。
- 等温和每单位重量下较高的储存容量。
- 当需要时，能量来源不限（热或电）。

热能通常以显热和潜热的形式来储存。图 8.2 比较了显热储热和潜热储热的特点。当物体吸收并储存显热直到它达到发生相变的温度时，温度一直保持上升。在它们的熔点之下，固-液相变物质储存显热，同时它们的温度随着吸热而升高（见图 8.2a）。当相变材料达到它们的熔化温度时，它们在接近等温的条件

下吸收大量的潜热，直到熔化完成。如果外部连续提供热量，那么，已熔化的材料开始储存显热。一种材料可以在低于它实际冷凝温度时凝固，这称为过冷。另外，一种材料也可以在高于它实际熔化温度时熔化，这称为过热。一种相变材料的过冷与过热产生了一个温度控制范围（见图 8.2b）。

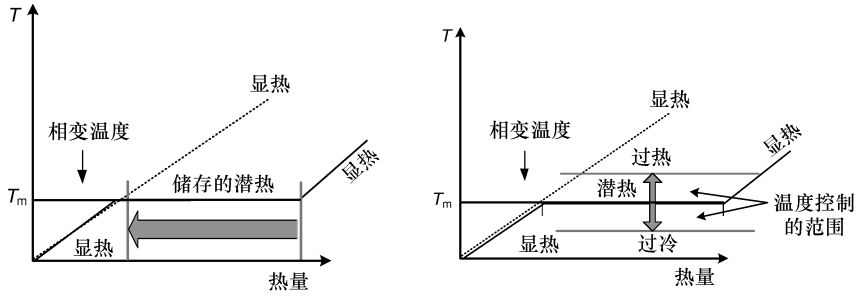


图 8.2　a）显热储存与潜热储存的比较，b）在相变能量储存期间的温度控制；一种相变材料的过冷与过热产生了一个温度控制范围。这个范围可以通过向相变材料中添加成核剂来减小

过冷与过热之间的这个温度范围，可以通过向相变材料中添加成核剂来减小。储存的热量通常传递给热交换器系统中的热传递流体（比如水或空气等），如图 8.3 所示。当空气被用作热传递流体时，因为房间内的冷空气流过热量储存系统，从而获得热量，同时将暖空气直接排入房间[4,5]。

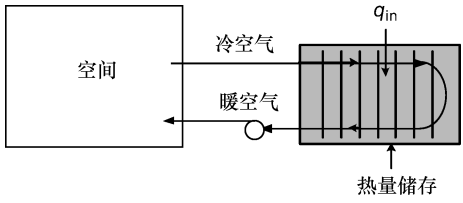


图 8.3　使用空气作为热传递流体的直接供暖。房间内的冷空气流过热量储存系统，从而获得热量，同时将暖空气直接排入房间

夜间的低成本电能可以被用于以显热和（或）潜热的形式来储存能量。然后，储存的能量可以用于峰值需求期间的冷却/加热需要。热能储存系统可以设计成使用冷冻水、冰和封装的相变材料。在冷冻水箱中安装相变材料模块，已被证明能够提高水基和冰基热能储存系统的能量密度并改进其性能。图 8.4 所示为一个冷却用相变材料的典型部署。在非高峰期间，补充水箱中的相变材料由冷水机组来充电。在峰值需求期间，当热交换流体通过相变材料容器时，通过储存在相变材料能量储存容器中的能量来实现冷却。由此，稳定了峰值需求期间的负

荷，并将负荷“转移”到非高峰期间。

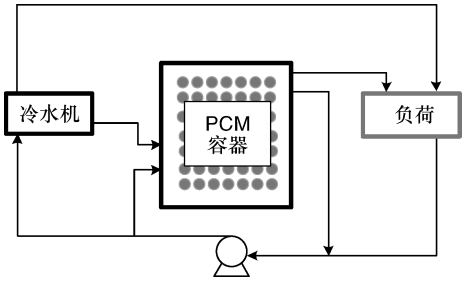


图 8.4　一个带有相变材料（PCM）的热能储存系统的配置图

8.3.1　太阳能储存

由于阳光照射的时间依赖性，太阳能热系统的效率要依靠良好集成的热能储存技术。例如，在带有热能储存的太阳能水集热器利用中，通过弥合太阳能热可用性和热水需求之间的差距，可以实现较高的效率。太阳能热能通常由主动式太阳能集热器来获取，并传递给隔热的储存系统，供空间供暖、家用或过程水加热等各种应用使用，如图 8.5 所示。实用的大多数主动式太阳能加热系统能够储存几小时到一天收集的太阳能量。季节性热能储存系统的数量也在不断增长，该系统主要是用于储存夏季能量供冬季供暖使用。水基热能储存技术非常实用，这是因为水的融化热很大（见表 8.1）。冷却容量“吨（ton）”的初始定义就是 24h 融化 1t 冰所需的热量。这个定义已经被 1t 暖通空调（HVAC）的容量 12000Btu/h 所取代。

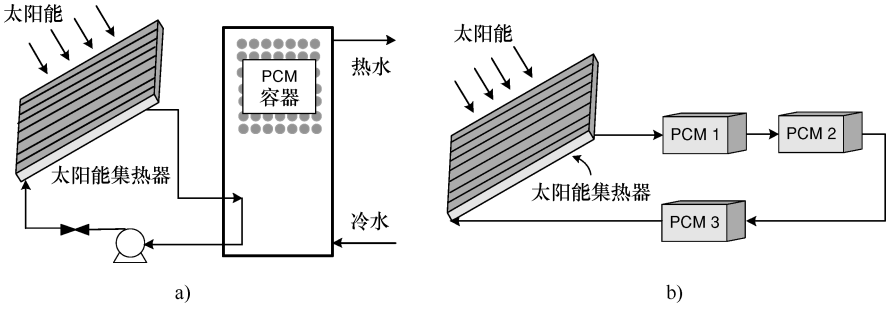


图 8.5　以显热和潜热的形式储存太阳能的配置图

a）带有 PCM 热量储存的太阳能热水器，b）使用工作于高温和低温的各种不同的相变材料的太阳能储热和蓄冷，PCM 1 ~ PCM 3 是指带有不同的热量储存特征的相变材料（见表 8.3 和表 8.4）

许多早期的应用利用带有储水的太阳能水集热器，这是由于它在提高效率和

减少尺寸方面的优势。对于家庭供暖，必须通过热交换器将水的热量释放到房间中。不过，目前推荐家庭供暖使用以空气作为传递介质的太阳能加热系统，因为它采用直接加热方式、泄露或者结冰破坏的风险小。在直接加热中，能向房间提供来自太阳能空气集热器的暖空气，从而实现房间加热。另外，空气集热器和风管通常很便宜，而且也只需要很少的维护[4,5]。

表 8.2　以显热形式实现热量储存的一些材料，容积热容量或能量密度定义为 $\rho C_p = J/m^3 \cdot K$

材　　料	温度范围	密　　度	热 容 量	能量密度
[a]50% 乙二醇 50% 水	0 ~ 100	1075	3480	3741
道氏热载体 A	12 ~ 260	867	2200	1907
导热油 66	-9 ~ 343	750	2100	1575
水	0 ~ 100	1000	4190	4190
花岗岩	-	2400	790	1896
抽盐：50% $NaNO_3$-50% KNO_3	220 ~ 540	1733	1550	2686
熔盐①：50% KNO_3-40% $NaNO_2$-7% $NaNO_3$	142 ~ 540	1680	1560	2620

① 重量百分比。

8.3.2　显热储存

显热是因提高了某种物质的温度而被储存下来，它可以估算为

$$q = mC_{p,av}\Delta T = \rho V C_{p,av}\Delta T \tag{8.1}$$

式中，q 为储存的显热（J，Btu）；V 为体积（m^3，ft^3）；ρ 为密度（kg/m^3，lb/ft^3）；m 为质量（kg，lb）；$C_{p,av}$为材料的平均比热容（kJ/kg°C，Btu/lb°F）；ΔT 为温度变化（°C，°F）。

能量密度或容积热容量定义为密度与热容量之积：$\rho C_{p,av}$。表 8.2 为以显热形式实现热量储存的一些材料。储存的热量通常由一种热传递流体（比如水或空气等）传递到被使用位置，如图 8.5 所示。例 8.1 给出了显热储存的计算。

例 8.1　显热储存的计算

① 将 $2m^3$ 水和 $2m^3$ 花岗岩从 20°C加热到 40°C，请估算其显热储存量。

② 将 1000lb 水从 20°F 加热到 30°F，请估算其储存热量。假设平均热容量为 $C_{p,av} = 1.0Btu/lb°F$。

解：

假设热容量值保持恒定。

① 通过水和花岗岩来储存显热：

使用从表 8.2 中得到的热容量 $C_{p,av}$和密度 ρ 数据值，根据式（8.1）：

$$q = \rho V C_{p,av} \Delta T = (1000\text{kg/m}^3)(2\text{m}^3)(4190\text{J/kg°C})(40-20)\text{°C} = 167600\text{kJ}$$
$$= 167600\text{kJ}/(3600\text{s/h}) = 46.55\text{kWh}$$

花岗岩：$q = \rho V C_{p,av} \Delta T = (2400\text{kg/m}^3)(2\text{m}^3)(790\text{J/kg°C})(40-20)\text{°C}$
$$= 75840\text{kJ} = (75840\text{kJ})/(3600\text{s/h}) = 21.06\text{kWh}$$

② 当水的平均比热为 1.0Btu/lb°F 时，储存于 1000lb 热水中的热量为

$$q = mC_{p,av}\Delta T = (1000\text{lb})(1.0\text{Btu/lb°F})(30-20)\text{°F} = 10000\text{Btu} = 10550\text{kJ}$$
$$= 10550\text{kJ}/(3600\text{s/h}) = 2.93\text{kWh}$$

8.3.3　使用相变材料储存潜热

潜热储存可以通过固-固、固-液、固-体以及液-气相变来实现。液-气相变要比固-液相变的转变热更高。不过，液-气相变并不实用，这是因为储存处于气相时的材料，需要大容积或高压。固-固相变通常很慢，而且转变热也相对较低。因此，用于热量储存的主要相变是固-液相变。图 8.6 所示为水从固态到气态在焓温图上的焓变。在 -30 ~ 0°C，水的显热提高了。在 0°C时，水通过吸收融化热开始融化。在融化完成之后，液态水被加热到 100°C[11,20,24]。

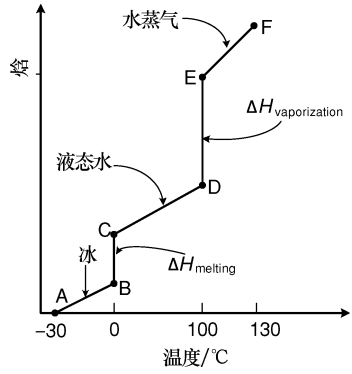


图 8.6　水在 -30 ~ 130°C从固态（冰）到汽态焓值的变化。在 -30 ~ 0°C水的显热提高了。在 0°C时，水通过吸收融化热开始融化。在融化过程完成之后，液态水被加热到 100°C，此时开始从液态转变为蒸汽态。在吸收汽化热之后，所有的液态水变为蒸汽。在 -30 ~ 130°C，汽态水提高了它的显热

用于储存热量的相变材料是在加热和冷却所需的温度范围内经历固-液相变的化学物质。在相变过程期间，当材料从固态变为液态时吸收能量，而当它从液态变回固态时，又会释放能量。一个相变材料应该具有以下特性：

- 融化温度处于所需的运行温度范围之内。
- 每单位体积具有较高的融化潜热。

- 比热、密度和导热系数较高。
- 在运行温度下相变的体积和蒸汽压强变化较小。
- 同成分熔融（固体组成成分与熔化的液体组成成分相同）。
- 化学稳定性和完全可逆凝固/熔化循环。
- 无腐蚀性、无毒、不可燃和防爆。
- 低成本和可用性。

潜热储存技术降低了温度波动，而且还提供了一个较高的单位容积/质量热储存容量。温度和储存的能量值可以通过选择一种特定的相变材料来调节。一种固-液相变材料在初始温度和最终温度之间所储存的总热量可以估算为

水在 -30 ~ 130°C的焓如下：

- 过程 A-B：提高了冰在 -30 ~ 0°C的显热。
- 过程 B-C：从固态到液态的相变：冰在 0 °C时融化；需要融化热（H_{melting}）。
- 过程 C-D：提高了液态水在 0 ~ 100°C的显热。
- 过程 D-E：在 100°C时从液态到蒸汽态的相变；需要汽化热（$H_{\text{vaporization}}$）。
- 过程 E-F：提高了水蒸气在 100 ~ 130°C的显热。

$$q_{\text{stored}} = \text{固体显热} + \text{潜热} + \text{液体显热}$$

$$q_{\text{stored}} = mC_{\text{ps,av}}(T_{\text{m}} - T_{\text{i}}) + m\Delta H_{\text{m}} + mC_{\text{pl,av}}(T_{\text{f}} - T_{\text{m}})\ (T_{\text{f}} > T_{\text{m}} > T_{\text{i}}) \quad (8.2)$$

式中，m 为相变材料的质量；$C_{\text{ps,av}}$ 和 $C_{\text{pl,av}}$ 分别为固相和液相的平均热容量；T_{m} 为融化温度；T_{i} 和 T_{f} 分别为初始温度和最终温度；ΔH_{m} 为熔化热。

储存的热量通过热交换器中的热传递流体（如水或空气等）来传递。考虑一种熔化的相变材料：当热传递流体的温度 T_{f} 低于熔化温度（$T_{\text{f}} < T_{\text{m}}$）时，相变材料开始凝固，并将它的熔化热释放给热传递流体。考虑一种固态的相变材料：当热传递流体的温度高于熔化温度（$T_{\text{f}} > T_{\text{m}}$）时，相变材料开始熔化并储存热量。

各种相变材料在所需要的 -5 ~ 190°C的所有温度范围都是可用的，相对于传统的水等储存材料，它们每单位体积能够储存 5 ~ 14 倍的更多热量[16]。表 8.3 和表 8.4 给出了一些常用的热量储存材料的简短列表。最常见的相变材料为水合盐、脂肪酸、酯和各种石蜡（如十八烷）等。盐在混合物的化学组成成分也在变化，以达到所需要的相变温度和相变稳定性。可以在混合物中加入特殊的成核剂，以使得相变盐的分离最小化，并避免过度冷却。水合盐具有较高的体积潜热储存容量、明确的熔点、较高的熔化热和导热系数。水合盐无毒、不可燃而且经济。不过，它们可能会具有腐蚀性，而且寿命有限，大约为 10000 个循环。所有的盐基相变材料溶液必须封装以阻止水分蒸发或吸收。包装材料应该具有良好的导热能力。它应该经久耐用，足以承受相变发生时储存材料体积的频繁变化。包

装也必须能够防泄漏和防腐蚀。封装材料包括不锈钢、聚丙烯和聚烯烃等[21,25]。

表 8.3　以显热和潜热形式储存能量的各种材料的典型储存密度比较

方法/材料	kJ/L	kJ/kg	温度/°C
显热			
花岗岩	50	17	$\Delta T=20$
水	84	84	$\Delta T=20$
熔化潜热			
水	330	330	0
十二（烷）酸		178	42～44
癸酸		153	32
硬脂酸丁酯		140	19
石蜡	180	200	5～130
石蜡 C18	196	244	28
水合盐 300	300	200	5～130
盐	600～1500	300～700	300～800
蒸发潜热			
水	2452	2450	1atm 和 25°C

注：Mehling 和 Cabeza[16]

表 8.4　一些 PCM 的性质

PCM	T_m/°C	ΔH_m /(kJ/kg)	$C_{pl,av}$ /(kJ/kg K)	$C_{ps,av}$ /(kJ/kg K)	k_l /(W/m K)	k_s /(W/m K)	ρ_l /(kg/m^3)	ρ_s /(kg/m^3)
水	0	333	4.19	2.0	0.595	2.2	1000	920
正十六烷	18	235	2.1	1.95	0.156	0.43	765	835
十八烷 $CH_3(CH_2)_{16}CH_3$	28	243	2.2	1.8	0.15	0.42	775	约 900
二十烷	36.4	248	2.4	1.92	0.146	0.426	769	910
二十二烷 $CH_3(CH_2)_{20}CH_3$	44.5	196～252	约 2.5	约 1.9	0.15	0.4	778	920
石蜡	10～70	125～240	1.7	1.7	0.15	0.25	约 700	约 900

注：1. Mehling 和 Cabeza[16]。

2. T_m：熔化温度；H_m：熔化热；$C_{pl,av}$：液态时的平均热容量；$C_{ps,av}$：固态时的平均热容量；ρ_l：液态密度；ρ_s：固态密度。

石蜡（C_nH_{2n+2}）和脂肪酸（$CH_3(CH_2)_{2n}COOH$）等有机相变材料由于具有自成核性质，因此在凝固时不会出现过冷现象[19]。它们具有化学稳定性，而且还具有相对高的熔化热、安全、无电抗性与可循环回收。另一方面，它们在固态时体积潜热储存容量和导热系数较低，由此在凝结循环期间需要较高的传热

率。它们成本较高，而且在高温时可燃。有时候使用相变材料的混合物更为有利。“热复合”是用于相变材料与其他（通常是固体）结构相组合的一个术语。一个简单例子是浸入石蜡的铜网。表 8.4 为一些相变材料及其热物理性质的简短列表。例 8.2 给出了用于家庭供暖的热量储存估算。

例 8.2　热量储存的计算

一个典型的两层楼房，房顶表面积为 1260ft^2，墙壁表面积为 2400ft^2，使用以水合盐作为相变材料的太阳能储存系统供暖。目前，它的房顶隔热厚度为 6in，墙壁的隔热厚度为 1in。室温将保持在 70°F，预计室外的低温为 10°F。太阳能的平均辐照强度为 650Btu/ft^2，太阳能空气集热器的成本为 1.1 美元/ft^2。水合盐的成本约为 0.15 美元/lb。请估算水合盐与太阳能空气集热器的成本。

解：

假设墙壁和屋顶的导热系数近似为

$$k = 0.25\text{Btu/h°Fft}^2$$

太阳能的平均辐照强度为 650Btu/ft^2，太阳能空气集热器的成本为 1.1 美元/ft^2。水合盐的成本约为 0.15 美元/lb，它的熔化热为 145Btu/lb。

在目前的隔热条件下，该建筑的供暖需求如下：

来自房顶的热损失为　$\Delta x = 6/12 = 0.5\text{ft}$；$\Delta T = (10 - 70)°\text{F} = -60°\text{F}$

$$q_{\text{loss,roof}} = -kA\frac{\Delta T}{\Delta x} = -(0.025\text{Btu/h°Fft}^2)(1260\text{ft}^2)(-60°\text{F}/0.5\text{ft}) = 3780\text{Btu/h}$$

来自墙壁的热损失为（$\Delta x = 1\text{in} = 0.083\text{ft}$）

$$q_{\text{loss,wall}} = -kA\frac{\Delta T}{\Delta x} = -(0.025\text{Btu/h°Fft}^2)(2400\text{ft}^2)(-60°\text{F}/0.083\text{ft}) = 43373\text{Btu/h}$$

总热损失 = 总加热需求

$$q_{\text{loss}} = 3780\text{Btu/h} + 43373\text{Btu/h} = 47153\text{Btu/h}$$

所需的总热量储存材料为

$$m_s = (47153\text{Btu/h})(24\text{h})/145\text{Btu/lb} = 7804.0\text{lb}$$

水合盐的成本 = (7804.0lb)(0.15 美元/lb) = 1170.6 美元

满足当前供暖需求的尺寸和集热器的成本如下：

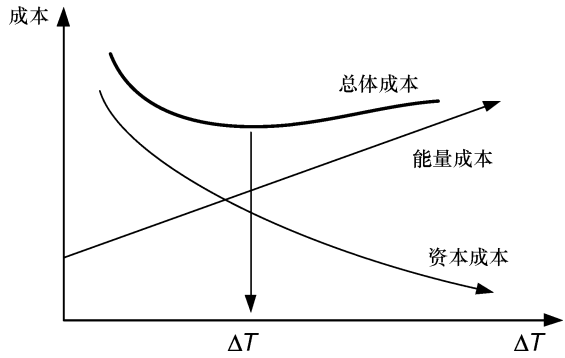
集热器的面积：(47153Btu/h)(24h)/(650Btu/ft^2) = 1740ft^2

集热器的成本：(1740ft^2)(1.1 美元/ft^2) = 1914.0 美元

太阳能获取及其储存的总成本：

总成本 = 1170.6 美元 + 1914.0 美元 = 3084.6 美元

在热能储存系统的资本成本与燃料成本这两个相反的影响因素之间妥协平衡（如下所示），可以实现最优的年度供暖成本。



随着在热、冷空间之间温差的升高，资本成本呈下降趋势，而能量（燃料）成本却随之增加了。对于一个所需的 ΔT 值，总体成本应该是最优的。

8.3.4　蓄冰储能

蓄冰储能为使用冰来储存热能。由于水的融化热很大，因此它是实用的。1t 水（$1m^3$）能够储存 334MJ 或 317000Btu 公制或 93Wh 或者 26.4t-h 的能量。冷却容量“吨（ton）”的初始定义就是 24h 融化 1t 冰所需的热量。1t HVAC 容量就是 12000Btu/h。例如，使用非高峰电力和其他类似的间歇性能源，一个小型储存装置就能够储存冷却一个大型建筑一天或一周所需的足够的冰。

8.3.5　熔盐技术

熔盐能够用来储存太阳能塔收集的热量，从而它可以被用于发电。熔盐又称为硝石，它是 60% 硝酸钠与 40% 硝酸钾的混合物（以质量计）。熔盐是不可燃的、无毒的，并且可用作化学和金属工业的热传递流体。盐在隔热的储存容器中保持为 288°C（550°F）的液体，泵流过在太阳能集热器中一个的面板，被聚焦的太阳热能加热至 566°C（1051°F）。随后，它被输送到一个隔热的储存容器中。当需要电力时，热盐被泵入传统的蒸汽机中产生过热蒸汽，供发电厂的汽轮机/发电机使用。

8.3.6　季节性热能储存

季节性热能储存将在炎热的夏季沉积的热量保下来，为寒冷的冬季供暖而用。而对于冷却降温来说，冬季则是将冷源的热能储存起来供夏季使用。通常使用太阳能集热器获取热量，尽管有时候会单独或并行使用其他能源。季节性（或“按年”）热量储存可以分为三大类：

- 低温系统使用邻近建筑物的土壤作为储热介质。在大约 20ft（6m）深处，

以一个稳定的全年温度自然地实现了“按年”储存。可以使用两种基本技术：

- 在被动季节性热能储存中，太阳能热由空间结构通过的窗户和其他表面在夏季直接获取，然后被动地通过它的地板、墙壁，有时候是通过房顶，传导给邻近的热缓冲土壤。在冬季，它再通过传导和辐射被动地返回那些空间用来降温。

- 主动季节性热能储存概念涉及：通过太阳能集热器或地热源获取热量，并将其沉积在地球或其他储存物或介质当中。热传递流体在内嵌于储存介质的“线圈”中流动，用于沉积和回收热量。

- 中温系统也使用土壤或其他热量储存介质来储存热量，不过，它是在夏季使用主动的太阳能收集机制来储存热量，并在冬季提取。太阳能集热器中的水循环，将热量传递给建筑物隔热地基下面的储存装置。在冬季，可以使用地源热泵从储存系统中提取热量。由于热泵是以中温起动，因此，它的性能系数比较高。

- 高温系统本质上是建筑物 HVAC 和水加热系统的一种扩展。通常使用水或一种相变材料作为储存介质。

季节性储存系统的优点如下：

- 季节性储存是一种可再生能源利用系统。
- 储存的热能可在数量、时间与位置等方面按需使用。
- 对于所需的应用，可以选择无毒的、无腐蚀性以及成本低的储存介质。
- 季节性热能储存所需的初始成本和维护成本相对适中。
- 热量储存系统的尺寸和容量可以根据待调温的空间大小来调节。
- 它可以被用作现有加热和冷却系统的预热器和预冷器。
- 在太阳能热水器储能期间，有可能使用水作为热传递流体，而在能量释放模式下使用空气作为热传递流体。

8.3.7　用于温室供暖的季节性太阳能热能储存

在用于温室供暖的季节性太阳能热能储存中，经常用到以下三个过程：

- 充能：充能是通过太阳能空气加热器来获取太阳能，并通过嵌于热量储存容器中的线圈，将暖空气输送到储存装置当中。

- 储存：储存过程是在一个隔热良好的热量储存容器中，使用一种相变材料以显热和潜热的形式来储存获取到的太阳能。

- 放能：另一方面，释放过程是在需要时，令冷空气流过热量储存容器来恢复储存的热能，并将暖空气直接输送给温室。

图 8.7 所示为使用石蜡作为相变材料的温室加热用季节性太阳能储存系统示意图，该系统带有一个数据采集和控制系统来启动所需的过程（比如放能过程）[3]。

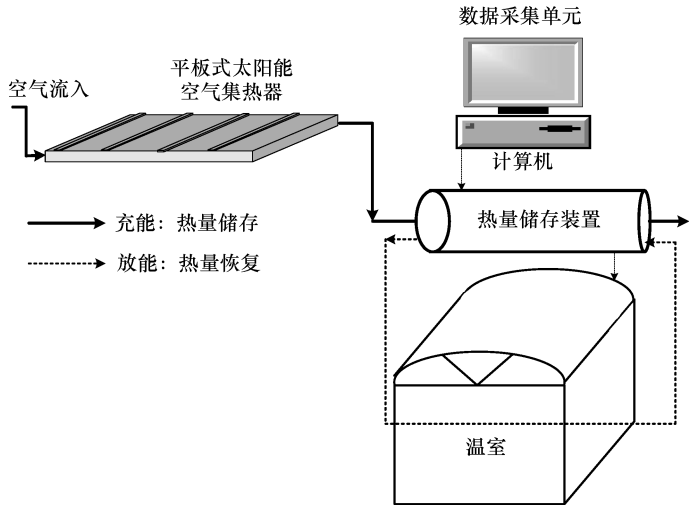


图 8.7　使用石蜡作为相变材料的温室加热用季节性太阳能储存系统示意图[5]

图 8.8 所示为在三个装置内工作的充能和放能过程：

- 装置 1：太阳能空气加热器；
- 装置 2：热量储存；
- 装置 3：温室。

使用太阳能空气集热器采集的太阳能辐照，将环境空气加热到 60 ~ 75 °C。来自太阳能集热器的暖空气，流入嵌于储存容器的螺旋线圈内，并将石蜡加热。当温室温度下降到低于 14 °C左右的设定点时，放能过程就被触发，使得来自温室的冷空气流过熔化的热石蜡，从而恢复部分潜热并将其输送给温室，直到将温度提升到所需的水平。数据采集系统控制放能过程的触发和停止。在这三个装置中，能量损失的水平各有不同。

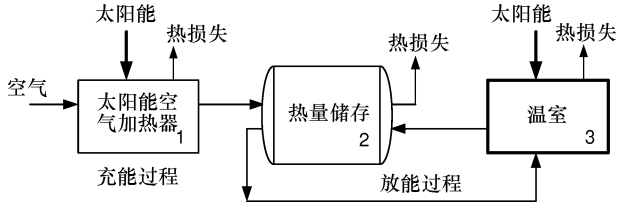


图 8.8　带有三个装置结构的季节性热能储存系统示意图：装置 1 用于捕获太阳能来加热空气并将其输送给热量储存装置；装置 2 利用石蜡的显热和潜热来储存热量；装置 3 为温室。当温室内的温度下降到低于一个设定值时，放能过程就会在温室和热量储存装置之间发生

图 8.9 所示为典型的充能与放电模式中石蜡和空气流的温度曲线图。其中，石蜡以冷固体的温度 T_{sc}开始，并以储热温度 T_{sh}结束，代表在储存装置之内冷热

的温度水平。计算热能储存时，可以假设平均温度为 T_s。m_c 为充能的空气流量，而 m_d 则为放能的空气流量，T_{ci} 和 T_{co} 分别为充能（加载）的入口温度和出口温度，而 T_{di} 和 T_{do} 则为放能（恢复）过程的入口温度和出口温度。

潜热储存系统经历的温差为（$T_{sh} - T_{sc}$）。通过太阳能集热器系列获取到的太阳能热量将由计算机估算得出：

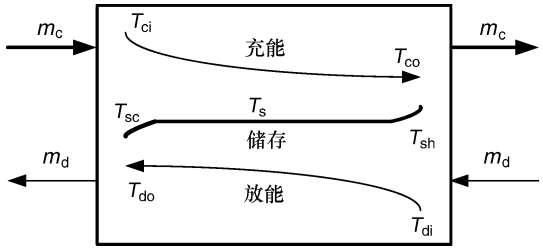


图 8.9　空气流和热量储存材料的近似温度曲线图：m_c 为充能的空气流量，而 m_d 则为放能的空气流量，T_{ci} 和 T_{co} 分别为充能（加载）的入口温度和出口温度，而 T_{di} 和 T_{do} 则为放能（恢复）过程的入口温度和出口温度。T_{sc} 和 T_{sh} 分别为冷石蜡和热石蜡的温度

$$\dot{q}_c = \dot{m}_c C_{p,av}(T_{ci} - T_{co}) \tag{8.3}$$

式中，$\dot{m}_c$ 为充能流体的流量；T_{ci} 和 T_{co} 分别为充能（加载）的入口温度和出口温度；$C_{p,av}$ 为空气的平均热容量。

获取的热量将通过充能过程传递给热量储存装置。石蜡储存的热量 q_s 为：①当固体石蜡的温度达到它的较低的熔化温度时的显热；②潜热；③当已熔化石蜡的温度达到温度 T_{sh} 时的显热。储存的热量 q_s 可以估算为

$$q_s = m_s[C_{ps,av}(T_s - T_{sc}) + \Delta H_m + C_{pl,av}(T_{sh} - T_s)] \tag{8.4}$$

式中，ΔH_m 为熔化热；T_{sc} 和 T_{sh} 为石蜡的最低熔点和最高熔点；$C_{ps,av}$ 和 $C_{pl,av}$ 分别表示固态石蜡的平均热容量和液态石蜡的平均热容量；T_s 是石蜡的平均温度，它可以近似为

$$T_s = (T_{sc} + T_{sh})/2$$

热效率为在特定的时间间隔内储存的热量与获取的热量之比：

$$\eta_s = \frac{\text{实际储存的热量}}{\text{获得的最大能量}} = \frac{\dot{q}_s}{\dot{q}_c} \tag{8.5}$$

通过放能过程恢复的热量可以估算为

$$\dot{q}_d = \dot{m}_d C_{p,av}(T_{di} - T_{do}) \tag{8.6}$$

式中，T_{di} 为来自温室的空气温度；T_{do} 为流出热量储存系统的空气温度；$C_{p,av}$ 为放能过程中的空气的平均热容量。

放能过程的热效率可以近似估算为

$$\eta_{\mathrm{d}}=\frac{\dot{q}_{\mathrm{d}}}{\dot{q}_{\mathrm{s}}} \tag{8.7}$$

所有的温度都是时间相关的，而且需要在运行期间监视充能和放能循环。例8.3给出了潜热储存的计算。

例 8.3　潜热储存的计算

使用一个太阳能系统，将60kg的相变材料十八烷从20°C加热到30°C，它的供热速率为2kW。假设十八烷被完全熔化。请估算储存装置的最小尺寸以及充能过程所需的时间。

解：

假设热能储存系统无热损失。

$T_{\mathrm{sc}}=20°\mathrm{C}$，$T_{\mathrm{sh}}=30°\mathrm{C}$，$T_{\mathrm{s}}=28°\mathrm{C}$，$m_{\mathrm{s}}=60.0\mathrm{kg}$，$\dot{q}_{\mathrm{net}}=2\mathrm{kW}$，$\dot{q}_{\mathrm{loss}}=0\mathrm{kW}$

使用来自表8.4的数据：

PCM	T_{m}/°C	ΔH_{m} /(kJ/kg)	$C_{\mathrm{pl,av}}$ /(kJ/kg K)	$C_{\mathrm{ps,av}}$ /(kJ/kg K)	k_{l} /(W/m K)	k_{s} /(W/m K)	ρ_{l} /(kg/m^3)	ρ_{s} /(kg/m^3)
十八烷	28	243	2.2	1.8	0.15	0.42	775	约900

储存的总热量为

$$q_{\mathrm{s}}=m_{\mathrm{s}}[C_{\mathrm{ps,av}}(T_{\mathrm{s}}-T_{\mathrm{sc}})+\Delta H_{\mathrm{m}}+C_{\mathrm{pl,av}}(T_{\mathrm{sh}}-T_{\mathrm{s}})]$$

$$q_{\mathrm{s}}=60\mathrm{kg}[(1.8\mathrm{kJ/kg\ K})(28-20)°\mathrm{C}+243\mathrm{kJ/kg}+(2.2\mathrm{kJ/kg\ K})(30-28)°\mathrm{C}]=15708\mathrm{kJ}$$

$V_{\mathrm{tank}}=m/\rho_{\mathrm{s}}=60\mathrm{kg}/(775\mathrm{kg/m^3})=0.08\mathrm{m^3}$

能量平衡：提供的能量 = 储存的能量 + 能量损失

能量损失 = 0；$\dot{q}_{\mathrm{net}}=2\mathrm{kW}$

提供的能量 $=(\dot{q}_{\mathrm{net}})(\Delta t)=q_{\mathrm{s}}=15708\mathrm{kJ}$

$$\Delta t=7854\mathrm{s}=2.2\mathrm{h}$$

显热的贡献为

$$q_{\mathrm{s}}=60\mathrm{kg}[(1.8\mathrm{kJ/kg\ K})(28-20)°\mathrm{C}+(2.2\mathrm{kJ/kg\ K})(30-28)°\mathrm{C}]/15708\mathrm{kJ}$$

$$q_{\mathrm{s}}=(864+264)\mathrm{kJ}/15708\mathrm{kJ}=0.055+0.017$$

显热的贡献为：固态5.5%，液态1.7%。因此对于热量储存的主要贡献来自十八烷的潜热。充能过程需要2.2h来提供所需的15708kJ的热量。

8.3.8　地下热能储存系统

地下热能储存（UTES）能够储存大量的低温热能，用于空间供暖和降温以

及预加热和预冷却。常用的能源包括冬季环境空气、热泵废水、太阳能与过程热等。UTES 可以为建筑物或过程提供所有的或部分的加热与（或）冷却需求。可以使用热泵来降低或提高用于冷却或者加热的储存温度。地下热能可以储存能量（这是主动式收集），或者储存废弃物，或者副产能量，它称为双重储存，而且可能会更为经济[1]。UTES 包括地下含水层热能储存（ATES）和地埋管热能储存（BTES）系统。下面各节将简要地讨论这些系统。

8.3.9　地下含水层热能储存

地下含水层是位于地下的地质构造，而且会含有砾石、沙子或者岩石等。ATES 可以供短期或长期使用，因为：

- 局部储存的唯一的能量来源；
- 温度适合直接应用；
- 与一个除湿系统组合，比如干燥剂冷却。

所提供的冷贮水通常为 2 ~ 5 °C，冷却功率的范围通常是从 200kW ~ 20MW，而且储存的冷却能量为 29GWh。现在，地下蓄冷在有些国家（如瑞典）是一个标准设计选项。储存时间取决于当地气候和建筑与（或）过程的类型。

ATES 广泛应用于各种应用系统，比如温室供暖等。在夏季，温室被地下水冷却，该地下水抽自一个作为冷源的地下含水层。这样会将抽出来的水加热，然后再储存于地下含水层系统之中。在冬季，温水被抽上来加热温室。现在已冷却的水被输送回冷源。对于温室来说，使用热泵进行的冷量和热量储存组合具有一个额外的好处，因为它可以与加湿联合进行。在封闭的循环系统中，热水被储存于一个地下含水层中，而冷水则被储存于另一个含水层中。水可以用于加热或冷却风扇所吹动的空气。这样的系统能够完全实现自动化。

由于使用 ATES 的温度和压强变化而带来的地下水的化学变化，可以引起运行和维护问题。这些问题是可以避免和可以管理的。在实践中，推荐采用冲洗来维持优良的效率。在使用地能热泵和 UTES 方面，潜在的环境关注如下：

- 热交换器的流体可能会泄漏到自然环境中；
- 对地下水质的热诱导生化效应影响；
- 化学污染和热污染所带来的生态危机；
- 外部污染物进入地下水。

所有这些和其他可能的问题都已在 UTES 系统的规划、建设与运行的指南和标准之内列出[17]。

地源热泵系统能够显著地降低加热和冷却运行成本，而且能够满足可持续建筑评价程序中的可再生能源信用的资格要求。一项研究[1]表明，低于 65% 的能源降耗可以使用现有技术以合理的成本实现，而且热泵支持的 UTES 能够为达到

这些降耗目标发挥重要的作用。表 8.5 给出了不同类型的 UTES 应用的性能。

表 8.5　UTES 应用的四种类型及其典型性能

应　　用	能源（%）	回收期①/年	COP②
直接加热和冷却	90 ~ 95	0 ~ 2	20 ~ 40
使用热泵来加热和冷却	80 ~ 87	1 ~ 3	5 ~ 7
仅用热泵加热	60 ~ 75	4 ~ 8	3 ~ 4
仅用直接冷却	90 ~ 97	0 ~ 2	20 ~ 60

注：Andersson[1]。

① 回收是为以年为单位的完全回收成本投资的时间。

② COP 为性能系数。

8.3.10　地埋管热能储存

地埋管热能储存（BTES）应用涉及地埋管的使用，通常是 5 ~ 200m 深，而且是闭环运行，其中，在自然地下水与热交换器流体之间并无接触。通常，一个 BTES 包括一个或多个内含地埋管式热交换器的地埋管，比如 U 形管道，废弃能量（热或冷）通过它循环并传递给地面用于储存。典型地，BTES 会与通常带有热泵的加热和冷却系统联合应用，以期更好地利用储存的低温热量。例如，在瑞典有 300000 多根地埋管，为所有的空间供暖需求提供大约 27% 的热量[1,7]。

在一个太阳能集成应用中，经太阳能加热的水被泵入一个 BTES 系统中，该系统包括 144 根地埋管，每根都是 37m（121ft）深，运行时地面温度约为 90°C（194°F）。在冬季，热水从 BTES 系统通过分配网络流入各个房间。一旦进入房间，它就会流过一个带有线圈装置的热交换器，空气会被吹向该交换器。由此，热空气就会将房间加热。每个房间也都有一个独立的太阳能热系统，安装在房顶的斜坡上，提供家用热水。这种系统的太阳能指数为 90%，它意味着社区内供暖和热水所需的能量 90% 由太阳能来提供。由此一来，每个房间每年将会减少 5t CO_2 排放。

8.4　电能储存

电容是一个电荷储存装置，用作电系统的一部分。图 8.10 所示为一个电容的平板模型。电容的实际形式变化多端，不过，任何电容都至少要包含由一个非导体隔离开的两个导体。例如，某种电容包含通过绝缘膜层而隔离的金属箔。当一个电势差（电压）穿过导体时，就会穿透绝缘体建立静电场，从而正电荷就会被收集在一个板上，而负电荷则会被收集在另一个板上。能量储存于静电场之中。一个理想电容是以一个常量值来表征的，这个值称为电容，度量单位为 F。

电容为之比为每个导体上与它们之间电势差之比。电容可被用于产生高强度的能量释放，比如照相机的闪光灯等。

绝缘体（dielectric）就是一个模制的电绝缘体。绝缘体介质可以是玻璃、空气、纸、真空，甚至是化学成分上与导体相同的半导体耗尽区。假定一个电容是独立而且隔离的，没有净电荷，也没有来自任何外部电场的影响。这样，导体就在它们的相对面上保持了相同数量的异性电荷，并与绝缘体建立了一个电场。在国际单位制中，1F 电容意味着每个导体上的 1C 电荷穿过装置引起 1V 的电压。在实践中，两板之间的绝缘体会有一个小的漏电流，而且也有电场强度极限，导致击穿电压的产生。

电容是用于电路内电场的一个相当通用的模型，如图 8.11 所示。一个理想的电容完全可以用常量电容 C 来表征，其定义为每个导体上的电荷 $\pm Q$ 与它们之间的电压 V 之比：

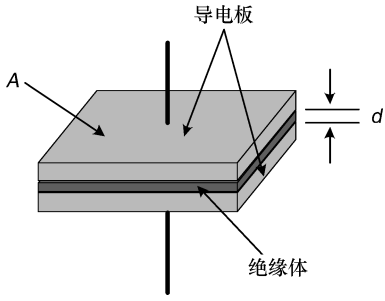


图 8.10　一个电容的平行板模型。电容随面积的增大而升高，随着分离距离的增大而降低。A 为电容的表面积，d 为绝缘体的厚度

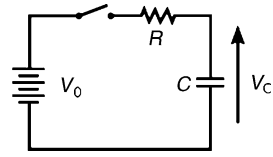


图 8.11　一个简单的展示电容充电过程的电阻-电容电路

$$C = \frac{Q}{V} \tag{8.8}$$

在导体之间运输电荷，必须由外界影响因素来做功。当外界影响消除时，电场中的电荷分离仍然存在，能量就被储存起来。当电荷被允许返回至其平衡位置时，能量就被释放出来。建立电场所做的功以及因此所储存的能量值，可以表示为

$$W = \int_0^Q V\mathrm{d}Q = \int_0^Q \frac{Q}{C}\mathrm{d}Q = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}VQ \tag{8.9}$$

当电容与电源电压达到平衡时，电阻两端的电压和通过整个电路的电流就会指数衰减。充电电容的放电就展示了指数衰变过程。

电容随面积的增大而升高，随着分离距离的增大而降低。因此，材料介电常数高、板面积大而且板间距离小的装置，其电容最大。最大能量是绝缘体体积、

介电常数以及单位距离上的绝缘体强度的一个函数。因此，增大板的面积以及减小板间的分离距离而维持相同的体积，并不会改变电容能够储存能量值[14]。

双电容就是电感器，它是在磁场而不是电场中储存能量。电感器包括聚集磁场并收集感生电压的线圈。产生的电压与电路中电流的变化率成正比，而且该比例系数即电感 L，在国际单位制中的单位为 H：

$$V = L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \tag{8.10}$$

8.4.1　水电能储存

抽水蓄能水电是一些发电厂用于负荷平衡而使用的一类水电发电。将 1kg 的质量提升至 1000m 能够储存 9.8kJ 的能量。抽水蓄能水电以水的形式来储存能量，将水从海拔较低的蓄水库泵到海拔较高的蓄水库中。泵的运行使用的是低成本的非高峰电力。将储存的水释放出来，通过水轮机来产生电力。虽然抽水过程的损失使得发电站总体上成为了净消费者，但是，当电力价格最高时，系统通过在峰值需求期间销售更多的电力，提高了销售收入。例 8.4 给出了在一个水电站中通过抽水而储存的电能。

例 8.4　水电站抽水能量

满足额外的高峰用电需求的一种方法是，在需要时或者电的成本较低时，将一部分水从水源（比如一个湖泊）抽到较高的水电站蓄水库中。考虑一个水电站蓄水库，其储能容量为 $0.5\times10^6\mathrm{kWh}$。这些能量被储存于地平面以上 40m 高的蓄水库中。请估算被泵回蓄水库的最小水量。

解：

假设水的蒸发可以忽略不计。

$$\mathrm{PE} = 0.5\times10^6\mathrm{kWh},\ \Delta z = 40\mathrm{m},\ g = 98\mathrm{m/s^2}$$

水的潜在势能功：$\mathrm{PE} = mg\Delta z$

水量：$$m = \frac{\mathrm{PE}}{g\Delta z} = \frac{0.5\times10^6\mathrm{kWh}}{9.8\mathrm{m/s^2}(40\mathrm{m})}\left(\frac{3600\mathrm{s}}{\mathrm{h}}\right)\left(\frac{1000\mathrm{m^2/s^2}}{1\mathrm{kJ/kg}}\right)$$

$$= 4.59\times10^9\mathrm{kg}$$

8.4.2　电池中的电能储存

一个电池是一个或多个能够以化学能的形式储存电能并将所储存的化学能转换为电能的电化学电池。亚历山大·伏特（Alessandro Volta）在 1800 年发明了第一个电池。电池有各种规格，比如微型电池和小汽车电池灯，如图 8.12 所示。图 8.12 给出了用于电路图的电池符号以及电池的不同类型。电池有两类：一次

电池，它们是一次性的，设计使用 1 次后废弃；二次电池，它是可充电的，设计可以充电并多次使用。可充电电池可以通过提供给电池的电能实现可逆的化学反应（见图 8.12f）。



a)　b)　c)　d)　e)　f)

图 8.12　电池的不同类型

a）电路图中的电池符号　b）9V 电池　c）1.5V 电池

d）可充电小汽车电池　e）锂电池　f）电池充电器

锌-碳电池和碱性电池是常用一次性电池类型。通常，这些电池比可充电电池具有更高的能量密度。因此，可充电电池能以化学能的形式储存电能。例如，它们可以被用于在电池中储存电能，供电动小汽车使用。电动小汽车的电池能够从电网充电。由于它储存的能量来自电力，因此，电动小汽车有可能使用其他形式的替代能量，比如风能、太阳能、地热能、核能或者水电能等[13]。

最早的可充电电池形式是用于小汽车的铅酸电池。铅酸电池制造成本低，而且浪涌电流水平（450A）高，因此常用于需要大容量（几乎超过 10Ah）的场合。电池的阳极是铅金属，而阴极由是铅（IV）氧化物做成。在放电期间，发生在阳极（负电极）上的化学反应为

$$Pb(s) + SO_4^{-2}(aq) \rightarrow PbSO_4(s) + 2e^- \tag{8.11}$$

发生在阴极（正电极）上的化学反应为

$$PbO_2(s) + SO_4^{-2}(aq) + 4H^+(aq) + 2e^- \rightarrow PbSO_4(s) + 2H_2O(l) \tag{8.12}$$

在放电期间，硫酸被消耗完毕，而且硫酸铅沉积在两个电极上。当电极完全被硫酸铅所覆盖时，电池就“失效”了。在充电期间，发生在阳极上的化学反应为

$$PbSO_4(s) + 2H_2O(l) \rightarrow PbO_2(s) + SO_4^{-2}(aq) + 4H^+(aq) + 2e^- \tag{8.13}$$

发生在阴极上的化学反应为

$$PbSO_4(s) + 2e^- \rightarrow Pb(s) + SO_4^{-2}(aq) \tag{8.14}$$

让一个电流通过电池，就可以实现对该电池的充电。充电将两个反应逆转，并导致硫酸再生，并将硫酸铅从电极去除。铅酸电池不应被放电至低于它们全部容量的 20%，因为当它们在充电时，内部电阻将会产生热量和带来破坏。

8.4.3　用于电动小汽车的可充电电池

电动小汽车使用一组车载电池，通常是锂离子电池，为电动机提供电能。阳极、阴极与电解质的材料选择决定了锂离子电池的性能、安全性与寿命。锂离子电池（见图 8.13）的重量较轻。许多电动小汽车使用锂离子电池，它包含在钴和氧原子组合而成的板片之间隔离的锂层[15,26]。

电动小汽车使用的电池必须能通过外部能量来源来充电。充电时间取决于电池的类型和容量以及它们的充电插座类型。一个标准的 120V 插座能够提供大约 1.5kW/h 的充电能力。如果把它插入一个 240V 电路当中，每小时则能充电 6.6kW 左右，从而大大地缩短了充电时间。在计算效率时，必须要考虑这个因素[10,22]。



图 8.13　电动小汽车用锂离子电池[15,26]

小汽车的电池寿命测量是使用循环次数，而不是行驶的时间或距离。一次电池循环是一次充电和一次放电，而且，由于电池如何使用和如何充电能够影响它的寿命，因此，循环次数通常被表示为一个范围。考虑用于电动小汽车和通用目的电池种类繁多[10,15,26]：

- 镍镉（NiCd）电池是供电动工具、便携式电子产品以及电子玩具使用的可充电电池。它们全部使用 NiCd 电池，由于这种电池的寿命长、成本低。这种电池的能量/重量比为 40 ~ 60Wh/kg（瓦特 · 小时/千克），寿命为 1000 ~ 2000 次循环，因此是一种低成本能源。
- 镍氢（NiMH）电池的能量/重量比比 NiCd 更优，可以达到 30 ~ 80Wh/kg，而且不含有毒元素镉。镍氢电池的寿命为 800 ~ 1000 次循环。低容量的镍氢电池（1700 ~ 2000mAh）能够循环充电 1000 次左右，而高容量 NiMH 电池（高于 2500mAh）则能够循环充电 500 次左右。
- 锂离子电池可以为笔记本电脑或其他依靠电池供电的消费电子产品提供电能。这些电池的能量/重量比可以高达 100 ~ 160Wh/kg，因而被大多数高能量/低重量的应用所选用。锂离子电池的寿命约为 1200 次循环。

标准混合动力车辆通过添加额外的电池容量和充电容量提高了燃料效率。因而，插电式（Plug-in）车辆运行使用的能量是来从电网而不是汽油。电动机比内燃机更为有效，不过，许多电力都来源于煤，与石油相比，它的热效率较低，而碳/能量比又较高。这要由车载计算机来确定，何时使用燃料、电力或者液体燃料（石油或生物燃料）效率最高[26]。

混合动力车辆可以通过三种方式来提高效率。首先，汽油发动机尺寸可以略小，因此能够运行于更有效的范围当中，因为电动机能够在需要时为发动机提供补充。其次，汽油发动机能够在低效运行时停机，特别是在停车空挡和低速时。最后，它使得通过将车辆的部分动能转化成电能实现再生制动，该电能是由电动机充当发电机和充电电池来产生的[23]。

在插电式混合动力车辆中，使用大型电池组来取代小电池。该混合车辆同时使用电能和汽油驱动，而且能插入标准的家用电压插座。车辆采用车载控制来选取合适的能量来源以实现最大效率。插电式混合动力车辆使用适中的电池组，能够主要依靠储存的能量驱动电动机来运行（约为 20mile/天），从而减少了汽油的使用[22]。

8.5　化学能储存

来自电子传递循环的可用自由能用于产生流过线粒体内膜的质子，进而在活细胞中合成三磷酸腺苷（ATP）。ATP 是一种富含能量的化合物，具有三个附属于腺嘌呤核苷（腺嘌呤 + 戊糖，即腺苷）的磷酸盐基。在这三个磷酸盐基中，末端的磷酸盐基有一个弱键。在 ATP 与酶形成一个复合物时，这个磷酸盐基能够自发地断裂。这个键的断裂会释放化学能，引起键能量的直接转移从而生成了二磷酸腺苷。ATP 生成因此成为了活细胞的化学能储存器[6,16]。

在植物中，ATP 用于合成碳水化合物的生化循环（比如利用二氧化碳和水合成葡萄糖）。葡萄糖主要以淀粉颗粒的形式储存起来，淀粉颗粒中包含了大量的葡萄糖单元。这种多糖是所有的绿色植物作为化学能储存而产生的。淀粉加工过程中，产生了加工过的食品中的许多糖类。

生物电池从糖中产生电能的方式类似于在生物体中观测到的过程。电池使用酶来产生电能，这些酶能够分解碳水化合物（它们基本上是糖）。一个类似的含糖饮料的设计能够为一个手机供电，它使用酶从能够满足手机耗电所需能量的碳水化合物中产生电能[12]。

8.5.1　生物能源

碳水化合物、脂肪和蛋白质是生命系统的主要代谢燃料（能量来源）。这些燃料氧化所释放的化学能被储存为富含能量分子（比如活细胞中的 ATP）。主要的代谢燃料的含能量如下：

- 碳水化合物大约释放 4kcal/g（17kJ/g）；
- 脂肪大约释放 9kcal/g（37kJ/g）；
- 蛋白质大约释放 4kcal/g（17kJ/g）。

在人体中，过量的能量主要被储存如下：

- 脂肪甘油三酯（甘油三酸酯）：甘油三酯是身体的主要能量储存。
- 糖原：通过糖原储存的能量相对较小，但是它非常关键。例如，肌糖原被氧化用于肌肉的收缩。

代谢是发生在生物体内以维持生命的一组生物化学反应。代谢包含分解代谢与合成代谢两个途径。在分解代谢中，有机物质被破坏，例如去收集细胞呼吸中的能量。在合成代谢中，能量用于构造蛋白质和核酸等细胞成分。每日的能量消耗为每天所需的能量值，包括基础代谢和身体活动所需要的能量。一个人每天的基础代谢率大约为每千克体重 24kcal（101kJ）[9]。

8.5.2 生物燃料储能

各种不同的生物燃料或者生物质，能够有助于减少烃类（即碳氢化合物）燃料的使用。一些化学过程（比如费托合成）能够将煤、天然气、生物质与有机废弃物中碳和氢转换为合适的短烃，替代现有的烃类燃料。许多烃类燃料具有可直接用于现有发动机技术和现有燃料分配基础设施的优势。油价长期走高使得这种合成液体燃料的大规模生产非常经济，尽管原始能源在转换过程会有一些损失[8]。

在另一种能源的帮助下（最好是可再生能源），二氧化碳和氢气可以被转化成甲烷和其他烃类燃料。由于氢气和氧气产生于水的电解过程中：

$$2H_2O \longrightarrow 2H_2 + O_2 \tag{8.15}$$

然后，在生成甲烷和水的萨巴蒂埃（Sabatier）反应中，氢气将会与二氧化碳发生反应：

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \tag{8.16}$$

生成的水将会再循环回到电解阶段，降低了对新的纯水的需要。在电解阶段，氧气将也被储存用于甲烷在纯氧气环境下的燃烧（排出氮氧化物）。在甲烷燃烧过程中，将会生成二氧化碳和水：

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O \tag{8.17}$$

生成的二氧化碳将会再循环回到萨巴蒂埃（Sabatier）过程。甲烷的生成、储存以及紧接着的燃烧将会令所有的反应产物实现再循环，从而创造了一个新的循环。

甲烷是最简单的烃类，分子式为 CH_4。甲烷比氢气更易储存，而且运输、储存和燃烧基础设施等技术都已经非常成熟。甲烷将被储存起来并随后用于发电。除此之外，也可以使用二氧化碳和氢气来合成甲醇。如果氢气是通过使用风力发电的电能电解生成的，那么，电能就可以通过甲烷或甲醇而储存起来。

8.5.3　伏特电池中的能量储存

每个伏特电池包含两个半电池，这两个半电池是通过含有阴离子和阳离子的导电电解质串联的。一个半电池包括电解质和正电极（称为阴极）。带负电荷的离子（称为阴离子）迁移到阴极。另外的半电池包括电解质和负电极（称为阳极）。带正电荷的离子（称为阳离子）迁移到阳极。在驱动电池的氧化还原反应中，阳离子在阴极被还原（得到电子），而阴离子则在阳极被氧化（失去电子）。电极相互不接触，但是通过电解质实现电连接。图 8.14 所示为一个铜-锌电池的半电池。

在一个铜-锌电池中，锌失去电子的趋势要强于铜。当两个电池通过一个盐桥和一个电导体连接（见图 8.15）以形成电子和离子流动的封闭电路时，铜离子（Cu^{2+}）实际上是获得电子变为铜金属。电子流过连接电极的电导体，而离子则是流过盐桥。电池的总反应为

$$Zn + Cu^{2+} = Zn^{2+} + Cu \tag{8.18}$$

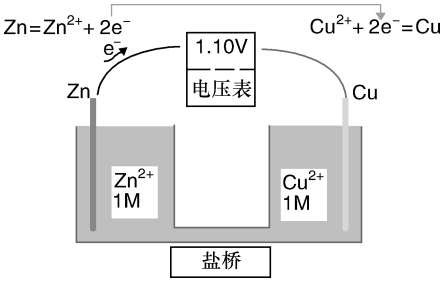


图 8.14　一个铜-锌电池的半电池-铜锌伏特电池。根据反应，Zn 电极失去电子，因此它是阴极：$Zn = Zn^{2+} + 2e^-$

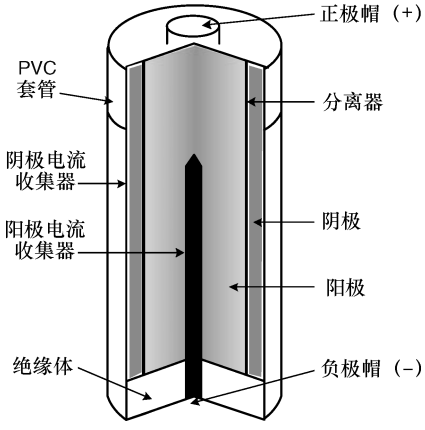


图 8.15　干电池示意图[13]

电池的净电动势为半反应减少的势能之差。一个电池的电驱动力称为端电压（ΔV），测量单位为 V。一个理想的电池的内部电阻可以忽略不计，因此它将维持一个恒定的端电压直到电能耗尽。如果这种电池的电压维持在 1.5V，而且储存的电荷为 1C，那么到完全放电为止，它做的功为 1.5J。一个电池是多个电化学电池的集合，例如，一个 1.5V AAA 电池是单个 1.5V 电池，而一个 9V 电池则是六个 1.5V 电池串联（见图 8.12）。

其他的便携式可充电电池包括几种“干电池”，这类电池使用糊状物来替代液体电解质，因此可用于手机和笔记本电脑等用电设备中。这种类型的电池包括镍镉（NiCd）、镍氢（NiMH）以及锂离子（Li-ion）电池等。锂离子电池占据了可充电干电池市场的最大份额。同时，由于 NiMH 的容量较高，它已经在大多数应用中取代了 NiCd，但是 NiCd 仍然用于电动工具、收发两用无线电设备以及医疗设备当中。图 8.15 所示为一个干电池的主要各层[13]。

电池上印的电池容量通常为 20h 乘以新电池在 68°F（20°C）时能够提供 20h 的最大恒流之积，下至每个电池的预设端电压。在室温下，一个额定容量为 100Ah 的电池能够在 20h 内提供 5A 电流。对于一个铅酸电池来说，电流、放电时间与容量之间的关系可以通过普克特（Peukert）定律近似表示为

$$t = \frac{Q_B}{I^k} \tag{8.19}$$

式中，Q_B 为放电率为 1A 时的容量；I 为从电池中拉取的电流；t 为电池能够维持的时间（h）；k 是一个约等于 1.3 的常量。

当电池的放电率较低时，其能量传输要比较高的放电率时效率更高，不过，如果放电率太低，在长时间运行期间，它将会出现自放电现象，进一步降低了它的效率。钠硫电池正被用于储存风力发电的电能[13]。

8.6 机械能储存

能量也可以储存于加压气体或者真空当中。例如，可以使用压缩空气来驱动车辆和动力工具。大规模的压缩空气储能（CAES）设备可以在用电高峰期间提供能量，并在非高峰期间储存能量，用于补充发电需求。这种系统节省了昂贵的发电容量，因为它只需要满足平均消耗[2]。

8.6.1 压缩空气储能

CAES 技术在一个地下容器中以压缩空气的形式储存低成本的非高峰能量。然后，压缩空气在高峰负荷期间释放出来，并使用标准燃气轮机的废热来加热。这种加热过的空气被转化成能量，通过膨胀汽轮机实现发电。能量储存系统经常使用大型地下洞室，因为它们的容积非常大，进而能够在压强变化很小的情况下储存大量能量。洞室空间能够在温度变化和热损失很小的情况下绝热压缩。CAES 也可以实现小规模应用，比如用于气动汽车和气动机车等。使用隔离二氧化碳的 CAES 应用系统也可能用于能量储存。

空气压缩会产生热量，并使空气变热。如果不加入额外的热量，空气温度在减压之后将会非常低，它需要热量。如果在压缩期间产生的热量能够被储存并在

减压期间再次使用，就会显著地提高储存效率。CAES 能够通过绝热、非绝热或者等温线性过程而实现：

- 绝热储存将压缩产生的热量保存起来，并在气体膨胀产生功率时返回到空气当中。热量可以被储存在流体当中，比如热油（高达 300°C）或熔盐溶液（600°C）等。
- 非绝热储存使用中冷器（由此接近等温压缩）将额外的热量作为废热排放到大气当中。当从储存中恢复时，空气必须在汽轮机中膨胀之前重新加热来驱动一台发电机，这需要通过一个天然气发电燃烧炉来实现。
- 等温压缩和膨胀方法试图通过与环境的恒热交换来维持其运行温度。它们只适用于低功率水平，而且损失一些热量是不可避免的。压缩过程并不是精确地等温，而且会损失一些热量。

一个等温过程的理想气体定律为

$$PV = nRT = 常量 \tag{8.20}$$

$$W_{AB} = nRT\ln(V_B/V_A) = nRT\ln(P_A/P_B) \tag{8.21}$$

式中，A 和 B 表示系统的初始状态和最终状态；W 表示能够储存或释放的最大能量。

在实践中，任何过程在等温条件下都不是完全理想的，而且压缩机和发动机将会有热量损失。压缩空气能够以很高的通量率来传递功率，它满足交通运输系统（特别是混合动力车辆）的主要加速和减速目标要求。例 8.5 和例 8.6 给出了通过压缩空气储存机械能的简单分析。

例 8.5　空气压缩的最大储能量

如果在 300K 的等温条件下，将 1450kg 空气从 100kPa 压缩到 1200kPa，热损失为 24000kJ。请确定其最大有效能。

解：

假设空气为理想气体。

$$\mathrm{MW} = 29\mathrm{kg/kmol}, R = 8.314\mathrm{kJ/kmol\ K},$$

$$P_1 = 100\mathrm{kPa}, P_2 = 1200\mathrm{kPa}, m = 1450\mathrm{kg}$$

$$空气的摩尔数 = 1450/29 = 50\mathrm{kmol}$$

储存的机械能为

$$W_{max} = -nRT\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = -(50\mathrm{kmol})(8.314\mathrm{kJ/kmol\ K})$$

$$(300\mathrm{K})\ln(100/1200) = 309892.7\mathrm{kJ}$$

$$q_{loss} = 24000\mathrm{kJ}$$

待储存的净能量为

$$W_{max} - q_{loss} = (309892.7 - 24000)\,kJ = 285892.7\,kJ = 285.9\,MJ$$

例 8.6　大型洞室内空气压缩的最大储能量

使用一个地下洞室来储存压缩空气的能量。如果洞室的容积为 29000m^3，在 300K 的等温条件下，将空气从 100kPa 压缩到 1500kPa，热损失为 55000kJ，请确定其最大有效能。

解：

假设空气为理想气体。洞室空间为理想气体和标准温度和压强（25 °C 和 1atm）条件。

$$MW = 29kg/kmol, R = 8.314kJ/kmol\ K, P_1 = 100kPa, P_2 = 1500kPa$$

在理想气体和标准温度及压强（25 °C 和 1atm）条件下：

1mol 空气的体积为 22.4L，1kmol 空气的体积为 2.24×10^4L

$$容积 = 29000m^3 = 2.9 \times 10^7 L$$

$$空气摩尔数近似 = 2.9 \times 10^7 L / 2.24 \times 10^4 L = 1294.6kmol$$

储存的能量为

$$W = -nRT\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

$$= -(1294.6kmol)(8.314kJ/kmol\ K)(300K)\ln(100/1500) = 8744270.6kJ$$

$$q_{loss} = 55000kJ$$

待储存的净能量 = $W_{max} - q_{loss}$ = 8689270.6kJ 或 8689.3MJ

8.6.2　飞轮储能

飞轮储能的工作原理是将一个转子（飞轮）加速到很高的速度并将系统能量维持为旋转能量。当从系统中提取能量时，根据能量守恒定律，飞轮的旋转速度就会随之下降。大多数飞轮储能系统使用电能来实现飞轮的加速和减速，不过，也有直接使用机械能的装置。先进的飞轮储能系统具有由高强度碳纤维制成的转子，该转子使用磁轴承悬挂，在真空外壳内的旋转速度可以达到 20000～50000r/min。

8.6.3　液压蓄能器

液压蓄能器是一种能量储存装置，其中，不可压缩液压流体由外部压力源来保持压强。这些外部压力源可以是弹簧、提升的重物或者压缩气体。该蓄能器用于液压系统当中，因此液压泵并不需要大到足以满足极端需求。而且，供应回路能够更快地响应任何瞬时需求并能够平滑脉动。压缩气体蓄能器是最常见的类型。这些也被称为液气蓄能器。

8.6.4　弹簧

弹簧是一种用于储存机械能的弹性材料装置。当弹簧被压缩或拉伸时，施加的外力与它的长度变化成正比。一个弹簧的弹性系数等于施加外力的变化除以弹簧挠度的变化。拉伸弹簧或者压缩弹簧的单位是力除以距离，例如 lbf/in 或 N/m。并联弹簧的刚度（或刚度值）是可叠加的，串联弹簧的柔顺性也是如此。根据设计和运行所需，任何材料可以被用于构造一个弹簧，只要该材料具有所需的刚度和弹性组合。

习　　题

8.1　① 将 $6m^3$ 的水和 $6m^3$ 的花岗岩从 20°C加热到 40°C，请估算其显热储存量。

② 将 500lb 水从 20°F加热到 30°F，请估算其储存的热量。

8.2　① 将 $1.1m^3$ 的道氏热媒 A（DowthermA）和 $1.1m^3$ 的导热油 66 从 20°C加热到 240°C，请估算其显热储存量。

② 将 500lb 的熔盐从 150°C加热到 300°C，请估算其储存的热量。

8.3　① 将 $2.5m^3$ 的 50% 乙二醇和 50% 水的混合物以及 $2.5m^3$ 的水从 20°C加热到 65°C，请估算其显热储存量。

② 将 1500lb 的抽盐从 250°C加热到 400°C，请估算其储存的热量。

8.4　一个典型的两层楼房，房顶表面积为 $1260ft^2$，墙壁表面积为 $2400ft^2$，使用以水合盐作为相变材料的太阳能储存系统供暖。目前，它的房顶隔热厚度为 6in，墙壁的隔热厚度为 1in。室温将保持在 70°F，预计室外的低温为 10°F。太阳能的平均辐照强度为 $300Btu/ft^2$，太阳能空气集热器的成本为 1.5 美元/ft^2。水合盐的成本约为 0.2 美元/lb。请估算水合盐与太阳能空气集热器的成本。

8.5　一个典型的两层楼房，房顶表面积为 $1200ft^2$，墙壁表面积为 $2200ft^2$，使用以水合盐作为相变材料的太阳能储存系统供暖。目前，它的房顶隔热厚度为 6in，墙壁的隔热厚度为 1in。室温将保持在 70°F，预计室外的低温为 10°F。太阳能的平均辐照强度为 $350Btu/ft^2$，太阳能空气集热器的成本为 1.4/美元 ft^2。水合盐的成本约为 0.22 美元/lb。请估算水合盐与太阳能空气集热器的成本。

8.6　使用热能储存系统将房间从 15°C加热到 25°C。房间的大小为 $(4\times4\times5)m^3$。室内空气为大气压。房间的热损失可以忽略不计。如果这个温度变化的熔化热来自所储存的能量，请估算所需的正十六烷的数量。

8.7　使用热能储存系统将房间从 12°C加热到 27°C。房间的大小为 $(4\times5\times5)m^3$。室内空气为大气压。房间的热损失可以忽略不计。如果这个温度变化的熔化热来自所储存的能量，请估算所需的正十八烷的数量。

8.8　使用热能储存系统将房间从 14°C加热到 24°C。房间的大小为 $(5\times5\times5)m^3$。室内空气为大气压。房间的热损失可以忽略不计。如果这个温度变化的熔化热来自所储存的能量，

请估算所需的石蜡的数量。

8.9　一个房间大小为（5×5×6）m^3，使用热能储存系统来加热，加热率为80kJ/h。房间的热损失为2kJ/h。气体的最初状态为15°C。请估算将房间加热至24°C所需的时间。

8.10　使用一个0.50kW的太阳能热能储存系统来加热房间，房间大小为（3.0×4.5×4.0）m^3。房间的热损失为0.15kW，压强始终为大气压。室内空气可以假设为理想气体。空气的恒定热容量 $C_{v,av}$ =0.72kJ/kg°C。初始室温为15°C。请确定加热30min之后房间的温度。

8.11　使用热能储存系统对一个60m^3的房间进行加热。室内空气的初始状态为12°C和100kPa。房间的热损失率为0.2kJ/s。如果热能储存系统提供的热能为0.8kW，请估算室温达到22°C所需的时间。

8.12　过热蒸汽以0.6lb/s的流速流过加热器。蒸汽为100psia和380°F。如果热量储存系统为恒压条件下的蒸汽提供的热量为37.7Btu/s，请估算该蒸汽的最终温度。

8.13　过热蒸汽以0.9lb/s的流速流过加热器。蒸汽为100psia和380°F。如果热量储存系统为恒压条件下的蒸汽提供的热量为25.4Btu/s，请估算该蒸汽的最终温度。

8.14　使用一个热能储存系统对20kg的水进行加热，盛水的容器隔热良好。储存系统的供热速率为1.5kW。容器中水的最初温度为10°C。请估算水温达到50°C所需的时间以及熔化热为200kJ/kg的水合盐量。

8.15　使用一个热能储存系统对120kg的水进行加热，盛水的容器隔热良好。储存系统的供热速率为1.5kW。容器中水的最初温度为15°C。请估算水温达到50°C所需的时间以及熔化热为235kJ/kg的正十六烷的数量（见表8.4）。

8.16　使用一个热能储存系统对150kg的水进行加热。热量以石蜡潜热的形式进行储存。储存的供热速率为2.3kW。从容器到外界环境的热损失为0.35kW。容器中水的最初温度为20°C。请估算水在加热2h之后的温度以及所需的石蜡量。

8.17　使用一个热能储存系统对50kg的水进行加热。热量以石蜡潜热的形式进行储存。储存的供热速率为2.0kW。从容器到外界环境的热损失为0.4kW。容器中水的最初温度为5°C。请估算水在加热3h之后的温度以及所需的石蜡量。

8.18　使用一个太阳能系统，将20kg的相变材料十八烷从20°C加热到30°C，它的供热速率为2kW。假设十八烷被完全熔化。请估算该过程所需的时间以及储存装置的最小尺寸。

8.19　使用一个太阳能系统，将50kg的相变材料正十六烷从12°C加热到26°C，它的供热速率为1.5kW。假设正十六烷被完全熔化。请估算该过程所需的时间以及储存装置的最小尺寸。

PCM	T_m /°C	ΔH_m /(kJ/kg)	$C_{pl,av}$ /(kJ/kg K)	$C_{ps,av}$ /(kJ/kg K)	k_l /(W/m K)	k_s /(W/m K)	ρ_l /(kg/m^3)	ρ_s /(kg/m^3)
水	0	333	4.19	2.0	0.595	2.2	1000	920
正十六烷	18	235	2.1	1.95	0.156	0.43	765	835

8.20　使用一个太阳能系统，将120kg的相变材料十八烷从20°C加热到30°C，它的供热速率为2kW。假设十八烷被完全熔化。请估算该过程所需的时间以及储存装置的最小尺寸。

8.21　使用一个太阳能系统，将 60kg 的相变材料二十烷从 20°C加热到 42°C，它的供热速率为 1.8kW。假设二十烷被完全熔化。请估算该过程所需的时间以及储存装置的最小尺寸。

8.22　使用一个太阳能系统，将 100kg 的相变材料二十二烷从 20°C加热到 55°C，它的供热速率为 1.2kW。假设二十二烷被完全熔化。请估算该过程所需的时间以及储存装置的最小尺寸。

8.23　使用一个太阳能系统，将 30kg 的相变材料二十二烷从 20°C加热到 55°C，它的供热速率为 1.1kW。假设二十二烷被完全熔化。请估算该过程所需的时间以及储存装置的最小尺寸。

8.24　满足额外的高峰用电需求的一种方法是，在需要时或者电的成本较低时，将一部分水从水源（比如一个湖泊）抽到较高的水电站蓄水库中。考虑一个水电站蓄水库，其储能容量为 2×10^6kWh。这些能量被储存于地平面以上 60m 高的蓄水库中。请估算被抽回蓄水库的最小水量。

8.25　满足额外的高峰用电需求的一种方法是，在需要时或者电的成本较低时，将一部分水从水源（比如一个湖泊）抽到较高的水电站蓄水库中。考虑一个水电站蓄水库，其储能容量为 1.2×10^6kWh。这些能量被储存于地平面以上 52m 高的蓄水库中。请估算被抽回蓄水库的最小水量。

8.26　满足额外的高峰用电需求的一种方法是，在需要时或者电的成本较低时，将一部分水从水源（比如一个湖泊）抽到较高的水电站蓄水库中。考虑一个水电站蓄水库，其储能容量为 3.45×10^6kWh。这些能量被储存于地平面以上 44m 高的蓄水库中。请估算被抽回蓄水库的最小水量。

8.27　在 300K 的等温条件下，将 725kg 空气从 100kPa 压缩到 1200kPa，热损失为 24000kJ。请确定其最大有效能。

8.28　如果在 290K 的等温条件下，将 1100kg 空气从 100kPa 压缩到 1100kPa，热损失为 21000kJ。请确定其最大有效能。

8.29　如果在 290K 的等温条件下，将 540kg 空气从 100kPa 压缩到 1100kPa，热损失为 12000kJ。请确定其最大有效能。

8.30　如果在 300K 的等温条件下，将 1450kg 空气从 100kPa 压缩到 1200kPa，热损失为 24000kJ。请确定其最大有效能。

8.31　使用一个地下洞室来储存压缩空气的能量。如果洞室的容积为 $58000m^3$，在 300K 的等温条件下，将空气从 100kPa 压缩到 1500kPa，热损失为 55000kJ，请确定其最大有效能。

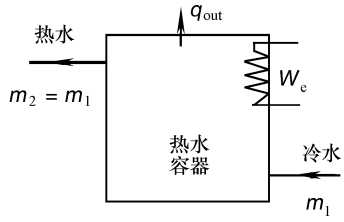
8.32　使用一个地下洞室来储存压缩空气的能量。如果洞室的容积为 $90000m^3$，在 300K 的等温条件下，将空气从 100kPa 压缩到 1400kPa，热损失为 50000kJ，请确定其最大有效能。

8.33　使用一个地下洞室来储存压缩空气的能量。如果洞室的容积为 $58000ft^3$，在 540°R 的等温条件下，将空气从 15psia 压缩到 600psia，热损失为 50000Btu，请确定其最大有效能。

8.34　使用一个地下洞室来储存压缩空气的能量。如果洞室的容积为 $150000ft^3$，在 540°R 的等温条件下，将空气从 15psia 压缩到 500psia，热损失为 1050000Btu，请确定其最大有效能。

8.35　使用一个隔热的 $30m^3$ 容器来储存废蒸汽。该容器内含 $0.01m^3$ 的 30°C液态水来平衡水蒸气。请确定来自汽轮机的湿废蒸汽的量（单位为：kg），该蒸汽在绝热充气过程结束时

为1atm。湿蒸汽的蒸汽干度为90%，容器内的最终压强为1atm。假设液态水与蒸汽之间的热传递可以忽略不计。



参考文献

1. Andersson O (2007) Aquifer thermal energy storage (ATES). In: Paksoy HO (ed) Thermal energy storage for sustainable energy consumption. NATO science series. Springer, Dordrecht
2. Çengel YA, Turner RH (2001) Fundamentals of thermal fluid sciences. McGraw-Hill, New York
3. Demirel Y (2007) Nonequilibrium thermodynamics: transport and rate processes in physical, chemical and biological systems, 2nd edn. Elsevier, Amsterdam
4. Demirel Y, Kunç S (1987) Thermal performance study on a solar air heater with packed flow passage. Energy Conver Mngmt 27:317–325
5. Demirel Y, Ozturk HH (2006) Thermoeconomics of seasonal heat storage system. Int J Energy Res 30:1001–1012
6. Demirel Y, Sandler SI (2002) Thermodynamics of bioenergetics. Biophys Chem 97:87–111
7. Dincer I, Rosen MA (2007) A unique borehole thermal storage system at University of Ontario Institute of Technology. In: Paksoy HO (ed) Thermal energy storage for sustainable energy consumption. NATO science series. Springer, Dordrecht
8. Farrell A, Plevin R et al (2006) Ethanol can contribute to energy and environmental goals. Science 311:506–508
9. Garby L, Larsen PS (1995) Bioenergetics. Cambridge, New York
10. Kempton W, Tomic J (2005) Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue. J Power Sour 144:268–279
11. Kenisarin M, Mahkamov K (2007) Solar energy storage using phase change materials. Renew Sustain Energy Rev 11:1913–1965
12. Lee YJ et al (2009) Fabricating genetically engineered high-power lithium-ion batteries using multiple virus genes. Science 324:1051–1055
13. Linden D, Reddy TB (2001) Handbook of batteries. McGraw-Hill, New York
14. Loisel R, Mercier A, Gatzen C, Elms N, Petric H (2010) Valuation framework for large scale electricity storage in a case with wind curtailment. Energy Policy 38:7323–7337
15. Markel A (2007) Plug-in hybrid-electric vehicle analysis. NREL, Golden
16. Mehling E, Cabeza LF (2007) Phase changing materials and their basic properties. In: Paksoy HO (ed) Thermal energy storage for sustainable energy consumption. NATO Science Series. Springer, Dordrecht
17. Morofsky E (2007) History of thermal energy storage. In: Paksoy HO (ed) Thermal energy storage for sustainable energy consumption. NATO science series. Springer, Dordrecht
18. Rigden JS (2002) Hydrogen: the essential element. Harvard University Press, Cambridge
19. Sari A (2002) Thermal and heat transfer characteristics in a latent heat storage system using lauric acid. Energy Conver Mngmnt 43:2493–2507
20. Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D (2009) Review on thermal energy storage with

phase change materials and applications. Renew Sustain Energy Rev 13:318–345
21. Shiina Y, Inagaki T (2005) Study on the efficiency of effective thermal conductivities on melting characteristics of latent heat storage capsules. Int J Heat Mass Trans 48:373–383
22. Short W, Denholm P (2007) An evaluation of utility system impacts and benefits of plug-in hybrid electric vehicles. NREL, Golden
23. Solber G (2007) The magic of tesla roadster regenerative braking. In http://www.teslamotors.com/blog/magic-tesla-roadster-regenerative-braking. Accessed in July 2011
24. Tuncbilek K, Sari A, Tarhan S, Ergunes G, Kaygusuz K (2005) Lauric and palmitic acids eutectic mixture as latent heat storage material for low temperature heating applications. Energy 30:677–692
25. Tyagi VV, Buddhi D (2007) PCM thermal storage in buildings: a state of art. Renew Sustain Energy Rev 11:1146–1166
26. Winger J (2011) The car electric. Electric car buying guide. http://www.thecarelectric.com. Accessed in April 2011

第 9 章　节　　能

9.1　节能与回收

节能主要是指减少能源消耗与提高能量的使用效率。节能可能会带来安全性、经济收入以及环境保护水平的提升。例如，电动机耗量电相当大，而且运行效率在 70%~90% 。因此，使用效率较高的电动机可以在其整个使用寿命期间节能。能量回收可以通过减少系统的总体能源浪费来降低能量输入需求。例如，主要以显热或潜热形式存在的子系统废能，可以用于同一系统的另一部分。因此，能量回收可以是节能的一部分。通过工业和公用工程中的能量回收来减少化石燃料的使用和 CO_2 和 NO_x 的排放是大势所趋。能量回收的一些例子如下：

- 可以利用生产过程（比如发电厂和钢铁厂）中的热水为附近区域内的家庭和办公室供暖。通过隔热或改进的建筑物实现的节能也是有益的。低温热能回收对于生产者到消费者的短距离使用来说更为有效。
- 再生制动器可以用于电动小汽车和火车当中，其中动能部分被回收，并储存为电池的化学能。

在主动减压系统中，加压流体流动的压差被回收起来，而不是在减压阀中转化成热量。

- 能量回收。
- 水热回收。
- 热回收蒸汽发生器。
- 热回热旋风发动机。
- 热敏二极管。
- 热电组件。

9.2　工业过程中的节能

大部分工业生产过程需要依靠稳定而且经济的能量供应来获得竞争力。其中一些工业生产过程会产生能量，而其他的工业生产过程则是使用能量。例如，朗肯热机产生能量，供压缩机使用。这两类过程的节能将会提高热效率并减少废弃的能量。下面各节将讨论一些可能会节约能量生产和压缩机做功过程中能量的过

程改进。

9.2.1　发电过程中的节能

6.7 节讨论了发电厂效率的一些可能的改进。其中，一些例子强调了在朗肯循环和布雷顿循环中节能的重要性。在一个燃气轮机运行的布雷顿循环中，流出汽轮机的废气温度 T_4 通常要高于流出压缩机的气体温度 T_2，如图 9.1 所示。因此，流出压缩机的气体能够在回热器中被废热气加热，如图 9.1b 所示。回热器是一种逆流式热交换器（又称为换热器，recuperator），可以回收废热。回热器提高了布雷顿循环的热效率，这是由于将排出废气的部分能量用于预热流入燃烧室的气体。如此一来，在相同的循环净输出功下，使用回热器能够减少所需要的燃料输入。增加一个回热器（运行时无热损失）并不会影响循环的净输出功。高效率的回热器能够节约更多的燃料。在绝热条件下运行的回热器，其效率可定义为

$$\varepsilon = \left(\frac{H_5 - H_2}{H_4 - H_2} \right) \tag{9.1}$$

焓 H_i 如图 9.1b 所示。在冷空气标准温度假设下（见 7.8.1 节），回热器的效率可以近似定义为

$$\varepsilon \simeq \left(\frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} \right) \tag{9.2}$$

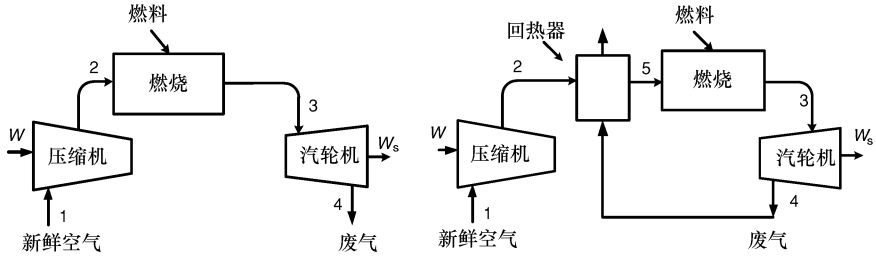


图 9.1　a）一个简单的布雷顿循环，b）使用回热器的布雷顿循环。回热器的工况为 $T_4 > T_2$

仅当 $T_4 \gg T_2$ 时，才可能使用回热器。实际的发动机使用的大多数回热器，运行效率要低于 0.85[7]。

在冷空气标准温度假设下，一个使用回热器的理想布雷顿循环的热效率取决于之比最低温度和最高温度之比和压强比，且可以估算为

$$\eta_{\text{th. regen.}} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_3}\right)(r_p)^{(\gamma-1)/\gamma} \tag{9.3}$$

式中，r_p 为压缩比（P_2/P_1），而且 $\gamma = C_p/C_v$。

例 9.1　布雷顿循环中的回热器节能

一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_p = 9$。压缩机入口处的新鲜空气温度为 295K。汽轮机入口的空气温度为 1300K。带有压缩机的该循环的运行效率为 80%，汽轮机的效率为 80%。单位燃料的成本为 0.14 美元/kWh。该循环每年运行 360 天。

① 假设使用标准空气，请确定该循环的热效率。

② 如果发电厂的回热器运行效率为 0.78，请确定该循环的热效率以及每年节约的燃料。

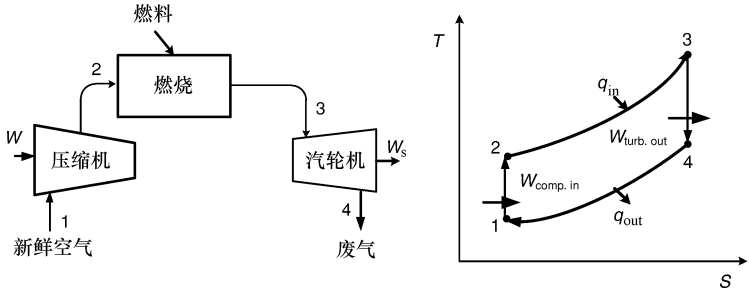
解：

假设循环处于稳态流动，动能和势能的变化可以忽略不计。空气的热容量取决于其温度，而且空气为理想气体。

① 计算基础：1kg/s 空气。

$$\eta_{\text{turb}} = 0.8, \eta_{\text{comp}} = 0.8, r_p = P_2/P_1 = 9$$

过程 1-2：等熵压缩



根据从表 D1 查得的数据：

$$T_1 = 295\text{K}, H_1 = 295.17\text{kJ/kg}, P_{r_1} = 1.3068$$

P_r 表示式（7.36）中定义的相对压强：

$$\frac{P_{r_2}}{P_{r_1}} = \frac{P_2}{P_1} = r_p - P_{r_2} = (9)(1.3068) = 11.76$$

从表 D1 查得压缩机出口处的近似值为

$$P_{r_2} = 11.76, T_2 = 550\text{K}, H_2 = 555.74\text{kJ/kg}$$

过程 3-4：汽轮机中的等熵膨胀如上面给出的 *TS* 图所示：

$$T_3 = 1300\text{K}, H_3 = 1395.97\text{kJ/kg}, P_4/P_3 = 1/r_p = 1/9, P_{r_3} = 330.9$$

$$\frac{P_{r_4}}{P_{r_3}}=\frac{P_4}{P_3}\rightarrow P_{r_4}=\left(\frac{1}{9}\right)(330.9)=36.76$$

从表 D1 中查得压缩机出口处的近似值为

$$P_{r_4}=36.76\text{:}\ T_4=745\text{K},H_4=761.87\text{kJ/kg}$$

压缩机的输入功为

$$W_{\text{comp. in}}=\frac{H_2-H_1}{\eta_{\text{comp}}}=\frac{(335.74-295.17)\text{kJ/kg}}{0.8}=325.7\text{kJ/kg}$$

汽轮机的输出功为

$$W_{\text{turb. out}}=\eta_{\text{turb}}(H_3-H_4)=0.8(1395.97-761.87)=507.3\text{kJ/kg}$$

回功比

$$r_{\text{bw}}\text{:}\ r_{\text{bw}}=\frac{W_{\text{comp. in}}}{W_{\text{turb. out}}}=\frac{325.7}{507.3}=0.64$$

这表明 64% 的汽轮机输出功已经被用于压缩机。

净输出功为　$W_{\text{net}}=W_{\text{out}}-W_{\text{in}}=(507.3-325.7)\text{kJ/kg}=181.6\text{kJ/kg}$

在压缩机出口处，空气的实际焓为

$$H_{2a}=H_1+W_{\text{comp. in}}=(295.17+325.70)\text{kJ/kg}=620.87\text{kJ/kg}$$

增加的热量：$q_{\text{in}}=H_3-H_{2a}=(1395.97-620.87)\text{kJ/kg}=775.1\text{kJ/kg}$

热效率：$\eta_{\text{th}}=\dfrac{W_{\text{net}}}{q_{\text{in}}}=\dfrac{181.6}{775.1}=0.234$ 或 23.4%

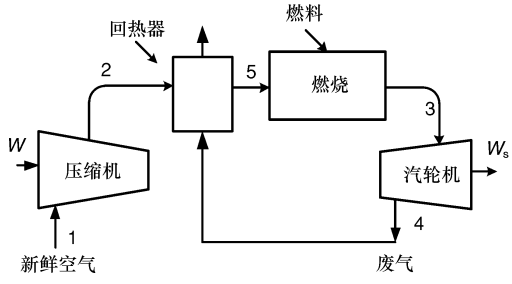
根据能量平衡，可以估算出废气的温度 T_4 与实际焓值：$W_{\text{turb out}}=H_{4a}-H_3$

$H_{4a}=(1395.97-507.3)\text{kJ/kg}=888.67\text{kJ/kg}\rightarrow T_4=860\text{K}$（根据表 D1 查得）

压缩机和汽轮机的设计改进以最小的损失提高了这些组件的效率。进而，也有可能显著地提高循环的热效率。

② $T_4=860\text{K}$，$T_2=550\text{K}$，因为 $T_4>T_2$，所以，回热可以利用。

回热器的效率 $\varepsilon=0.78$：



$$\varepsilon=\left(\frac{H_5-H_2}{H_4-H_2}\right)=\frac{H_5-620.9}{888.67-620.9}=0.78\rightarrow H_5=829.80\text{kJ/kg}$$

$$q_{in} = H_3 - H_5 = (1395.97 - 829.8)\text{kJ/kg} = 566.2\text{kJ/kg}$$

这表明节约的所需燃料能量为(840.2 - 566.2)kJ/kg = 274.0kJ/kg。

热效率：$\eta_{th} = \dfrac{W_{net}}{q_{in}} = \dfrac{181.6}{566.2} = 0.32$ 或 32%

单位燃料的成本 = 0.14 美元/kWh

每年运行 360 天，那么每年运行的小时数 = 360(24) = 8640h/年

节约的燃料为(274kJ/kg)(1kg/s)(8640h/年) = 2367360kWh/年

节约的成本为(2367360kWh/年)(0.14 美元/kWh) = 331430 美元/年

使用回热器之后，在实际的布雷顿循环运行中，热效率从 23% 提高到 32%。增加一个回热器（运行时无热损失）并不会影响循环的净输出功。燃料和成本的节约相当可观。

9.2.1.1　过程改进带来的节能

在蒸汽发电厂运行中，可能会提高其效率的一些改进措施如下[5,6]：

- 通过降低冷凝器的压强来提高朗肯循环的效率。例 9.2 给出了在两种不同的排放压强下，朗肯循环运行效率的估算。通过将冷凝器的压强从 78.5kPa 降低到 15.0kPa，热效率从 27.6% 提高到了 33.4%。不过，排出蒸汽的干度从 0.9 下降到了 0.84，对于汽轮机叶片来说这是不可取的。由于功率输出的提高，燃料的节约相当可观。例 9.3 对实际的热效率与从完全可逆卡诺循环获得的最大热效率进行了比较。
- 通过增大锅炉的压强来提高朗肯循环的效率。例 9.4 给出了以较高的压强运行的朗肯循环的热效率估算。通过将锅炉压强从 3500kPa 增大到 9800kPa，其热效率从 0.276 提高到了 0.326。不过，排放蒸汽的干度从 0.9 下降到了 0.80，对于汽轮机叶片来说这是不可取的。
- 通过提高锅炉的温度来提高朗肯循环的效率。例 9.5 给出了以较高的温度运行的朗肯循环的热效率估算。通过将锅炉的温度从 400°C提高到 525°C，其热效率从 0.276 提高到了 0.298。排出蒸汽的干度从 0.9 增加到了 0.96，对于汽轮机叶片的保护来说这是可取的。例 9.6 对估算而得的热效率与从完全可逆卡诺循环获得的最大热效率进行了比较。

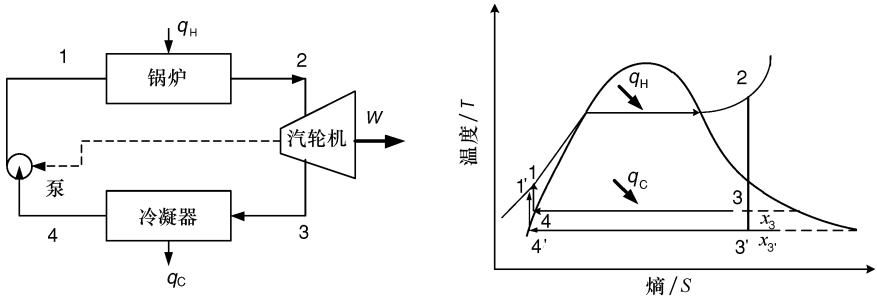
例 9.2　通过降低冷凝器的压强来提高朗肯循环的效率

一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。质量流量为 20kg/s 的蒸汽流入蒸汽轮机时为 3500kPa 和 400°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 78.5kPa。

① 请确定该循环的热效率。

② 如果排出蒸汽的压强降到 15kPa，请确定其热效率。

③ 如果单位电力成本为 0.10 美元/kWh，请计算其年度节能量。



解：

假设循环处于稳态流动，而且动能和势能的变化可以忽略不计。泵和汽轮机的效率为 100%。

① $\dot{m}_s = 20.0\text{kg/s}$

使用来自附录表 F3 和 F4 的数据：

过热蒸汽（见表 F4）：

$$P_2 = P_1 = 3500\text{kPa}, H_2 = 3224.2\text{kJ/kg}, S_2 = 6.8443\text{kJ/kg}, T_2 = 400°\text{C}$$

饱和蒸汽（见表 F3）：

$$P_3 = P_4 = 78.5\text{kPa}(T_{sat} = 366.15\text{K}), V_4 = 0.001038\text{m}^3/\text{kg}$$

$$H_{3sat\ vap} = 2665.0\text{kJ/kg}, H_4 = H_{3sat\ liq} = 389.6\text{kJ/kg}$$

$$S_{3sat\ vap} = 7.4416\text{kJ/kg K}, S_{3sat\ liq} = 1.2271\text{kJ/kg K}$$

计算基础：1kg/s 蒸汽。

泵的效率 $\eta_{pump} = 100\%$

$$W_{p,in} = V_1(P_1 - P_4) = (0.001038)(3500 - 78.5)\left(\frac{1\text{kJ}}{1\text{kPa m}^3}\right) = 3.55\text{kJ/kg}$$

$$H_1 = H_4 + W_{p,in} = 393.1\text{kJ/kg}$$

等熵过程 $S_1 = S_4$ 和 $S_3 = S_2$。

排放湿蒸汽的蒸汽干度（$S_2 < S_{3sat\ vap}$）：$6.8443 < 7.4416$

$$x_3 = (6.8463 - 1.2271)/(7.4416 - 1.2271) = 0.90$$

$$H_3 = 389.6(1 - 0.90) + 2665.0 \times 0.90 = 2437.5(\text{kJ/kg})$$

热相互作用为

$$q_{in} = H_2 - H_1 = (3224.2 - 393.1)\text{kJ/kg} = 2831.1\text{kJ/kg}$$

$$q_{out} = H_3 - H_4 = (2437.5 - 389.6)\text{kJ/kg} = 2048.0\text{kJ/kg}$$

热力学循环的效率：$\eta_{th} = 1 - \dfrac{q_{out}}{q_{in}} = 0.276$ 或 27.6%

因此，发电厂仅仅使用了锅炉所提供的 27.6% 的热量。

汽轮机输出功为

$$W_{out} = H_2 - H_3 = (3224.2 - 2437.5)\text{kJ/kg} = 786.7\text{kJ/kg}$$

净输出功：

$$W_{net} = (q_{in} - q_{out}) = (2831.1 - 2048.0)\text{kJ/kg} = 783.1\text{kJ/kg}$$

② 蒸汽性质（见表 F3）：

$$P_3 = P_4 = 15\text{kPa}, T_{sat} = 327.15\text{K}, V_4 = 0.001014\text{m}^3/\text{kg}$$

$$H_{3\text{sat vap}} = 2599.2\text{kJ/kg}, H_4 = H_{3\text{sat liq}} = 226.0\text{kJ/kg}$$

$$S_{3\text{sat vap}} = 8.0093\text{kJ/kg K}, S_{3\text{sat liq}} = 0.7550\text{kJ/kg K}$$

泵的效率为 $\eta_{pump} = 100\%$

$$W_{p,in} = V_1(P_1 - P_4) = (0.001014)(3500 - 15)\left(\frac{1\text{kJ}}{1\text{kPa m}^3}\right) = 3.53\text{kJ/kg}$$

$$H_1 = H_4 + W_{p,in} = (226.0 + 3.53)\text{kJ/kg} = 229.5\text{kJ/kg}$$

等熵过程 $S_1 = S_4$ 和 $S_3 = S_2$。

排放湿蒸汽的蒸汽干度（$S_3 < S_{3\text{sat vap}}$）：$6.8443 < 8.0093$

$$x_{3'} = (6.8443 - 0.7550)/(8.0093 - 0.7550) = 0.84$$

$$H_{3'} = 226.0(1 - 0.84) + 2599.2 \times 0.84 = 2219.5(\text{kJ/kg})$$

热相互作用为

$$q_{in} = H_2 - H_1 = (3224.2 - 229.5)\text{kJ/kg} = 2994.7\text{kJ/kg}$$

$$q_{out} = H_{3'} - H_4 = (2219.5 - 226.0)\text{kJ/kg} = 1993.5\text{kJ/kg}$$

循环的热效率：$\eta_{th} = 1 - \dfrac{q_{out}}{q_{in}} = 0.334$ 或 33.4%

因此，发电厂仅仅利用了来自锅炉的 33.4% 的热量。

汽轮机输出功为

$$W_{out} = H_2 - H_{3'} = (3224.2 - 2219.5)\text{kJ/kg} = 1004.7\text{kJ/kg}$$

输出的循环功为

$$W_{net} = (q_{in} - q_{out}) = (2994.7 - 1993.5)\text{kJ/kg} = 1001.2\text{kJ/kg}$$

汽轮机运行 360 天 $= (360)(24) = 8640\text{h/年}$

净输出功率年度提高：

$$(20\text{kg/s})(1001.2 - 783.1)\text{kJ/kg}(8640)\text{h/年} = 37687680\text{kWh/年}$$

③ 如果单位销售电价为 0.10 美元/kWh，年度节约 = 3768768 美元/年

通过将冷凝器的压强从 78.5kPa 降低到 15.0kPa，热效率从 0.276 提高到了 0.334。不过，排放蒸汽的干度从 0.9 下降到了 0.84，对于汽轮机叶片来说这是不可取的。节约是相当可观的。

例 9.3　计算例 9.2 中的最大可能效率

请估算例 9.2 中①和②的最大可能效率，并将它们与例 9.2 中①和②获得的

效率进行比较。

解：

① 运行在相同的温度范围之间（$T_{\text{最低值}} = T_3 = 366.15\text{K}$，$T_{\text{最高值}} = T_2 = 673.15\text{K}$）的卡诺循环的热效率为

$$\eta_{\text{th,Carnot}} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{366.15\text{K}}{673.15\text{K}} = 0.456 \text{ 或 } 45.6\%$$

这两个效率的差异来源于较大的温差。效率比 $\eta_{\text{th}}/\eta_{\text{th,Carnot}} = 0.276/0.456 = 0.60$ 表明该循环的效率只达到了最大可能效率的 60%。

② 运行在相同的温度范围之间（$T_{\text{最低值}} = T_{3'} = 327.15\text{K}$，$T_{\max} = T_2 = 673.15\text{K}$）的卡诺循环的热效率为

$$\eta_{\text{th,Carnot}} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{327.15}{673.15} = 0.514 \text{ 或 } 51.4\%$$

效率比 $\eta_{\text{th}}/\eta_{\text{th,Carnot}} = 0.334/0.51 = 0.65$ 表明该循环的效率只达到了最大可能效率的 65%。

例 9.4　通过增大锅炉的压强来提高朗肯循环的效率

一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。质量流量为 20kg/s 的蒸汽流入蒸汽轮机时为 3500kPa 和 400°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 78.5kPa。

① 如果锅炉的压强增加到 9800kPa，而汽轮机入口温度则保持在 400°C，请确定其热效率。

② 如果单位电力成本为 0.10 美元/kWh，请计算其年度节约的成本。

解：

假设循环处于稳态流动，动能和势能的变化可以忽略不计。泵的效率 $\eta_{\text{pump}} = 1$

计算基础：1kg/s 蒸汽。使用来自附录表 F3 和 F4 的数据：

在例 9.2a 中：在 3500kPa 时，$\eta_{\text{th}} = 0.276$，$W_{\text{net}} = 783.1\text{kJ/kg}$

① 过热蒸汽：

$$P_2 = P_1 = 9800\text{kPa}; H_2 = 3104.2\text{kJ/kg}: S_2 = 6.2325\text{kJ/kg K}, T_2 = 400°\text{C}$$

饱和蒸汽：

$P_3 = P_4 = 78.5\text{kPa}$，$T_{\text{sat}} = 366.15\text{K}$，$V_4 = 0.001038\text{m}^3/\text{kg}$（见表 F3）

$H_{3\text{sat vap}} = 2665.0\text{kJ/kg}$；$H_4 = H_{3\text{sat liq}} = 389.6\text{kJ/kg}$

$S_{3\text{sat vap}} = 7.4416\text{kJ/kg K}$；$S_{3\text{sat liq}} = 1.2271\text{kJ/kg K}$

$$W_{\text{p,in}} = V_1(P_1 - P_4) = (0.001038)(9800 - 78.5)\left(\frac{1\text{kJ}}{1\text{kPa m}^3}\right) = 10.1\text{kJ/kg}$$

$$H_1 = H_4 + W_{\text{p,in}} = (389.6 + 10.1)\text{kJ/kg} = 399.7\text{kJ/kg}$$

等熵过程 $S_1 = S_4$ 和 $S_3 = S_2$。

排放湿蒸汽的蒸汽干度 x_3：$(S_3 < S_{3\text{sat vap}})$：6.2325 < 7.4416

$$x_3 = (6.2325 - 1.2271)/(7.4416 - 1.2271) = 0.80$$

$$H_3 = 389.6(1 - 0.8) + 2665.0 \times 0.8 = 2210.0(\text{kJ/kg})$$

热相互作用为

$$q_{\text{in}} = H_2 - H_1 = (3104.2 - 399.7)\text{kJ/kg} = 2704.5\text{kJ/kg}$$

$$q_{\text{out}} = H_3 - H_4 = (2210.0 - 389.6)\text{kJ/kg} = 1820.4\text{kJ/kg}$$

热力学循环的效率：$\eta_{\text{th}} = 1 - \dfrac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}} = 0.326$ 或 32.6%

因此，发电厂仅仅使用了锅炉所提供的 32.6% 的热量。通过将锅炉的压强从 3500kPa 增大到 9800kPa，其热效率从 0.276 提高到了 0.326。不过，排出蒸汽的干度从 0.9 下降到了 0.80，对于汽轮机叶片来说这是不可取的。汽轮机输出功为 $W_{\text{out}} = H_3 - H_2 = (3104.2 - 2210.0)\text{kJ/kg} = 894.2\text{kJ/kg}$。

输出的循环功：$W_{\text{net}} = (q_{\text{in}} - q_{\text{out}}) = (2704.5 - 1820.4)\text{kJ/kg} = 884.1\text{kJ/kg}$

② $\dot{m}_s = 20.0\text{kg/s}$

汽轮机运行 360 天 = (360)(24) = 8640h/年

净输出功率年度提高：

(20kg/s)(884.1 − 783.1)kJ/kg(8640)h/年 = 17452800kWh/年

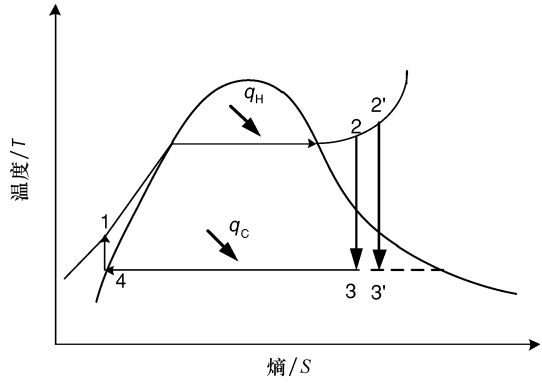
如果单位销售电价为 0.1 美元/kWh：年度节约的成本 = 1745280 美元

例 9.5　通过提高锅炉的温度来提高朗肯循环的效率

一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。质量流量为 20kg/s 的蒸汽流入蒸汽轮机时为 3500kPa 和 400°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 78.5kPa。

① 如果锅炉的温度增加到 525°C，而压强维持在 3500kPa，请确定其热效率。

② 如果单位电力成本为 0.10 美元/kWh，请计算其年度节约的成本。



解：

假设循环处于稳态流动，而且动能和势能的变化可以忽略不计。

① 计算基础：1kg/s 蒸汽。使用来自附录表 F3 和 F4 的数据：

根据例 9.2①：在 400°C 时，$\eta_{th}=0.276$，$W_{net}=783.1\text{kJ/kg}$

过热蒸汽：

$$P_2=P_1=3500\text{kPa},H_2=3506.9\text{kJ/kg},S_2=7.2297\text{kJ/kg},T_2=525^\circ\text{C}$$

饱和蒸汽：

$P_3=P_4=78.5\text{kPa}$，$T_{sat}=366.15\text{K}$，$V_4=0.001038\text{m}^3/\text{kg}$（见表 F3）

$H_{3\text{sat vap}}=2665.0\text{kJ/kg}$，$H_{3\text{sat liq}}=389.6\text{kJ/kg}$，$S_{3\text{sat vap}}=7.4416\text{kJ/kg K}$，

$S_{3\text{sat liq}}=1.2271\text{kJ/kg K}$

$$W_{p,in}=V_1(P_1-P_4)=(0.001038)(3500-78.5)\left(\frac{1\text{kJ}}{1\text{kPa m}^3}\right)=3.55\text{kJ/kg}$$

$$H_1=H_4+W_{p,in}=(389.6+3.55)\text{kJ/kg}=393.15\text{kJ/kg}$$

等熵过程 $S_1=S_4$，$S_3=S_2$。

排放湿蒸汽的蒸汽干度（$S_2<S_{3\text{sat vap}}$）：$7.2297<7.4416$

$$x_{3'}=(7.2297-1.2271)/(7.4416-1.2271)=0.96$$

$$H_{3'}=389.6(1-0.96)+2665.0\times0.96=2574.0(\text{kJ/kg})$$

热相互作用为

$$q_{in}=H_2-H_1=(3506.9-393.1)\text{kJ/kg}=3113.8\text{kJ/kg}$$

$$q_{out}=H_{3'}-H_4=(2574.0-389.6)\text{kJ/kg}=2184.4\text{kJ/kg}$$

循环的热力学效率为

$$\eta_{th}=1-\frac{q_{out}}{q_{in}}=0.298\text{ 或 }29.8\%$$

因此，工厂仅仅使用了从锅炉中得到的热量的 29.8%。通过将锅炉的温度从 400°C提高到 525°C，其热效率从 0.276 提高到了 0.298。排出蒸汽的干度从 0.9 增加到了 0.96，对于汽轮机叶片的保护来说这是可取的。

输出的汽轮机功：$W_{out}=H_2-H_{3'}=(3506.9-2574.0)\text{kJ/kg}=932.9\text{kJ/kg}$

输出的循环功：$W_{net}=(q_{in}-q_{out})=(3113.8-2184.4)\text{kJ/kg}=929.4\text{kJ/kg}$

② $\dot{m}_s=20.0\text{kg/s}$

汽轮机运行 360 天 $=(360)(24)=8640\text{h/年}$

净输出功率年度提高：

$$(20\text{kg/s})(929.4-783.1)\text{kJ/kg}(8640)\text{h/年}=25280640\text{kWh/年}$$

如果单位销售电价为 0.1 美元/kWh：年度节约的成本 $=2528064$ 美元

例 9.6　估算例 9.5 中的最大可能效率

请估算例 9.5 中①和②的最大可能效率，并将它们与例 9.5 中①和②获得的效率进行比较。

解：

① 运行在相同的温度范围之间（$T_{\min}=366.15\text{K}$，$T_{\max}=673.15\text{K}$）的卡诺循环的热效率为

$$\eta_{\text{th,Carnot}}=1-\frac{T_{\min}}{T_{\max}}=1-\frac{366.15\text{K}}{673.15\text{K}}=0.45\text{ 或 }45\%$$

效率比 $\eta_{\text{th}}/\eta_{\text{th,Carnot}}=0.276/0.45=0.61$ 表明，当锅炉温度为 400°C时，该循环的效率只达到了最大可能效率的 61%。

② 运行在相同的温度范围之间（$T_{\min}=366.15\text{K}$，$T_{\max}=798.15\text{K}$）的卡诺循环的热效率为

$$\eta_{\text{th,Carnot}}=1-\frac{T_{\min}}{T_{\max}}=1-\frac{366.15\text{K}}{798.15\text{K}}=0.54\text{ 或 }54\%$$

效率比 $\eta_{\text{th}}/\eta_{\text{th,Carnot}}=0.298/0.54=0.55$ 表明，在锅炉温度为 525°C时，该循环的效率只达到了最大可能效率的 55%。

9.2.2　压缩做功和膨胀做功中的节能

通过将摩擦、紊流、热传递以及其他损失最小化，有可能节约压缩做功。一个实用的节能方式是在压缩做功期间保持较小的气体比容。这有可能通过维持较低的气体温度来实现，因为比容与温度成正比。因此，在一个带有中间冷却的多级压缩中（见图 9.2），在气体被压缩的同时进行冷却，可以降低压缩做功的成本。通过让气体流过一个称为中冷器的热交换器，气体在各级压缩之间被冷却至初始温度。通过中间冷却回收的能量可以是非常可观的，特别是将气体压缩至很高的压强时[7]。例 9.7 给出了在一个两级压缩做功中，通过中间冷却实现的节能。

如图 9.2 所示，节约的功随中间压强值 P_x 而变化，P_x 需要优化。两级压缩过程的总输入功为各级输入功之和，而且可以估算为

$$W_{\text{comp}}=W_{\text{comp1}}+W_{\text{comp2}} \tag{9.4}$$

$$W_{\text{comp}}=\frac{\gamma RT_1}{\text{MW}(\gamma-1)}\left[\left(\frac{P_x}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right]+\frac{\gamma RT_1}{\text{MW}(\gamma-1)}\left[\left(\frac{P_2}{P_x}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right]$$

在式（9.4）中，P_x 是唯一的变量。P_x 的最优值可以通过式（9.4）对 P_x 求导并且令结果表达式等于零而得到。那么，P_x 的最优值变为

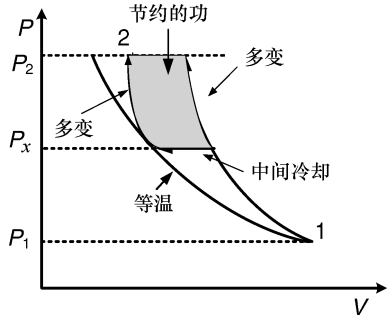


图 9.2　通过中间冷却实现的压缩做功节能，从第二阶段（压强为 P_x）时开始的两个多变压缩之间节约的功

$$P_x = (P_1 P_2)^{1/2} 或 \frac{P_x}{P_1} = \frac{P_2}{P_x} \tag{9.5}$$

因此，当每级压缩机的压强比相同而且每级压缩做功变为相等时，将实现最大节能。

$$W_{\text{comp1}} = W_{\text{comp2}} \tag{9.6}$$

$$W_{\text{comp}} = \frac{2\gamma RT_1}{\text{MW}(\gamma - 1)}\left[\left(\frac{P_x}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right] \tag{9.7}$$

例 9.8 给出了一个压缩机的最小功率和所需的有功功率的估算。例 9.9 给出了如何利用低温膨胀过程来产生能量。通过使用节流阀来降低压强会产生能量浪费。使用汽轮机来替代节流阀，可以产生能量，并因此节约了电能[7]。

例 9.7　在一个两级压缩做功中通过中间冷却实现节能

空气流量为 2kg/s，在一个稳态可逆过程中将其压缩，空气的入口状态为 100kPa 和 300K，出口压强为 1000kPa。请估算在以下情况的做功：①多变压缩，$\gamma = 1.3$；②带中间冷却的理想两级多变压缩，多变指数同为 $\gamma = 1.3$；③如果单位电力成本为 0.15 美元/kWh 而且压缩机每年运行 360 天，请估算每年通过中间冷却节约的压缩做功和节约的电能。

解：

假设：稳态运行；空气为理想气体；动能和势能可以忽略不计。

$$P_2 = 1000\text{kPa}, P_1 = 100\text{kPa}, T_1 = 300\text{K}, \gamma = 1.3, \text{MW}_{\text{air}} = 29\text{kg/kmol}$$

计算基础：空气流量为 1kg/s

① $\gamma = 1.3$ 的多变压缩所需的功：

$$W_{\text{comp}} = \frac{\gamma RT_1}{\text{MW}(\gamma - 1)}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right]$$

$$=\frac{1.3(8.314\text{kJ/kmol K})(300\text{K})}{29\text{kg/kmol}(1.3-1)}\left[\left(\frac{1000}{300}\right)^{(1.3-1)/1.3}-1\right]=261.3\text{kJ/kg}$$

② 带有中间冷却的两级理想多变压缩（$\gamma=1.3$）

$$P_x=(P_1P_2)^{1/2}=(100\times1000)^{1/2}=316.2\text{kPa}$$

$$W_{\text{comp}}=\frac{2\gamma RT_1}{\text{MW}(\gamma-1)}\left[\left(\frac{P_x}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right]$$

$$=\frac{2(1.3)(8.314\text{kJ/kmol K})(300\text{K})}{29\text{kg/kmol}(1.3-1)}\left[\left(\frac{316.2}{100}\right)^{(1.3-1)/1.3}-1\right]=226.8\text{kJ/kg}$$

$$\text{节约的能量}=(261.3-226.8)\text{kJ/kg}=34.5\text{kJ/kg}$$

减少的能量使用：$\dfrac{261.3-226.8}{261.3}=0.13$ 或 13%

③ 节约的压缩做功 $=(2\text{kg/s})(261.3-226.8)\text{kJ/kg}=69\text{kW}$

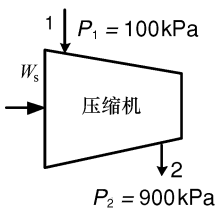
年度节约的功：$(69\text{kW})(8640\text{h/年})=596160\text{kWh/年}$

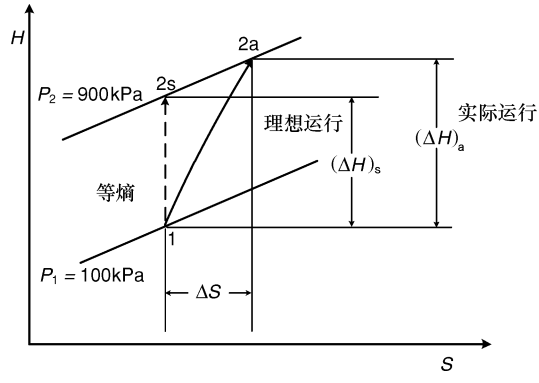
年度节约的电力为(2385745kWh/年)(0.15 美元/kWh) = 89424 美元/年

当使用两级多变压缩代替单个多变压缩时，压缩做功已经减少了 13%，而且每年节约 596160kWh。

例 9.8　压缩机的效率和功率输入

一个稳态运行的绝热压缩机将空气从 100kPa 和 290K 压缩至压强 900kPa（稳态运行）。压缩机的等熵效率为 80%。空气的流量为 0.4kg/s。请确定该压缩机的最小功率和实际所需的功率。





解：

假设：稳态绝热运行。空气为理想气体。动能和势能的变化可以忽略不计。理想气体的焓仅取决于温度。

$$\text{空气质量流量}=0.4\text{kg/s},\eta_C=0.8$$

入口条件为（见表 D1）

$$P_1 = 100\text{kPa}, T_1 = 290\text{K}, H_1 = 290.16\text{kJ/kg}, P_{r_1} = 1.2311$$

出口条件为（见表 D1）：$P_2 = 900\text{kPa}$

出口处空气的焓来自式（7.36）和表 D1：

$$P_{r_2} = P_{r_1}\frac{P_2}{P_1} = 1.2311\left(\frac{900\text{kPa}}{100\text{kPa}}\right) = 11.1$$

从表 D1 可得：对于 $P_{r_2} = 11.1$，可以发现 $T_2 = 540\text{K}$，$H_{2s} = 544.35\text{kJ/kg}$

$$\eta_C = \frac{H_{2s} - H_1}{H_{2a} - H_1} = 0.8 \rightarrow H_{2a}$$

$H_{2a} = 607.9\text{kJ/kg}, T_2 = 600\text{K}$（见表 D1，近似值）

从以上 TS 图可见，H_{2a}为出口处实际流出时的焓。

所需的实际功率为

$$\dot{m}\Delta H_a = \dot{W}_{net,in} = \dot{m}(H_{2a} - H_1) = 0.4\text{kg/s}(607.9 - 290.16)\text{kJ/kg} = 127.1\text{kW}$$

所需的最小功率为

$$\dot{m}\Delta H_s = \dot{W}_{net,in} = \dot{m}(H_{2s} - H_1) = 0.4\text{kg/s}(544.3 - 290.1)\text{kJ/kg} = 101.7\text{kW}$$

如果运行是理想的，那么，节约的能量为 25.4kW 或节约 20%。

例 9.9　使用一个汽轮机来取代节流阀实现的膨胀节能

一个低温生产厂处理液体甲烷，甲烷状态为 115K 和 5000kPa，流速为 0.3m^3/s。在该工厂中，使用节流阀将液体甲烷的压强降低至 1000kPa。考虑使用汽轮机来取代节流阀的一种新工艺，以实现发电，同时在 110K 时将压强降低至 1000kPa。使用下面给出的液体甲烷的性质数据，请估算：

① 汽轮机能够产生的功率。

② 如果汽轮机运行 360 天/年，单位电力成本为 0.09 美元/kWh，每年节约的用电成本。

T/K	P/kPa	H/(kJ/kg)	S/(kJ/kg K)	C_p/(kJ/kg K)	ρ/(kg/m^3)
110	1000	209.0	4.875	3.471	425.8
110	2000	210.5	4.867	3.460	426.6
110	5000	215.0	4.844	3.432	429.1
120	1000	244.1	5.180	3.543	411.0
120	2000	245.4	5.171	3.528	412.0
120	5000	249.6	5.145	3.486	415.2

注：资料来源：Çengel 和 Turner[7]。

解：

假设：稳态和可逆运行；绝热汽轮机，甲烷为理想气体；动能和势能可以忽略不计。

① $P_1 = 5000\text{kPa}, T_1 = 115\text{K}, Q_1 = 0.30\text{m}^3/\text{s}$

$H_1 = 232.3\text{kJ/kg} = (215.0 + 249.6)/2, \rho_1 = 422.15\text{kg/m}^3 = (429.1 + 415.2)/2$

$P_2 = 1000\text{kPa}, H_2 = 209.0\text{kJ/kg}$

单位的电力成本 = 0.09 美元/kWh

质量流量为 $\dot{m} = \rho Q_1 = 422.15\text{kg/m}^3(0.3\text{m}^3/\text{s}) = 126.6\text{kg/s}$

产生的功率为

$$\dot{W}_{\text{out}} = \dot{m}(H_1 - H_2) = 126.6\text{kg/s}(232.5 - 209.0)\text{kJ/kg} = 2949.8\text{kW}$$

年度发电为

$$\dot{W}_{\text{out}}\Delta t = (2949.8\text{kW})(360)(24)\text{h/年} = 25486099\text{kWh/年}$$

节约的电力为

(25486099kWh/年)(0.09 美元/kWh) = 2293748 美元/年

采用节流阀来实现减压，这种方式会浪费发电的潜能。使用汽轮机来取代节流阀，可以产生能量，并因此节约了电能。

9.2.3　使用高效率电动机实现节能

实际上，所有的压缩机都是由电动机来驱动的。电动机不能将它们消耗的电能完全转换为机械能。

电动机效率被定义为

$$\eta_{\text{Motor}} = \frac{\text{机械功率}}{\text{电功率}} = \frac{\dot{W}_{\text{comp}}}{\dot{W}_{\text{elect}}} \tag{9.8}$$

发动机的效率范围为 $0.7 < \eta_{\text{motor}} < 96$[⊖]。未被转换成机械功率的那部分电能被转换成了热能，它通常是无用的。

例如，假设没有传输损失：

- 效率为 80% 的发动机每传递 1kW 轴功就要抽取 1kW/0.8 = 1.25kW 的电能。
- 如果发动机的效率为 95%，那么它每传递 1kW 轴功就只需抽取 1kW/0.95 = 1.05kW 的电能。
- 因此，在这两个发动机之间，电力节约为 1.25(η_{motor} = 95%)kW − 1.05(η_{motor} = 95%) = 0.20kW。

高效率的发动机成本更高，但是它的运行能够节约能量。

⊖ 此处原书似有误，应为 0.96。——译者注

节约的能量可以估算为

$$\dot{W}_{\text{elect. saved}} = \dot{W}_{\text{elect. std}} - \dot{W}_{\text{elect. efficient}} = \dot{W}_{\text{comp}}\left(\frac{1}{\eta_{\text{std}}} - \frac{1}{\eta_{\text{efficient}}}\right) \tag{9.9}$$

$$\dot{W}_{\text{elect. saved}} = (\text{额定功率})(\text{负载因数})\left(\frac{1}{\eta_{\text{std}}} - \frac{1}{\eta_{\text{efficient}}}\right) \tag{9.10}$$

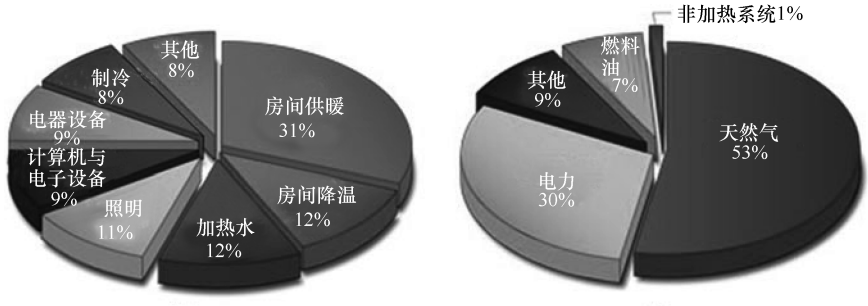
其中，额定功率为电动机全负荷下所传递的标称功率，并标在铭牌之上。负荷因数为发动机常规运行时额定功率的分数。年度节能可以估算为

$$\text{年度能量节约} = (\dot{W}_{\text{elest,saved}})(\text{年度运行小时}) \tag{9.11}$$

- 以部分负荷来运行的压缩机会引起电动机的低效运行。电动机的效率将会随负荷加大而提高。
- 压缩机进气使用外面的冷空气，可以降低压缩机做功并节约能量。

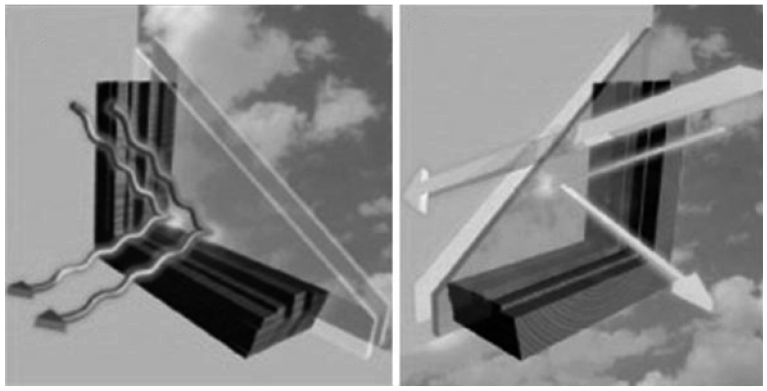
9.3　家庭供暖和降温的节能

如图 9.3a 所示，家庭房间供暖、降温和水加热占了物业水电费账单的 55% 左右。为了节约能量，人们应该搞清楚家庭能量消耗的去向、分配优先级，并形成效率规划，以提升效率并降低成本。例如，使用节能规划图，一个家庭的每年节能潜力可以达到 5%~30%。如果隔热水平低于推荐的最小值，那么通过房屋天花板和墙壁的热损失会非常大。每年检查供暖和降温设备，或者按生产商推荐的方式来进行。如果设备使用已超过 15 年，使用能效比较高的新设备可以降低成本[1,2,20]。供热能量来源的变化如图 9.3b 所示。在美国，使用天然气是家庭房间供暖的最大燃料来源。在较冷的气候地区，使用玻璃上带有低辐射性涂层的充气窗户可以减少热量损失。在较热的气候地区，带有选择性涂层的窗户可以减少热量的吸收（见图 9.4）。在冬季，将温度调节装置设定较低，在夏季则设置较高，以达到尽可能舒适的目的，这样可以降低供暖和降温的成本。以下措施也能够降低成本：



a)　　b)

图 9.3　a）家庭的能量使用：供暖是能量成本的最大部分。在家庭使用中，供暖和降温比任何其他系统消耗的能量都多。通常，50% 的物业水电费账单用在了供暖和降温。b）家庭供暖的能量来源，天然气是房间供暖的最大的燃料来源



a）　　b）

图 9.4　a）在冬季，玻璃上涂有低辐射强度涂层的双层玻璃窗户能够将热量反射回房间，b）玻璃上涂有低辐射强度涂层的窗户能够反射部分太阳光，从而令房间保持凉爽[26]

- 每月一次或者根据需要，清洁或者替换燃烧炉的过滤器。
- 清洁基板加热器和散热器，并确认它们未被堵塞。
- 在夏季期间，在白天拉上窗帘以减少太阳能的吸收。
- 当新购供暖和降温设备时，选择能效比较高的产品。

水的加热通常要占物业水电费账单的 12% 左右。隔离电、天然气或者燃油热水储存容器如图 9.5 所示。大多数热水器能够持续使用 15 年左右。不过，淘汰使用超过 7 年的热水器可以降低能量成本。



图 9.5　热水器

9.3.1　使用化石燃料为家庭供暖

住宅用燃烧炉的供热率低于 225000Btu/h（66000W），而住宅用锅炉的供热率则低于 300000Btu/h（88000W）。住宅用燃烧炉是一个提供加热空气的电器，它带有一个通过风道分配系统令空气循环的鼓风机。住宅用锅炉则是一个铸铁、钢、铝或者铜制压力容器热交换器，设计用于燃烧化石燃料来对合适的介质（比如水）加热。热水可以通过基板散热器或辐射地板系统来分配，而蒸汽则是通过连接蒸汽散热器的管道来分配。燃烧炉加热空气，并使用通过房间的风道来分配加热空气，而锅炉则是对水加热，提供热水或蒸汽用于供暖。大多数燃烧炉和锅炉采用天然气、油或者丙烷来运行。蒸汽锅炉比热水锅炉的运行温度要高。燃油燃烧炉和锅炉能够使用与生物柴油混合的加热油，它比纯加热油产生的污染更小[20,23]。

冷凝燃烧炉或锅炉将燃烧过程中产生水蒸气冷凝，并使用这个冷凝过程中产生的热量。虽然冷凝设备的成本要超过非冷凝设备，冷凝设备能够减少燃料的消耗，并在 15～20 年的使用寿命的情况想降低成本。可以对旧燃烧炉和锅炉进行改造以提高它们的效率。一些改造措施包括安装可编程温度调节装置、升级压力空气系统的管道系统以及增加热水系统的分区控制。不过，还应该将改造成本与更换新锅炉或燃烧炉的成本进行比较。

9.3.2　使用电阻的家庭供暖

一个纯电热炉或锅炉没有通过烟囱而产生的烟道损失。电阻加热几乎能够将电能 100% 地转换为热能。不过，大多数电力产自油、天然气或煤，这些方式只有大约 30% 的燃料能量可被转换为电能。由于生产和传输损失，电热通常要比使用燃烧设备（比如天然气、丙烷与油燃烧炉）产生的热量成本更高。在大多数气候条件下，热泵要更好一些，因为与电阻加热相比，它们易于减少 50% 的电力使用。也可以使用使用热量储存系统，以避免在峰值功率需求期间加热[3]。

电炉中的鼓风机（大风扇）将空气吹过一组电阻线圈（称为元件，多为 3～7 个），每一个线圈的额定功率通常为 5kW。内置的温度调节装置可以阻止过热，并在鼓风机出现故障或者脏过滤器阻塞了空气流动时关闭电炉。

当运行于加热模式时，热泵的效率比电阻加热器更高，因为电加热器只能将输入的电能直接转换成输出的热能，它不具备热泵的效率或转换优势。而且，当一个热泵接近它的最低效外部温度运行时（通常是 0°F），热泵的性能就会接近于电阻加热器。例 9.10 给出了通过热泵为房间供暖的简单分析。例 9.11 讨论了使用卡诺热泵为房间供暖的节能问题。

9.3.3　使用太阳能系统的家庭供暖

主动式或被动式太阳能系统能够被用于住宅加热。主动式太阳能加热系统有两种基本类型：在太阳能集热器中对液体或空气加热。太阳能设备是环境友好的，而且可以安装在房顶，与房屋的建筑结构合为一体。如图 9.6 所示，液基系统将水或防冻溶液加热，而气基系统则是将空气集热器内的空气加热[10]。循环泵通过集热器来运输流体，因此它的温度提高了 10～20°F（5.6～11°C）。通过太阳能热水集热器的流量应该是在每平方英尺集热器 0.02～0.03gal/min。这两个系统都会吸收太阳能辐射，并将太阳能直接传递给内部空间或储存系统。当需要储存时，更常用液基系统，而且它非常适用于带有热水散热器和热泵的锅炉。这些集热器的寿命很容易超过十年。

当在一年中大部分时间采用主动式太阳能供暖系统时，它可以降低更多的成本。如果同时还使用主动式空间供暖系统来提高家用热水，那就进一步提高了它



图 9.6　一个家庭使用液基太阳能系统为房间供暖和水加热。太阳能设备是环境友好的，而且可以安装在房顶，与房屋的建筑结构合为一体[18,26]

的经济性。使用主动式太阳能系统来为家庭供暖，能够显著地减少化石燃料消耗、空气污染以及温室气体的排放[19]。

被动式太阳能加热器不使用风扇或鼓风机。在被动式太阳能建筑设计中，窗户、墙壁和地板在冬季用来以热量的形式收集、储存和分配太阳能，在夏季则是用来散发太阳能热。被动式太阳能建筑则是利用当地的气候。要考虑的因素包括窗户的安装位置、隔热、热质量与阴影遮蔽等。

例 9.10　通过热泵为房间供暖

使用热泵为房间供热，并将温度保持在 18°C。某天，外部温度为 -2°C，房间的热量散失率为 75000kJ/h。热泵运行的性能系数（COP）为 2.8。请确定①热泵所需的功率，②吸收自外界冷空气的吸热率。

解：

假设：稳态运行。

① 房间维持在 18°C。

热泵必须提供与冷源损失的热量相同的热量：

$$q_H = 75000\text{kJ/h} = 20.83\text{kW}$$

热泵所需的功率为

$$\text{COP}_{HP} = \frac{\dot{q}_H}{\dot{W}_{net,in}} \rightarrow \dot{W}_{net,in} = \frac{\dot{q}_H}{\text{COP}_{HP}} = \frac{20.83\text{kW}}{2.8} = 7.44\text{kW}$$

② 能量平衡：　$\dot{q}_H - \dot{q}_C = \dot{W}_{net,in} = 7.44\text{kW}$

$$\dot{q}_C = \dot{q}_H - \dot{W}_{net,in} = (20.83 - 7.44)\text{kW} = 13.39\text{kW}$$

提取自外部的热量为 13.39kW。房间仅需支付 7.44kW 的能量，这些能量是以电功的形式提供给热泵的。

如果不得不使用电阻加热器，必须提供 20.83kW 的电能，因此，通过使用热泵代替电加热器节约的能量为 13.39/20.83 = 0.64（或 64%）。

例 9.11　使用卡诺热泵为房间供暖的节能问题

在冬季，使用一个卡诺热泵为房间供暖。房间维持在 20°C。据估算，在外部温度为 -4°C时，房间的热量损失率为 120000kJ/h。请确定热泵所需的最小功率以及吸收自外界冷空气的吸热率。

解：

假设：稳态运行。

热源和冷源的温度为

$$T_H = 273.15 + 20°C = 293.15K \text{ 和 } T_C = 273.15 - 4°C = 269.15K$$

提供给温暖的房间内的热量：

$$q_H = 120000kJ/h = 33.33kW$$

只有完全可逆的热泵才有可能实现最小功率。这个热泵是卡诺热泵。

卡诺热泵的性能系数为

$$COP_{HP} = \frac{\dot{q}_H}{\dot{W}_{net,in}} = \frac{1}{1-(T_C/T_H)} = \frac{1}{1-(269.15K/293.15K)} = 12.2$$

因为房间的热量散失率 120000kJ/h 维持房间 20°C，热泵必须从冷源提供相同的热量：

能量平衡：$COP_{HP} = \frac{\dot{q}_H}{\dot{W}_{net,in}} \rightarrow \dot{W}_{net,in} = \frac{\dot{q}_H}{COP_{HP}} = 2.73kW$

$$\dot{q}_C = \dot{q}_H - \dot{W}_{net,in} = (33.3 - 2.73)kW = 30.57kW$$

房间仅需支付 2.73kW。如果通过一个电阻加热器使用电力来供暖，必需的热量为 33.3kW。由外界冷空气所提供的必要热量为 30.6kW。因此，节约的能量为 30.6kW/33.3kW = 0.92(或 92%)。

9.4　能量效率标准

住宅用燃烧炉和锅炉的热效率由年度燃料利用效率（AFUE）来度量。年度燃料利用效率为典型的全年燃烧炉或锅炉的热输出与它们消耗的总能源之比。年度燃料利用效率并不考虑空气循环和燃烧风扇功率消耗以及风道或管道分配系统的热损失。AFUE 值为 90%，意味着燃料中 90% 的能量变为房间的热量，其余 10% 通过烟囱或其他方式散失。风道或管道系统的热损失可高达燃烧炉能量输出

的35%。表9.1为使用不同的化石燃料和电能的燃烧炉和锅炉的一些典型AFUE值[21]。在美国，部分最小允许的AFUE极限如下：

- 非冷凝化石燃料、暖空气燃烧炉为78%；
- 化石燃料锅炉为80%；
- 燃气蒸汽锅炉为75%。

表9.1 燃烧炉和锅炉的一些典型的年度燃料利用效率（AFUE）

燃　料	燃炉/锅炉	AFUE（%）
加热油	铸铁（1970年之前）	60
	保持头燃烧炉	70~78
	中等效率	83~89
电加热	集中式或基板式	100
天然气	传统型	55~65
	中等效率	78~84
	冷凝	90~97
丙烷	传统型	55~65
	中等效率	79~85
	冷凝	88~95
木柴	传统型	45~55
	先进型	55~65
	最先进型	75~90

注：Lekov等人[21]。

使用更高效的供暖系统来替代传统的供暖系统，假设这两个系统具有相同的热量输出，其年度节能可以使用表9.2来估算。对于旧设备来说，升级到一个新系统的实际节能可以远远高于表9.2中的数据。

表9.2 假设在热输出相同的条件下，通过提高现有加热设备的效率，每100美元燃料成本的估算节约成本

现有系统AFUE（%）	新系统与更新的系统AFUE（%）							
	60	65	70	75	80	85	90	95
55	8.3美元	15.4美元	21.4美元	26.7美元	31.2美元	35.3美元	38.9美元	42.1美元
60	–	7.7美元	14.3美元	20.0美元	25.0美元	29.4美元	33.3美元	37.8美元
65	–	–	7.1美元	13.3美元	18.8美元	23.5美元	27.8美元	31.6美元
70	–	–	–	6.7美元	12.5美元	17.6美元	22.2美元	26.3美元
75	–	–	–	–	6.5美元	11.8美元	16.7美元	21.1美元
80	–	–	–	–	–	5.9美元	11.1美元	15.8美元
85	–	–	–	–	–	–	5.6美元	10.5美元

注：Lekov等人[21]。

美国供暖、制冷和空调工程师协会（ASHRAE）是供暖、通风、空调与制冷领域的一个国际技术协会。AFUE 的计算使用 ASHRAE 标准 103（ASHRAE 2007）。例如，在标准的试验条件之下，一个热效率为 78% 的燃烧炉的 AFUE 值只有 64%。

9.4.1 空调的效率

一个特定的冷却装置的能量效率比（EER）是指，在给定的运行点处，输出的冷却量（单位为：Btu/h）与输入的电能（单位为：W）之比。空调的效率通常是使用季节性能量效率比率（SEER）来表示。一台设备的 SEER 等级是它在一个典型的冷却季节期间的冷却输出量（单位为：Btu）除以同期的总电能输入（单位为：Wh）。性能系数（COP）是一种瞬时测量（即一种功率除以功率的测量），而 EER 和 SEER 都是一个时间段的平均值。这里所说的时间段，对于 EER 来说是恒定条件下的几小时，对于 SEER 来说，则是典型的气象和室内条件下的一整年。住宅用集中冷却设备的典型 EER = 0.875 × SEER。近似等价于 SEER 13级的 COP 值是 3.43，它意味着用于热泵运行的每单位做功会消耗室内 3.43 个单位的热能。SEER 等级在一个季度的基础上更加准确地反映了系统的总体效率，而 EER 则是反映了系统在峰值日运行的能量效率。

空调的规格通常以“吨”冷却量的形式来表示，1t 冷却量等价于 12000Btu/h（3500W）。这是 24h 融化 1t 冰大致所需的热量。例 9.12 给出了一个空调的电力成本估算。

例 9.12 空调的电力成本

请估算一台规格为 5000Btu/h（1500W）的空调设备的电力成本，SEER 为 10Btu/Wh。在一个冷却季期间，该设备总共使用 1500h，单位电力成本为 0.14 美元/kWh。

解：

空调的规格通常以“吨”冷却量的形式来表示，1t 冷却量等价于 12000Btu/h（3500W）。

假定该设备是一个小型设备，而且其年度总冷却量输出为

$$(5000\ \text{Btu/h}) \times (1500\text{h/年}) = 7500000\text{Btu/年}$$

季节性能量效率比（SEER）为 10，年度的电能使用量为

$$(7500000\text{Btu/年})/(10\text{Btu/Wh}) = 750000\text{Wh/年} = 750\text{kWh/年}$$

在单位电力成本为 0.14 美元/kWh 时，其年度成本为

$$(750\text{kWh/年})(0.14\ \text{美元/kWh}) = 105\ \text{美元/年}$$

使用的平均功率也可以更简单地计算为

平均功率 = (Btu/h)/(SEER,Btu/Wh) = 5000/10 = 500W = 0.5kW

在电力成本为 0.14 美元/kWh 时，每小时的成本为

(0.5kW)(0.14 美元)/kWh = 0.07 美元/h

对于 1500h/年,总体成本为(0.07 美元/h)(1500h/年) = 105 美元

9.4.2　最大可能的冷却效率

具有最大可能效率的制冷过程为卡诺循环。一台使用卡诺循环的空调的性能系数（COP）为

$$\mathrm{COP}_{\mathrm{Carnot}} = \frac{T_{\mathrm{C}}}{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{C}}} \tag{9.12}$$

式中，T_{C} 为室内温度；T_{H} 为室外温度，单位为 K 或°R。

EER 的计算公式如下（它是从 Btu/h 到 W 的换算因数）：

$$\mathrm{EER}_{\mathrm{Carnot}} = 3.413(\mathrm{COP}_{\mathrm{Carnot}}) \tag{9.13}$$

如果室外温度为 100°F（311K）、室内温度为 95°F（308K），根据上述方程可得出 COP 等于 103，或者 EER 等于 350。这大约是目前可用的典型家用空调的 10 倍。EER 的最大值随着室内外空气温差的增大而减小，例如：

$$T_{\mathrm{H}} = 120°\mathrm{F}(49°\mathrm{C}) = 322.15\mathrm{K}, T_{\mathrm{C}} = 80°\mathrm{F}(27°\mathrm{C}) = 300.15\mathrm{K}$$

$$\mathrm{COP}_{\mathrm{Carnot}} = 300.15\mathrm{K}/(322.15 - 300.15)\mathrm{K} = 13.6$$

或

$$\mathrm{EER} = (3.413)(13.6) = 46.4$$

SEER 的最大值可以根据季节的预期温度范围的 EER 最大值平均而得。

中央空调的 SEER 至少应该为 14。使用效率更高的系统可以实现大量的能量节约。例如：

通过将 SEER 9 升级到 SEER 13。

减少的功率消耗为 = (1 − 9/13) = 0.30。

这意味着功率消耗将减少 30%。住宅用空调设备的 SEER 等级可以高达 26。例 9.13 给出了一台空调年度功耗成本的计算。例 9.14 讨论了一个 SEER 等级较高的降温设备的可能节能值。

例 9.13　请计算一台空调的年度功耗成本

请估算一台 6t 空调设备的年度运行耗电成本，该空调每年运行 2000h，SEER为 10 级，能量的成本为 0.16 美元/kWh。

解：

空调的规格通常以“吨”冷却量的形式来表示：

1t 冷却 = 12000Btu/h（3500W）。

这是 24h 融化 1t 冰大致所需的热量。

年度的成本电力消耗为(6)(12000Btu/h) =72000Btu/h

$$\text{成本} = \frac{(\text{规格,Btu/h})(\text{时间,h/年})(\text{能量的成本,美元/kWh})}{(\text{SEER,Btu/Wh})(1000\text{W/kW})}$$

(72000Btu/h)(2000h/年)(0.16 美元/kWh)/[(10Btu/Wh)(1000W/kW)]

=2304 美元/年

热源和冷源的温度:

$$T_H = 273.15 + 20°C = 293.15K$$

$$T_C = 273.15 - 4°C = 269.15K$$

$$T_H - T_C = 24K$$

$$EER_{Carnot} = 3.41\left(\frac{T_C}{T_H - T_C}\right) = 3.41(269.13/24) = 38.24$$

EER 的最大值随着室内外空气温差的增大而减小。

例 9.14　使用 SEER 等级较高的降温设备降低的成本

现在使用的一台住宅用 4t 空调的 SEER 为 10 级。该空调将被取代一个SEER 等级为 22 的新设备所取代。该设备每年运行 130 天，每天平均运行 10h。内部和外部平均温度分别为 21°C和 3°C。单位能量的成本为 0.16 美元/kWh。请估算节约的电力成本以及最大 EER。

解:

冷却负荷为 4t:(4)(12000Btu/h) =48000Btu/h(14000W)。

(130 天/年)(10h/天) =1300h/年

电能的估算成本为

SEER =10，能量成本为 0.16 美元/kWh，每年运行 130 天，每天运行 10h:

成本 =(48000Btu/h)(1300h/年)(0.16 美元/kWh)/[(10Btu/Wh)(1000W/kW)]

=998.4 美元/年

SEER =22,能量成本为 0.16 美元/kWh,每年运行 130 天,每天运行 10h:

成本 =(48000Btu/h)(1300h/年)(0.16 美元/kWh)/[(22Btu/Wh)(1000W/kW)]

=453.8 美元/年

年度节约的成本 =998.4 美元/年 -453.8 美元/年 =44.6 美元/年

典型的 EER 与 EER 最大值之比 EER /EER_{max} =19.25/52.31 =0.368

目前降温设备的典型 EER:

EER =0.875(SEER) =0.875(10) =8.75

新降温设备的典型的 EER:

EER =0.875(SEER) =0.875(22) =19.25

最大的值 EER：

热源和冷源的温度：

$$T_H = 273.15 + 21\,^\circ\mathrm{C} = 294.15\mathrm{K}$$

$$T_C = 273.15 + 3\,^\circ\mathrm{C} = 276.15\mathrm{K}$$

$$T_H - T_C = 18\mathrm{K}$$

$$\mathrm{EER}_{\mathrm{Carnot}} = 3.41\left(\frac{T_C}{T_H - T_C}\right) = 3.41(276.13/18) = 52.31$$

EER 的最大值随着室内外空气温差的增大而减小。在使用效率更高的设备之后，年度节能非常显著。新设备的 EER 值只有 EER 最大值的 36.6%。

9.4.3　燃料效率

燃料效率意味着一个将燃料中的化学能转换为动能或功的过程的效率。提高燃料效率特别地有益于化石燃料发电厂或需要处理燃料燃烧的工业。在交通运输领域，燃料效率可以用 mile/gal（mpg）或 km/L 来表示。燃料效率取决于一个车辆的多个参数，包括它的发动机参数、气动阻力与重量等。混合车辆使用两种或更多的推进能源，实现了较高的燃料效率，比如一个小型燃烧发动机与一个电动机相联合[11,16,21]。例 9.15 对电能供暖与天然气供暖进行了比较。例 9.16 和例 9.17讨论了在两种不同的燃烧效率和发电机效率下，一个燃煤蒸汽发电厂所需的燃煤量。这些例子表明，随着燃烧效率和发电机效率的提高，所需煤量从 23.9t/h 减少到 36.6t/h。这样会节煤 35% 左右。

例 9.15　电能供暖与天然气供暖的比较

电加热器的效率约为 73%，而天然气加热器的效率则为 38%。一个房间供暖需要 4kW。单位电力成本为 0.1 美元/kWh，而天然气的成本为 0.60 美元/克卡。请估算电能供暖和天然气供暖系统两者的能源消耗率。

解：

电加热器提供的能量为

$$q_{\mathrm{used}} = q_{\mathrm{in}}\eta_{\mathrm{th}} = (4\mathrm{kW})(0.73) = 2.92\mathrm{kW}$$

单位能量的成本与效率成反比：

$$\text{单位电能的成本} = (\text{单位能量的成本})/(\text{效率})$$

$$= 0.1\ \text{美元}/0.73 = 0.137\ \text{美元/kWh}$$

$$\text{克卡} = 29.3\mathrm{kWh}(\text{见表 1.10})$$

燃气加热器的能量输入（相同的能量利用率 2.92kW）：

$$q_{\mathrm{in,gas}} = q_{\mathrm{used}}/\eta_{\mathrm{th}} = 2.92\mathrm{kW}/0.38 = 3.84\mathrm{kW}(=13100\mathrm{Btu/h})$$

因此，要实现与电能供暖装置相同的性能，燃气炉的等级至少应该为

13100Btu/h。

气体的单位能量成本 = 能量成本/效率

= [(0.60 美元/克卡)/(29.3kWh/克卡)]/0.38

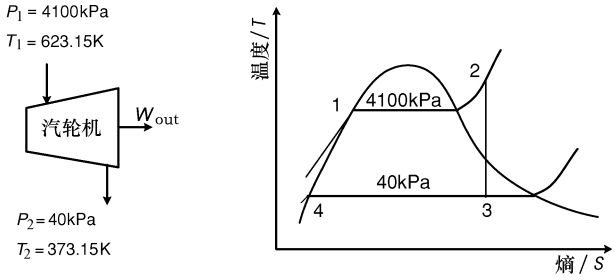
= 0.054 美元/kWh

燃气与电能的单位成本之比为 0.054 美元/0.137 美元 = 0.39

使用天然气的成本约为使用电能成本的 39%。因此，使用电加热器供暖的成本更高。

例 9.16　一个燃煤蒸汽发电厂的总效率及所需的燃煤量

一个绝热汽轮机通过将状态为 4100kPa 和 350°C的过热蒸汽膨胀来实现发电。功率输出为 50MW。蒸汽流出汽轮机时的状态为 40kPa 和 100°C。如果燃烧效率为 0.75，发电机效率为 0.9，请确定该发电厂的总效率与每小时的供煤量。



解：

假设：稳态绝热运行。动能和势能的变化可以忽略不计。

计算基础：　　蒸汽流量 = 1kg/s

燃烧效率 $\eta_{comb} = 0.75$

发电机效率 $\eta_{gen} = 0.9$

功率输出 = 50MW = 50000kW

根据表 F4 查得：

汽轮机入口条件为

$$P_2 = 4100\text{kPa}, T_2 = 623.15\text{K}, H_2 = 3092.8\text{kJ/kg}, S_2 = 6.5727\text{kJ/kg K}$$

汽轮机出口条件为

$$P_4 = P_3 = 40\text{kPa}, T_3 = 373.15\text{K}, V_4 = 1.027\text{cm}^3/\text{g} = 0.001027\text{m}^3/\text{kg}$$

在 40kPa 时，$S_{4\text{sat vap}} = 7.6709\text{kJ/kg K}$，$S_{4\text{sat liq}} = 1.2026\text{kJ/kg K}$

在 40kPa 时，$H_{4\text{sat vap}} = 2636.9\text{kJ/kg}$，$H_{4\text{sat liq}} = 317.6\text{kJ/kg}$（见表 F3）

$$W_{p,in} = V_4(P_1 - P_4) = (0.001027\text{m}^3/\text{kg})(4100 - 40)\text{kPa}(1\text{kJ}/1\text{kPa m}^3) = 4.2\text{kJ/kg}$$

$$H_1 = H_4 + W_{p,in} = (317.6 + 4.2)\text{kJ/kg} = 321.8\text{kJ/kg}$$

对于等熵运行：$S_3 = S_2 = 6.5727\text{kJ/kg K}$

因为 $S_2 < S_{3\text{sat vap}}$（$6.5727 < 7.6709$），因此，出口处的蒸汽为饱和液汽混合物。

混合物的蒸汽干度：

$$x_3 = \frac{S_2 - S_{2\text{sat liq}}}{S_{2\text{sat vap}} - S_{2\text{sat liq}}} = \frac{6.5727 - 1.2026}{7.6709 - 1.2026} = 0.83$$

$$H_3 = (1 - x_3)H_{3\text{sat liq}} + x_3 H_{3\text{sat vap}} = 2243.1\text{kJ/kg}$$

热相互作用为

$$q_{\text{in}} = \dot{m}(H_2 - H_1) = (3092.8 - 321.8)\text{kJ/kg} = 2771.0\text{kJ/s}$$

$$q_{\text{out}} = \dot{m}(H_3 - H_4) = (2243.1 - 317.6)\text{kJ/kg} = 1925.5\text{kJ/s}$$

热效率：$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}} = 0.305$ 或 30.5%

发电厂总效率：$\eta_{\text{overall}} = \eta_{\text{th}}\eta_{\text{comb}}\eta_{\text{gen}} = (0.305)(0.75)(0.9) = 0.205$ 或 20.5%

所需要的煤能量速率：$\dot{E}_{\text{coal}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\eta_{\text{overall}}} = \frac{50000\text{kW}}{0.205} = 243900\text{kJ/s}$

煤（烟煤）的能量 $= 24000\text{kJ/kg}$（见表 2.6）

$$\dot{m}_{\text{coal}} = \frac{\dot{E}_{\text{coal}}}{\eta_{\text{overall}}} = \frac{243900}{24000}\left(\frac{1\text{t}}{1000\text{kg}}\right) = 0.0101\text{t/s} = 36.6\text{t/h}$$

例 9.17　一个燃煤蒸汽发电厂所需要的煤量

一个绝热汽轮机通过将状态为 4100kPa 和 350°C的过热蒸汽膨胀来实现发电。蒸汽流量为 42kg/s。蒸汽流出汽轮机时的状态为 40kPa 和 100°C。如果燃烧效率为 0.77，发电机效率为 0.95，请确定该发电厂的总效率与每小时的供煤量。

解：

假设：稳态绝热运行。动能和势能的变化可以忽略不计。

计算基础：蒸汽流量 $= 1\text{kg/s}$

燃烧效率 $\eta_{\text{comb}} = 0.77$

发电机效率 $\eta_{\text{gen}} = 0.95$

汽轮机入口：

$P_2 = 4100\text{kPa}, T_2 = 623.15\text{K}, H_2 = 3092.8\text{kJ/kg}, S_2 = 6.5727\text{kJ/kg K}$（见表 F4）

汽轮机出口：

$P_4 = P_3 = 40\text{kPa}$ $T_3 = 373.15\text{K}, V_4 = 1.027\text{cm}^3/\text{g} = 0.001027\text{m}^3/\text{kg}$（见表 F3）

在 40kPa 时，$S_{4\text{sat vap}} = 7.6709\text{kJ/kg K}$，$S_{4\text{sat liq}} = 1.2026\text{kJ/kg K}$

在 40kPa 时，$H_{4\text{sat vap}} = 2636.9\text{kJ/kg}$，$H_{4\text{sat liq}} = 317.6\text{kJ/kg}$（见表 F4）

$$W_{p,in} = V_4(P_1 - P_4) = (0.001027\text{m}^3/\text{kg})(4100 - 40)\text{kPa}(1\text{kJ}/1\text{kPa m}^3)$$
$$= 4.2\text{kJ}/\text{kg}$$
$$H_1 = H_4 + W_{p,in} = (317.6 + 4.2)\text{kJ}/\text{kg} = 321.8\text{kJ}/\text{kg}$$

对于等熵运行 $S_3 = S_2 = 6.5727\text{kJ}/\text{kg K}$

因为 $S_2 < S_{3\text{sat vap}}$（$6.5727 < 7.6709$），因此，出口处的蒸汽为饱和液汽混合物。

混合物的蒸汽干度：$x_3 = \dfrac{S_2 - S_{2\text{sat liq}}}{S_{2\text{sat vap}} - S_{2\text{sat liq}}} = \dfrac{6.5727 - 1.2026}{7.6709 - 1.2026} = 0.83$

$$H_3 = (1 - x_3)H_{3\text{sat liq}} + x_3 H_{3\text{sat vap}} = 2243.1\text{kJ}/\text{kg}$$

热相互作用为

$$q_{in} = (H_2 - H_1) = (3092.8 - 321.8)\text{kJ}/\text{kg} = 2771.0\text{kJ}/\text{kg}$$
$$q_{out} = (H_3 - H_4) = (2243.1 - 317.6)\text{kJ}/\text{kg} = 1925.5\text{kJ}/\text{kg}$$

$$\dot{W}_{net\ out} = \dot{m}(q_{in} - q_{out}) = (42\text{kg}/\text{s})(2771.0 - 1925.5)\text{kJ}/\text{kg} = 35511\text{kW}$$

热效率：

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 0.305 \text{ 或 } 30.5\%$$

发电厂总效率：$\eta_{overall} = \eta_{th}\eta_{comb}\eta_{gen} = (0.305)(0.77)(0.95) = 0.223$

所供应的煤能量速率：$\dot{E}_{coal} = \dfrac{\dot{W}_{net}}{\eta_{overall}} = \dfrac{35511}{0.223} = 159165\text{kJ}/\text{s}$

煤（烟煤）的能量 $= 24000\text{kJ}/\text{kg}$（见表 2.8 和表 2.9）

$$\dot{m}_{coal} = \frac{\dot{E}_{coal}}{\eta_{overall}} = \frac{159165}{24000}\left(\frac{1\text{t}}{1000\text{kg}}\right) = 0.0066\text{t}/\text{s} = 23.9\text{t}/\text{h}$$

随着燃烧效率和发电机效率的提高，所需煤量从 36.6t/h 减到了 23.9t/h。这将会节约大约 35% 的煤。

9.4.4　车辆的燃料效率

车辆的燃料效率可以用 mile/gal（mpg）或 L/km 来表示。对比表明：

- 北美中型小汽车平均行驶效率为城市 21mile/gal（美制）（11L/100km），高速公路 27mile/gal（美制）（9L/100km）。
- 现代的欧洲中型小汽车平均行驶效率为城市 36mile/gal（6.5L/100km），高速公路 47mile/gal（5L/100km）。

柴油发动机通常可以比汽油发动机达到更大的燃料效率。小客车的柴油发动机的能量效率最高可达 41%，不过，通常是 30%；而汽油发动机则是最高可达 37.3%，不过，通常是 20%。较高的压缩比有助于提升能量效率，但是每单位

体积的柴油燃料也比汽油多将近 10% 的能量，这也有助于减少给定的功率输出下的燃料消耗。

燃料效率直接影响到引起污染的排放。小汽车能够使用多种不同的燃料源，比如汽油、天然气、液化石油气、生物燃料或者电能等。所有这些都会造成程度不同的大气污染。1kg 碳会产生大约 3.63kg 的 CO_2 排放。来自汽油和柴油燃烧的典型平均排放如下：

- 汽油燃烧排放 19.4lb CO_2/USgal 或者（2.32kg CO_2/L）。
- 柴油燃烧排放 22.2lb CO_2/USgal 或者（2.66kg CO_2/L）。

这些值仅仅是燃料产物最终形式的 CO_2 排放，并不包括在燃料生产的钻探、抽取、运输和精炼等步骤期间产生的额外的 CO_2 排放[11]。例 9.18 和例 9.19 给出了一辆小汽车的燃料消耗估算，它表明，当提高了小汽车的燃料效率时，燃料的节约和 CO_2 排放量的减少会非常显著。

例 9.18　一辆小汽车的燃料消耗

汽油小汽车发动机的总体效率为 25%~28%，柴油发动机为 34%~38%，大型发电厂的总体效率为 40%~60%[7]。一辆功率输出为 120hp 的小汽车发动机的热效率为 24%。如果其燃料的高热值为 20400Btu/lb，请确定该小汽车的燃料消耗。

解：

假设：小汽车具有恒定的功率输出。

汽油小汽车发动机：

$$\eta_{th}=\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{q}_{in}}\longrightarrow \dot{q}_{in}=\frac{\dot{W}_{net}}{\eta_{th}}=\frac{120\text{hp}}{0.24}\left(\frac{2545\text{Btu/h}}{\text{hp}}\right)$$

$$\dot{q}_{in}=1272500\text{Btu/hr}$$

净热值 = 高热值(1 − 0.1) = 18360Btu/lb(近似值)

燃料消耗 = $\dot{q}_{输入}$/净热值 = 1272500Btu/h/18360Btu/lb = 69.3lb/h

假设汽油的平均密度为 0.75kg/L：

$$\rho_{gas}=(0.75\text{kg/L})(2.2\text{lb/kg})(1/0.264\text{gal})=6.25\text{lb/gal}$$

燃料消耗（单位：gal）：(69.3lb/h)/(6.25lb/gal) = 11.1gal/h

柴油发动机的效率为 36%：

$$\eta_{th}=\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{q}_{in}}\longrightarrow \dot{q}_{in}=\frac{\dot{W}_{net}}{\eta_{th}}=\frac{120\text{hp}}{0.36}\left(\frac{2545\text{Btu/h}}{\text{hp}}\right)=848333\text{Btu/h}$$

$$\dot{q}_{in}=848333\text{Btu/h}$$

9.4.5　汽车行驶的节能

一些可能的节能步骤如下：

- 超速行驶、快速加速与制动会浪费燃气。它可以将高速公路的汽油里程（gas mileage，指一加仑汽油所行驶的里程）降低 33%，在城镇公路则是降低大约 5%。当速度高于 60mile/h，汽油里程通常会快速下降，遵守速度限制可能会节约 7%~23% 的燃料。
- 车辆额外装载 100lb，会让燃料效率降低高达 2%。
- 使用巡航控制有助于节约燃气。
- 解决一个严重的维护问题，比如有故障的氧气传感器，可能会将汽油里程至多提高 40%。
- 令轮胎保持合适的胎压，可以将汽油里程至多提高 3.3%。

将能量转换为旋转运动的最有效的机器是电动机，比如电动小汽车使用的电动机。不过，电能并不是一次能源，因此电力生产的效率也必须被考虑进去。将来的氢能小汽车，无论是通过燃料电池的化学反应产生电力去驱动电动机，还是在燃烧发动机中直接燃烧氢气，都是商业可行的。这些车辆排放管道排出的气体接近零污染。假设氢气通过使用来自非污染性资源（比如太阳能、风能或者水电等）的电能电解而得，那就可以实现潜在的大气污染的最小化。除了电力生产或氢气生产的能量成本，还应该考虑支持大规模使用这种车辆的传输与（或）储存损失。

例 9.19　使用燃料效率更高的小汽车节约的燃料

假设一辆小汽车的燃料消耗为城市交通 11L/100km、高速公路 9L/100km，另一辆小汽车的燃料消耗为城市交通 6.5L/100km、高速公路 5L/100km。请估算燃料效率更高的小汽车每年平均行驶 15000km，每年所节约的燃料以及可以减少的排放量。

解：

每 100km 城市驾驶节约的燃料（单位：L）=（11 − 6.5）L = 4.5L

每 100km 高速公路驾驶节约的燃料（单位：L）=（9 − 5）L = 4.0L

每 100km 平均节约（4.0 + 4.5）L/2 = 4.2L

燃料效率高的小汽车每 100km 能够平均节约大约 4.2L 汽油。

对于一辆每年行驶 15000km 的小汽车来说，节约的燃料量为

（15000km/年）（4.2L/100km）= 630L/年（167gal/年）

汽油燃烧排放 19.4lb CO_2/USgal 或者（2.32kg CO_2/L）

年度排放减少量 =（2.32kg CO_2/L）（630L/年）

= 1462kg/年(或 3294lb/年)

随着全球小汽车燃料效率的提升，燃料节能和减少 CO_2 排放量的效果非常显著。

9.4.6 再生制动

在传统的制动系统中，过量的动能通过制动盘的摩擦转换成热能，并因此而浪费掉了。再生制动将车辆的动能转换为化学能，这种化学能储存于电池当中，并被用于再次驱动电池供电的小汽车以及混合燃气/电动小汽车。它的能量回收率约为 60%[25]。发动机中的先进算法控制着驱动和再生制动的发动机转矩。转矩指令取决于油门踏板的位置。发动机控制器将这个转矩指令转换为合适的三相电压与电流波形，从而以最有效的方式来产生发动机的受控转矩。当转矩用于车辆减速时，能量便返回到电池当中。

给后轮施加负转矩会引起一辆小汽车变为不稳定，因为再生制动是一个负转矩的来源。如果后轮开始滑动，牵引力控制系统就会限制再生制动。控制系统为驾驶员提供瞬时的正、负转矩指令。再生制动被限制为当电池完全充电，在这种情况下，发动机控制器将会限制再生转矩。随着电池供电车辆的增多，安全再生制动可能会成为动能转换和回收的一种有效方式。

9.5 电力配送和智能电网中的节能

智能电网是一种使用数字技术的电力网络形式。智能电网将电力传输给消费者来控制家用电器、优化功率流、减少废弃物，并且最大化地利用最低成本的生产资源。智能电网被设想信息化净计量系统去覆盖普通电网，该系统包括智能仪表在内。数据传输容量的增大使得可能将带有双工通信的感应、测量并控制装置应用到电网的发电、输电、配电以及消耗部分。这些装置能够将电网工况的有关信息与系统用户、操作员以及自动化装置通信。因此，平均消费者能够响应动态变化的电网条件[22]。

智能电网包括一个保持流入系统的所有电力追踪的智能监测系统。它还具有集成可再生电能的能力，比如太阳能和风能等。当能量成本最低时，用户可以允许智能电网打开所选的家用电器（比如洗衣机）或工厂中的一些工艺过程等。在峰值时间，它能够关掉所选的电器以减少需求[12]。智能电网的部分功能如下：

1）激励消费者积极参与电网的运行；

2）提供更高质量的功率，它将节约电力断供期浪费的成本；

3）适应所有的发电和储存选项；

4）通过更加有效地运行，能够繁荣电力市场；

5）使得间歇性发电资源能够具有较高的穿透性。

9.5.1　待机功率

待机功率是指许多电器处于关闭模式或者待机模式时所消耗的电能。单台电器典型的能量损失很低（1～25W），但是，当它乘以房间和商业建筑物中数十亿个电器时，待机损失将占据全世界电力使用总量的较大份额。待机功率可能会占家庭功率消耗的 7%～13%。待机功率问题的技术解决方案是采用待机模式能耗只有 100mW 的新一代功率变换器，而且这样能够减少高达 90% 的待机消耗。另一种解决方案是“智能电子开关”，它能在无负荷的时候切断电源，并在需要时直接恢复。

9.5.2　照明中的节能

照明所用的能量约占家庭用电账单的 10% 左右（见图 9.3）。紧凑型荧光灯（见图 9.7）比标准照明使用的能量大约低 75%，减少 75% 的热量生成，寿命则高达 10 倍以上。紧凑型荧光灯包含极少量的密封在玻璃管内的汞。虽然直线型荧光灯和紧凑型荧光灯的初始成本略高于白炽灯，但从全生命周期来说，它们是便宜的，因为它们消耗的电能较少[26]。例 9.20 给出了通过使用紧凑型荧光灯实现的节能。



图 9.7　紧凑型荧光灯比标准照明使用的能量大约低 75%

例 9.20　使用紧凑型荧光灯的节能

假设一个住宅平均用电率为 0.14 美元/kWh，一个家庭每年平均消耗大约 10000kWh。如果仅使用紧凑型荧光灯来照明，请估算每年的能量和成本节约。

解：

假设 11% 的家庭能量预算是用于照明，而且紧凑型荧光灯比标准照明使用的能量大约低 75%。

使用标准照明的年度能量使用和成本：

（10000kWh/年）（0.11）=1100kW/年

（1100kW/年）（0.14 美元/kWh）=154 美元/年

使用紧凑型荧光灯的年度能量使用和成本：

（1100kW/年）（1－0.75）=275kWh/年

（275kWh/年）（0.14 美元/kWh）=38.5 美元/年

年度能量和成本节约为

(1100 – 275) kWh = 825kWh

(154 – 38.5) 美元/年 = 115.5 美元/年

这是使用紧凑型荧光灯的能量和成本的节约。

9.5.3 能源采集

当能源采集用于一组房间、共同住宅、局部区域或者村庄而不是一个独立的基地时，尽管它的初始成本较高，但是它在成本和资源利用方面的效率更高。这些方式可以减少电力传输和电力配送时的损失，其损失可以仅占被传输能量的7%左右。净零的化石能源消耗需要地热、微水电、太阳能与风能资源的位置以维持其概念。零能量建筑设计中的关键议题之一就是能量节约与可再生能源(比如太阳能和风能等) 的分布式使用点采集之间的平衡。零能量或接近于零能量建筑技术被广泛接受可能会需要更多的政府鼓励、建筑规范调节或者传统能量成本的显著增加[4,13,26]。能量收获的一些好处如下：

- 使建筑物所有者免受未来的能量价格提高的影响。
- 由于室内温度更加均衡，从而提高了舒适度。
- 由于提高了能量效率，从而减少了总体拥有成本。

9.6 节能和可持续性

可持续性正在改进人类生活的质量，同时生活在支持生态系统的承载能力之内。人类对地球上系统的影响的总体驱动是生物物理资源特别是地球生态系统的破坏。可持续性公式试图利用三种因素去解释人类消耗对环境的影响 I：人口 P；消耗水平，即富裕程度 A；每单位资源使用的影响，表现为技术 T，并由 Daly 和 Farley[8]、Hak 等人[15]以及 Soederbaum[24]提出：

$$I = P \times A \times T \tag{9.14}$$

可持续性测量被用作环境、社会和经济领域的可持续性的定量基础（见图9.8)。可持续性的一个挑战是发展中世界的人口增加与发达世界的不可持续的消耗水平的共存。一些可持续性原则如下：

- 减少对自然沉积物（如化石燃料、矿石与矿物质等）的依赖。
- 减少对合成化学和其他非自然物质的依赖。
- 公平地满足人类的需要。

零能量建筑和绿色建筑是面向可持续性的两个努力方向。绿色建筑和可持续的建筑的目标是更有效地使用资源并降低建筑对环境的负面影响。零能量建筑可以通过完全或者非常显著地降低社会的能量使用以及建筑物寿命的温室气体排放

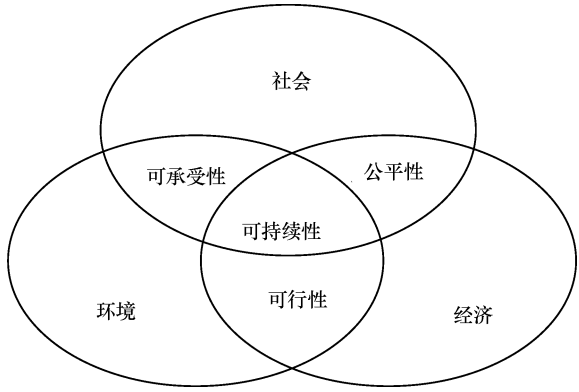


图 9.8　可持续性的三个要素[23,24]

来达到目标。零能量建筑并不是在所有的领域都可以被认为是否“绿色”，比如减少废弃物与使用回收的建筑材料等。不过，与其他需要输入能量与（或）化石燃料的“绿色”建筑相比，零能量建筑对生态的影响可能会非常低。绿色建筑认证计划项目需要显著地减少能量的使用[14]。

9.7　火用节约和火用

对于一些稳态流动过程，通过火用概念实现的节能如下[6,9]：

- 火用是通过与压降、流体摩擦以及由于温差而引起的流间热传递等有关的不可逆性而损失的。
- 在一个蒸汽发电厂中，火用传递是由于功和热，而且火用损失在控制体积之内。
- 在一个废热回收系统中，通过设计一个流间温差较小的热回收蒸汽发电机与（或）通过设计一个效率较高的汽轮机来减少摩擦，就可能降低热传递的不可逆性。
- 一个成本效益型设计可能是来自于可能减少火用损失与增加运行成本的潜在趋势之间的权衡考虑。

9.8　使用夹点分析实现公用工程的能量回收

一个过程可以有可用的热流和冷流。当在热流和冷流之间交换热量时，热量被回收，进而可以实现热公用工程和冷公用工程的需求最小化。使用夹点分析，通过将热流和冷流与网络热交换器相匹配，可以得到过程热与公用工程的最优能

量集成。在夹点分析中，热流和冷流能够只有交换能量高达最小允许的温差 ΔT_{min} 时，它被称为导致热传递最小驱动力的夹点[9,17]。

提高 ΔT_{min} 会带来更大的能量和更低的资本成本（一个更小的热交换器面积，见图 9.9）。例如，从 $\Delta T_{min}=10°C$ 提高 5°C会使热交换器面积降低 11%，同时所需的最小能量提高了大约 9%。为了找到最优的 ΔT_{min} 值，需要画出年度总成本曲线。最优 ΔT_{min} 出现在年度能量和资本总成本的最小值处。ΔT_{min} 的最优值通常处于 3~40°C，而且需要根据一个过程而建立。

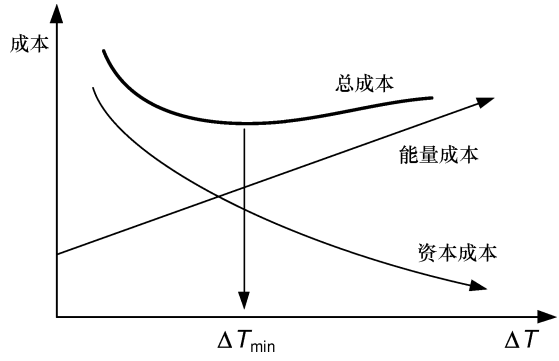


图 9.9　根据能量成本和资本成本变化的最优 ΔT_{min}

9.8.1　组合曲线

被称为组合曲线的温焓图表示了热流和冷流的热特征以及在它们之间传递的热量（见图 9.10）。每个流的焓变率为

$$\dot{q}=\dot{m}\Delta H=\dot{m}C_p\Delta T=\mathrm{MC}\Delta T \tag{9.15}$$

式中，ΔH 为焓变率；$\dot{m}$ 为质量流量；C_p 为热容量；ΔT 为流的温度变化；MC 为热容量率 $\dot{m}\dot{C}_p$。

焓变率是加在包括一个或多个流的各个温度间隔之上。由此可以得到如图 9.10所示的热流和冷流组合曲线。如果 $\dot{m}C_p$ 恒定不变，q 与 T 的关系将是一条直线：

$$\Delta T=\frac{1}{\dot{m}C_p}\dot{q} \tag{9.16}$$

这里估算的是焓变而不是绝对焓，而且图中组合线的水平位置是任意固定的。将两条曲线之一水平地移动，直到最接近的垂直温差距离与所选的 ΔT_{min} 值相匹配。夹点是 ΔT_{min} 在可调节的组合图上的位置，此时热曲线和冷曲线在垂直方向上的温度相互最为接近。热组合曲线的超调表示所需的最小冷公用工程

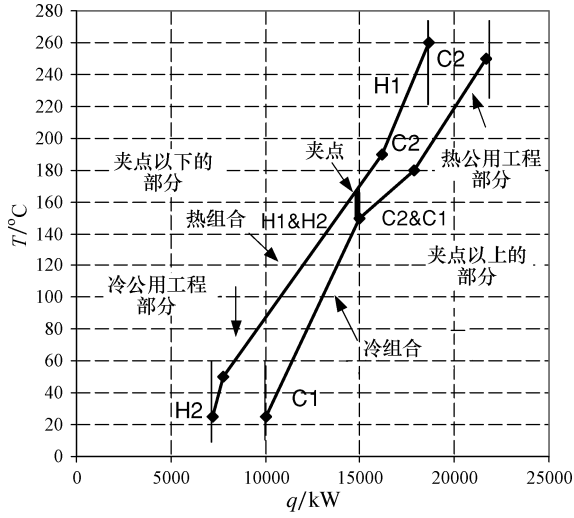


图 9.10　ΔT_{min}为 20°C时使用两个热（H）流和两个冷（C）的热组合曲线与冷组合曲线

($q_{c,min}$)，而冷组合曲线的超调则表示所需的最小热公用工程（$q_{h,min}$)(见图 9.10 和图 9.11)。例 9.21 给出了夹点分析在热集成处理以及热公用工程与冷公用工程最小化方面的应用。

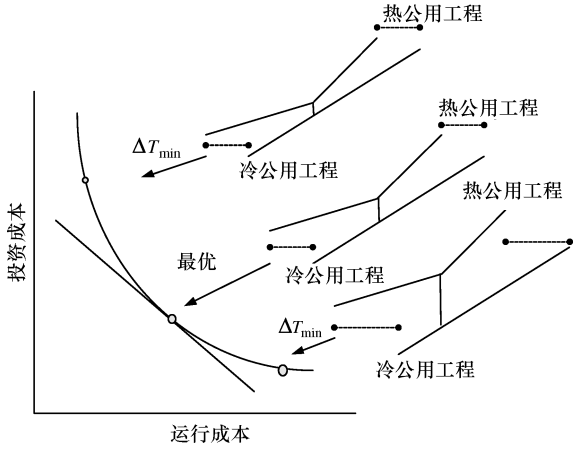


图 9.11　夹点技术的原理

在夹点之上，只需要热公用工程，而在夹点之下，则只需要冷公用工程。这些图可以使工程师实现昂贵的公用工程的最小化。通过减少公用工程需求，夹点分析也可以实现蒸发器、冷凝器、燃烧炉以及热泵的最优集成。夹点分析广泛地

应用于工业，带来了相当大的能量节约。图 9.11 显示了可用的热公用工程和冷公用工程之间最低温差的重要性。随着 ΔT_{min} 值的提高，热公用工程和冷公用工程与运行成本也一起提高。另一方面，投资成本随着 ΔT_{min} 值的下降而提高。因此，这两个相反的成本应该按照图 9.9 所示那样进行优化。

例 9.21　利用夹点分析实现的节能

在一个过程中，可用的热过程流和冷过程流及其热容量如下所示。

热过程流和冷过程流的工况

流		T_{in}/°C	T_{out}/°C	$C=\dot{m}C_p$(kW/°C)	$q=\dot{m}C_p\Delta T$/kW
C1	冷 1	25	180	40	6200
C2	冷 2	150	250	55	5500
H1	热 1	260	50	35	−7350
H2	热 2	190	25	25	−4125

构建 $\Delta T_{min}=20$°C和 $\Delta T_{min}=10$°C过程时的平衡组合曲线，并比较所需的热公用工程和冷公用工程。

解：

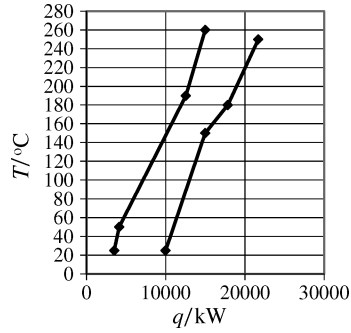
假设热流和冷流的热容量均为恒定值。

待加热流的起始焓变率选为 10000kW（在 25°C时），而待冷却流的焓变率基值则选为 15000kW（在 260°C时）。带有重叠的初始温度间隔如下所示：

初始温度间隔			C/(kW/°C)	q/kW	初始焓选择	
流	温度间隔/°C				T/°C	q/kW
					25	10000（任意值）
C1	25	150	40	5000	150	15000
C1 和 C2	150	180	95	2850	180	17850
C2	180	250	55	3850	250	21700
				11700		
					260	15000（任意值）
H1	260	190	35	−2450	190	12550
H2 和 H1	190	50	60	−8400	50	4150
H2	50	25	25	−625	25	3525
				−11475		

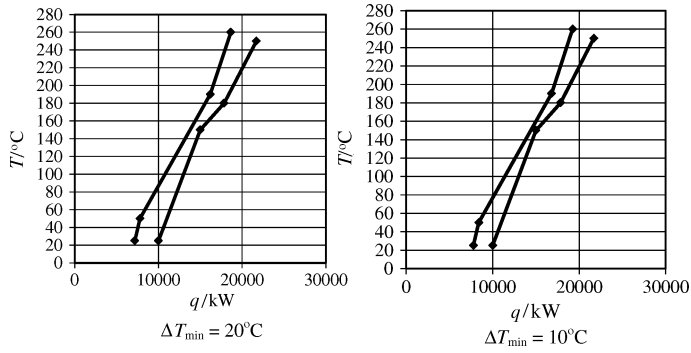
本表可以转换为如下所示的热组合曲线与冷组合曲线。

其中，组合曲线相互移动以致在夹点处最小温差 $\Delta T_{min}=20$°C，该图称为组合平衡图。



Revised 温度间隔			C/(kW/°C)	q/kW	Revised 焓选择	
流	所需的温度间隔/°C				q/kW	T/°C
					10000	25
C1	25	150	40	5000	15000	150
C1 和 C2	150	180	95	2850	17850	180
C2	180	250	55	3850	21700	250
				11700		
					18650	260
H1	260	190	35	-2450	16200	190
H2 和 H1	190	50	60	-8400	7800	50
H2	50	25	25	-625	7175	25
				-11475		

温差 $\Delta T_{min}=20°C$和 $\Delta T_{min}=10°C$的组合图如下所示：



对于温差 $\Delta T_{min}=10°C$和 20°C，估算热公用工程和冷公用工程的最小值如下：

冷公用工程（如冷却水）：$q_{cold,min}$/kW	2225	2825
热公用工程（如蒸汽）：$q_{hot,min}$/kW	2450	3050
温差：ΔT_{min}/°C	10	20

节能 = (3050 - 2450) kW = 600kW
节能 = (2825 - 2225) kW = 600kW

这种简单的分析表面较小的温差可以显著地减少所需的公用工程。

习　题

9.1　一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_p = 9$。压缩机入口处的新鲜空气温度为 295K。汽轮机入口的空气温度为 1300K。带有压缩机的该循环的运行效率为 80%，汽轮机的效率为 80%。气体流量为 3kg/s，单位燃料的成本为 0.15 美元/kWh。该循环每年运行 360 天。

① 假设使用标准空气，请确定该循环的热效率。

② 如果发电厂的回热器运行效率为 0.80，请确定该循环的热效率以及每年节约的燃料。

9.2　一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_p = 9$。压缩机入口处的新鲜空气温度为 300K。汽轮机入口的空气温度为 1300K。带有压缩机的该循环的运行效率为 85%，汽轮机的效率为 85%。气体流量为 5kg/s，单位燃料的成本为 0.15 美元/kWh。该循环每年运行 360 天。

① 假设使用标准空气，请确定该循环的热效率。

② 如果发电厂的回热器运行效率为 0.80，请确定该循环的热效率以及每年节约的燃料。

9.3　一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_p = 8$。压缩机入口处的新鲜空气温度为 300K。汽轮机入口的空气温度为 1350K。带有压缩机的该循环的运行效率为 85%，汽轮机的效率为 80%。气体流量为 5kg/s，单位燃料的成本为 0.11 美元/kWh。该循环每年运行 360 天。

① 假设使用标准空气，请确定该循环的热效率。

② 如果发电厂的回热器运行效率为 0.7，请确定该循环的热效率以及每年节约的燃料。

9.4　一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_p = 15$。压缩机入口处的新鲜空气温度为 290K。汽轮机入口的空气温度为 1400K。带有压缩机的该循环的运行效率为 90%，汽轮机的效率为 80%。气体流量为 4.5kg/s，单位燃料的成本为 0.16 美元/kWh。该循环每年运行 360 天。

① 假设使用标准空气，请确定该循环的热效率。

② 如果发电厂的回热器运行效率为 0.75，请确定该循环的热效率以及每年节约的燃料。

9.5　一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_p = 14$。压缩机入口处的新鲜空气温度为 290K。汽轮机入口的空气温度为 1400K。带有压缩机的该循环的运行效率为 90%，汽轮机的效率为 80%。气体流量为 4.5kg/s，单位燃料的成本为 0.16 美元/kWh。该循环每年运行 360 天。

① 假设使用标准空气，请确定该循环的热效率。

② 如果发电厂的回热器运行效率为 0.75，请确定该循环的热效率以及每年节约的燃料。

9.6　一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_p = 7.5$。压缩机入口处的新鲜空气温度为 290K。汽轮机入口的空气温度为 1250K。带有压缩机的该循环的运行效率为 90%，

汽轮机的效率为85%。气体流量为6.5kg/s，单位燃料的成本为0.10美元/kWh。该循环每年运行360天。

① 假设使用标准空气，请确定该循环的热效率。

② 如果发电厂的回热器运行效率为0.75，请确定该循环的热效率以及每年节约的燃料。

9.7 一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_p = 11.0$。压缩机入口处的新鲜空气温度为290K。汽轮机入口的空气温度为1350K。带有压缩机的该循环的运行效率为85%，汽轮机的效率为80%。气体流量为6.0kg/s，单位燃料的成本为0.10美元/kWh。该循环每年运行360天。

① 假设使用标准空气，请确定该循环的热效率。

② 如果发电厂的回热器运行效率为0.76，请确定该循环的热效率以及每年节约的燃料。

9.8 一个发电厂以理想的布雷顿循环运行，其压强比 $r_p = 10.0$。压缩机入口处的新鲜空气温度为290K。汽轮机入口的空气温度为1350K。带有压缩机的该循环的运行效率为85%，汽轮机的效率为80%。气体流量为6.0kg/s，单位燃料的成本为0.10美元/kWh。该循环每年运行360天。

① 假设使用标准空气，请确定该循环的热效率。

② 如果发电厂的回热器运行效率为0.76，请确定该循环的热效率以及每年节约的燃料。

9.9 一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。蒸汽的质量流量为20kg/s。流入汽轮机的蒸汽为3500kPa和400°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为78.5kPa。

① 请确定该循环的热效率。

② 如果排出蒸汽的压强降到15kPa，请确定其热效率。

③ 如果单位电力成本为0.15美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.10 一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。蒸汽的质量流量为35kg/s。流入汽轮机的蒸汽为4000kPa和350°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为101.3kPa。

① 请确定该循环的热效率。

② 如果排出蒸汽的压强降到15kPa，请确定其热效率。

③ 如果单位电力成本为0.12美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.11 一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。蒸汽的质量流量为30kg/s。流入汽轮机的蒸汽为3000kPa和400°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为67.5kPa。

① 请确定该循环的热效率。

② 如果排出蒸汽的压强降到15kPa，请确定其热效率。

③ 如果单位电力成本为0.12美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.12 一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。蒸汽的质量流量为30kg/s。流入汽轮机的蒸汽为2500kPa和300°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为62.5kPa。

① 请确定该循环的热效率。

② 如果排出蒸汽的压强降到15kPa，请确定其热效率。

③ 如果单位电力成本为0.12美元/kWh，请计算其年度节约的成本。

9.13 一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。蒸汽的质量流量为35kg/s。流入汽轮机的蒸汽为3000kPa和350°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为78.5kPa。

① 请确定该循环的热效率。

② 如果锅炉的压强增加到 10000kPa，而汽轮机入口温度则保持在 350°C，请确定其热效率。

③ 如果单位电力成本为 0.12 美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.14 一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。蒸汽的质量流量为 42kg/s。流入汽轮机的蒸汽为 2500kPa 和 300°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 15.0kPa。

① 请确定该循环的热效率。

② 如果锅炉的压强增加到 9000kPa，而汽轮机入口温度则保持在 300°C，请确定其热效率。

③ 如果单位电力成本为 0.12 美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.15 一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。蒸汽的质量流量为 50kg/s。流入汽轮机的蒸汽为 4000kPa 和 400°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 15.0kPa。

① 请确定该循环的热效率。

② 如果锅炉的压强增加到 11000kPa，而汽轮机入口温度则保持在 400°C，请确定其热效率。

③ 如果单位电力成本为 0.12 美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.16 一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。蒸汽的质量流量为 35kg/s。流入汽轮机的蒸汽为 3500kPa 和 300°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 78.5kPa。

① 请确定该循环的热效率。

② 如果锅炉的温度增加到 500°C，而压强维持在 3500kPa，请确定其热效率。

③ 如果单位电力成本为 0.15 美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.17 一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。蒸汽的质量流量为 40kg/s。流入汽轮机的蒸汽为 3000kPa 和 300°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 15kPa。

① 请确定该循环的热效率。

② 如果锅炉的温度增加到 500°C，而压强维持在 3000kPa，请确定其热效率。

③ 如果单位电力成本为 0.15 美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.18 一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。蒸汽的质量流量为 40kg/s。蒸汽流入汽轮机时为 6000kPa 和 350°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 15kPa。

① 请确定该循环的热效率。

② 如果锅炉的温度增加到 500°C，而压强维持在 6000kPa，请确定其热效率。

③ 如果单位电力成本为 0.15 美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.19 一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。蒸汽的质量流量为 40kg/s。流入汽轮机的蒸汽为 9000kPa 和 400°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 15kPa。

① 请确定该循环的热效率。

② 如果锅炉的温度增加到 550°C，而压强维持在 9000kPa，请确定其热效率。

③ 如果单位电力成本为 0.15 美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.20 请估算习题 9.18 中①和②的最大可能效率，并将它们与习题 9.18 中①和②获得的效率进行比较。

9.21　请估算习题 9.19 中①和②的最大可能效率，并将它们与习题 9.19 中①和②获得的效率进行比较。

9.22　一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。质量流量为 20kg/s 的蒸汽流入蒸汽轮机时为 3000kPa 和 400°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 78.5kPa。

① 如果锅炉的压强增加到 9000kPa，而汽轮机入口温度则保持在 400°C，请确定其热效率。

② 如果单位电力成本为 0.15 美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.23　一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。质量流量为 20kg/s 的蒸汽流入蒸汽轮机时为 4000kPa 和 400°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 15kPa。

① 如果锅炉的压强增加到 9500kPa，而汽轮机入口温度则保持在 400°C，请确定其热效率。

② 如果单位电力成本为 0.15 美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.24　一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。质量流量为 20kg/s 的蒸汽流入蒸汽轮机时为 5000kPa 和 350°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 15kPa。

① 如果锅炉的压强增加到 10000kPa，而汽轮机入口温度则保持在 350°C，请确定其热效率。

② 如果单位电力成本为 0.15 美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.25　一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。质量流量为 20kg/s 的蒸汽流入蒸汽轮机时为 9800kPa 和 350°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 78.5kPa。

① 如果锅炉的温度增加到 600°C，而压强维持在 9800kPa，请确定其热效率。

② 如果单位电力成本为 0.16 美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.26　一个蒸汽发电厂以简单理想朗肯循环运行。质量流量为 20kg/s 的蒸汽流入蒸汽轮机时为 8000kPa 和 325°C。蒸汽轮机的蒸汽排放压强为 78.5kPa。

① 如果锅炉的温度增加到 550°C，而压强维持在 8000kPa，请确定其热效率。

② 如果单位电力成本为 0.16 美元/kWh，请计算其年度节能量。

9.27　请估算习题 9.25 中①和②的最大可能效率，并将它们与习题 9.25 中①和②获得的效率进行比较。

9.28　请估算习题 9.26 中①和②的最大可能效率，并将它们与习题 9.26 中①和②获得的效率进行比较。

9.29　空气流量为 4kg/s，在一个稳态可逆过程中将其压缩，空气的入口状态为 100kPa 和 300K，出口压强为 1000kPa。请估算在以下情况的做功：①多变压缩，$\gamma = 1.3$，②带有中间冷却的两级理想多变压缩使用相同的多变指数 $\gamma = 1.3$，③如果单位电力成本为 0.20 美元/kWh，而且压缩机每年运行 360 天，请估算每年通过中间冷却节约的压缩做功和节约的电能。

9.30　空气被压缩在一个稳态和可逆过程中，从一个入口的状态 100kPa 和 285K 出口压强为 800kPa 的质量流量空气为 8kg/s。请估算在以下情况的做功：①多变压缩，$\gamma = 1.35$，②带有中间冷却的两级理想多变压缩使用相同的多变指数 $\gamma = 1.35$，③如果单位电力成本为 0.08 美元/kWh，而且压缩机每年运行 360 天，请估算每年通过中间冷却节约的压缩做功和节

约的电能。

9.31 空气被压缩在一个稳态和可逆过程中从一个入口的状态 110kPa 和 290K 出口压强为 900kPa。的质量流量空气为 10kg/s。请估算在以下情况的做功：①多变压缩，$\gamma = 1.3$，②带有中间冷却的两级理想多变压缩使用相同的多变指数 $\gamma = 1.3$，③如果单位电力成本为 0.1 美元/kWh，而且压缩机每年运行 360 天，请估算每年通过中间冷却节约的压缩做功和节约的电能。

9.32 空气被压缩在一个稳态和可逆过程中从一个入口的状态 110kPa 和 290K 出口压强为 900kPa。的质量流量空气为 10kg/s。请估算在以下情况的做功：①多变压缩，$\gamma = 1.2$，②带有中间冷却的两级理想多变压缩使用相同的多变指数 $\gamma = 1.2$，③如果单位电力成本为 0.12 美元/kWh，而且压缩机每年运行 360 天，请估算每年通过中间冷却节约的压缩做功和节约的电能。

9.33 空气被压缩在一个稳态和可逆过程中从一个入口的状态 100kPa 和 290K 出口压强为 900kPa。的质量流量空气为 5kg/s。请估算在以下情况的做功：①多变压缩，$\gamma = 1.25$，②带有中间冷却的两级理想多变压缩使用相同的多变指数 $\gamma = 1.25$，③如果单位电力成本为 0.11 美元/kWh，而且压缩机每年运行 360 天，请估算每年通过中间冷却节约的压缩做功和节约的电能。

9.34 空气被压缩在一个稳态和可逆过程中从一个入口的状态 100kPa 和 290K 出口压强为 900kPa。的质量流量空气为 3.5kg/s。请估算在以下情况的做功：①多变压缩，$\gamma = 1.3$，②带有中间冷却的两级理想多变压缩使用相同的多变指数 $\gamma = 1.3$，③如果单位电力成本为 0.09 美元/kWh，而且压缩机每年运行 360 天，请估算每年通过中间冷却节约的压缩做功和节约的电能。

9.35 天然气包含通常是甲烷气体。在一个稳态和可逆过程中，天然气从入口状态 100kPa 和 290K 被压缩至出口压强 1000kPa。天然气的质量流量为 8kg/s。请估算在以下情况的做功：①多变压缩，$\gamma = 1.3$，②带有中间冷却的两级理想多变压缩使用相同的多变指数 $\gamma = 1.3$，③如果单位电力成本为 0.08 美元/kWh，而且压缩机每年运行 360 天，请估算每年通过中间冷却节约的压缩做功和节约的电能。

9.36 天然气包含通常是甲烷气体。在一个稳态和可逆过程中，天然气从入口状态 100kPa 和 290K 被压缩至出口压强 900kPa。天然气的质量流量为 5kg/s。请估算在以下情况的做功：①多变压缩，$\gamma = 1.2$，②带有中间冷却的两级理想多变压缩使用相同的多变指数 $\gamma = 1.2$，③如果单位电力成本为 0.08 美元/kWh，而且压缩机每年运行 360 天，请估算每年通过中间冷却节约的压缩做功和节约的电能。

9.37 在一个稳态和可逆过程中，丙烷气体从入口状态 100kPa 和 300K 被压缩至出口压强 900kPa。丙烷的质量流量为 3kg/s。请估算在以下情况的做功：①多变压缩，$\gamma = 1.3$，②带有中间冷却的两级理想多变压缩使用相同的多变指数 $\gamma = 1.3$，③如果单位电力成本为 0.08 美元/kWh，而且压缩机每年运行 360 天，请估算每年通过中间冷却节约的压缩做功和节约的电能。

9.38 在一个稳态和可逆过程中，氢气从入口状态 100kPa 和 300K 被压缩至出口压强 1100kPa。氢气的质量流量为 3kg/s。请估算在以下情况的做功：①多变压缩，$\gamma = 1.3$，②带

有中间冷却的两级理想多变压缩使用相同的多变指数 $\gamma = 1.3$，③请估算节约的功 by 中间冷却 and 电力每年如果单位电力成本为 0.12 美元/kWh，而且压缩机每年运行 360 天，请估算每年通过中间冷却节约的压缩做功和节约的电能。

9.39　在一个稳态和可逆过程中，二氧化碳气体从入口状态 100kPa 和 290K 被压缩至出口压强 1000kPa。二氧化碳的质量流量为 4kg/s。请估算在以下情况的做功：①多变压缩，$\gamma = 1.3$，②带有中间冷却的两级理想多变压缩使用相同的多变指数 $\gamma = 1.3$，③如果单位电力成本为 0.16 美元/kWh，而且压缩机每年运行 360 天，请估算每年通过中间冷却节约的压缩做功和节约的电能。

9.40　一个稳态运行的绝热压缩机将空气从 100kPa 和 290K 压缩至 900kPa。压缩机的等熵效率为 80%。空气的流量为 0.55kg/s。请确定该压缩机的最小功率和所需的有功功率。

9.41　一个稳态运行的绝热压缩机将空气从 100kPa 和 290K 压缩至 1100kPa。压缩机的等熵效率为 80%。空气的流量为 0.35kg/s。请确定该压缩机的最小功率和所需的有功功率。

9.42　一个稳态运行的绝热压缩机将空气从 100kPa 和 290K 压缩至 1400kPa。压缩机的等熵效率为 85%。空气的流量为 0.5kg/s。请确定该压缩机的最小功率和所需的有功功率。

9.43　一个稳态运行的绝热压缩机将空气从 100kPa 和 290K 压缩至 1600kPa。压缩机的等熵效率为 83%。空气的流量为 0.4kg/s。请确定该压缩机的最小功率和所需的有功功率。

9.44　使用效率为 88% 的电动机来取代效率为 78% 的电动机，请估算节约的功率。这两个电动机都驱动压缩机，而且每年平均运行 2500h，且其必须传递的功率为 24kW，单位电力成本为 0.18 美元/kWh。

9.45　使用效率为 89% 的电动机来取代效率为 74% 的电动机，请估算节约的功率。这两个电动机都驱动压缩机，而且每年平均运行 8000h，且其必须传递的功率为 36kW，单位电力成本为 0.14 美元/kWh。

9.46　使用效率为 89% 的电动机来取代效率为 74% 的电动机，请估算节约的功率。这两个电动机都驱动压缩机，而且每天平均运行 80h[㊀]，且其必须传递的功率为 18kW，单位电力成本为 0.15 美元/kWh。

9.47　一个低温生产厂处理液体甲烷，甲烷状态为 115K 和 5000kPa，流速为 0.15m^3/s。在该工厂中，使用节流阀将液体甲烷的压强降低至 2000kPa。考虑使用汽轮机来取代节流阀的一种新工艺，以实现发电，同时降低了压强。使用下面给出的液体甲烷的性质数据，请估算①汽轮机能够产生的功率；②如果汽轮机运行 360 天/年，单位电力成本为 0.18 美元/kWh，每年节约的用电成本。

T/K	P/kPa	H/(kJ/kg)	S/(kJ/kg K)	C_p/(kJ/kg K)	ρ/(kg/m^3)
110	1000	209.0	4.875	3.471	425.8
110	2000	210.5	4.867	3.460	426.6
110	5000	215.0	4.844	3.432	429.1
120	1000	244.1	5.180	3.543	411.0
120	2000	245.4	5.171	3.528	412.0
120	5000	249.6	5.145	3.486	415.2

注：资料来源：Cengel 和 Turner[7]。

㊀　此处原书有误。——译者注

9.48 一个低温生产厂处理液体甲烷，甲烷状态为 115K 和 5000kPa，流速为 0.2m^3/s。在该工厂中，使用节流阀将液体甲烷的压强降低至 2000kPa。考虑使用汽轮机来取代节流阀的一种新工艺，以实现发电，同时降低了压强。使用习题 9.47 中给出的液体甲烷的性质数据，请估算①汽轮机能够产生的功率；②如果汽轮机运行 360 天/年，单位电力成本为 0.18 美元/kWh，每年节约的用电成本。

9.49 使用热泵为房间供热，并将温度保持在 18°C。某天，外部温度为 -2°C，房间的热量散失率为 79200kJ/h。热泵运行的性能系数（COP）为 3.5。请确定①热泵所需的功率；②吸收自外界冷空气的吸热率。

9.50 使用热泵为房间供热，并将温度保持在 20°C。某天，外部温度为 0°C，房间的热量散失率为 34500kJ/h。热泵运行的性能系数（COP）为 3.0。请确定①热泵所需的功率；②吸收自外界冷空气的吸热率。

9.51 使用热泵为房间供热，并将温度保持在 20°C。某天，外部温度为 4°C，房间的热量散失率为 65500kJ/h。热泵运行的性能系数（COP）为 3.9。请确定①热泵所需的功率；②吸收自外界冷空气的吸热率。

9.52 在冬季，使用一个卡诺热泵为房间供暖。房间维持在 20°C。据估算，当外部温度为 -4°C时，房间的热量损失率为 108000kJ/h。请确定热泵所需的最小功率以及吸收自外界冷空气的吸热率。

9.53 在冬季，使用一个卡诺热泵为房间供暖。房间维持在 20°C。据估算，当外部温度为 2°C时，房间的热量损失率为 78000kJ/h。请确定热泵所需的最小功率以及吸收自外界冷空气的吸热率。

9.54 请估算一台规格为 10000Btu/h（3000W）的空调设备的电力成本，SEER 为 10Btu/Wh。在一个冷却季期间，该设备总共使用 1500h，单位电力成本为 0.16 美元/kWh。

9.55 请估算一台规格为 12000Btu/h 的空调设备的电力成本，SEER 为 14Btu/Wh。在一个冷却季期间，该设备总共使用 2500h，单位电力成本为 0.15 美元/kWh。

9.56 请估算一台规格为 9000Btu/h 的空调设备的电力成本，SEER 为 12Btu/Wh。在一个冷却季期间，该设备总共使用 2000h，单位电力成本为 0.18 美元/kWh。

9.57 ①请估算一台 6t 空调设备的年度运行耗电成本，该空调每年运行 1000h，SEER 为 10 级，能量的成本为 0.14 美元/kWh。

② 请分别估算 20°C和 -4°C时的 EER 值。

9.58 ① 请估算一台 4t 空调设备的年度运行耗电成本，该空调每年运行 2500h，SEER 为 12 级，能量的成本为 0.18 美元/kWh。

② 请分别估算 21°C和 -10°C时的 EER 值。

9.59 ① 请估算一台 9t 空调设备的年度运行耗电成本，该空调每年运行 3000h，SEER 为 14 级，能量的成本为 0.18 美元/kWh。

② 请分别估算 21°C和 -5°C时的 EER 值。

9.60 现在使用的一台住宅用 4t 空调的 SEER 为 10 级。该空调将被取代一个 SEER 等级为 22 的新设备所取代。该设备每年运行 130 天，每天平均运行 10h。内部和外部平均温度分别为 20°C和 -4°C。单位能量的成本为 0.15 美元/kWh。请估算节约的电力成本以及最大能量

效率比。

9.61 现在使用的一台住宅用4t空调的SEER为10级。该空调将被取代一个SEER等级为22的新设备所取代。该设备每年运行120天，每天平均运行9h。内部和外部平均温度分别为20°C和-0°C。单位能量的成本为0.17美元/kWh。请估算节约的电力成本以及最大能量效率比。

9.62 现在使用的一台住宅用4t空调的SEER为10级。该空调将被取代一个SEER等级为20的新设备所取代。该设备每年运行120天，每天平均运行7h。内部和外部平均温度分别为22°C和-10°C。单位能量的成本为0.19美元/kWh。请估算节约的电力成本以及最大能量效率比。

9.63 一个使用电加热设备的开口燃烧炉的效率约为70%，使用天然气设备的效率则约为40%。使用一个4kW电炉，当地的单位电力和天然气的成本分别为0.1/kWh和0.60美元/克卡。请估算燃烧炉的能源消耗率以及电炉和燃气炉两者的单位能量利用成本。

9.64 一个使用电加热设备的开口燃烧炉的效率约为72%，使用天然气设备的效率则约为39%。使用一个6kW电炉，当地的单位电力和天然气的成本分别为0.1/kWh和0.60美元/克卡。请估算燃烧炉的能源消耗率以及电炉和燃气炉两者的单位能量利用成本。

9.65 一个使用电加热设备的开口燃烧炉的效率约为69%，使用天然气设备的效率则约为42%。使用一个10kW电炉，当地的单位电力和天然气的成本分别为0.1/kWh和0.60美元/克卡。请估算燃烧炉的能源消耗率以及电炉和燃气炉两者的单位能量利用成本。

9.66 一个绝热汽轮机通过将状态为4100kPa和350°C的过热蒸汽膨胀来实现发电。功率输出为60MW。蒸汽流出汽轮机时的状态为40kPa和100°C。如果燃烧效率为0.70，发电机效率为0.9，请确定该发电厂的总效率与每小时的供煤量。

9.67 一个绝热汽轮机通过将状态为4100kPa和350°C的过热蒸汽膨胀来实现发电。功率输出为60MW。蒸汽流出汽轮机时的状态为40kPa和100°C。如果燃烧效率为0.70，发电机效率为0.9，请确定该发电厂的总效率与每小时的供煤量。

9.68 一个绝热汽轮机通过将状态为5800kPa和400°C的过热蒸汽膨胀来实现发电。功率输出为55MW。蒸汽流出汽轮机时的状态为40kPa和100°C。如果燃烧效率为0.72，发电机效率为0.9，请确定该发电厂的总效率与每小时的供煤量。

9.69 一个绝热汽轮机通过将状态为4100kPa和350°C的过热蒸汽膨胀来实现发电。蒸汽流量为42kg/s。蒸汽流出汽轮机时的状态为40kPa和100°C。如果燃烧效率为0.75，发电机效率为0.90，请确定该发电厂的总效率与每小时的供煤量。

9.70 一个绝热汽轮机通过将状态为4100kPa和350°C的过热蒸汽膨胀来实现发电。蒸汽流量为42kg/s。蒸汽流出汽轮机时的状态为40kPa和100°C。如果燃烧效率为0.75，发电机效率为0.90，请确定该发电厂的总效率与每小时的供煤量。

9.71 汽油小汽车发动机的总体效率为25%~28%，柴油发动机为34%~38%，大型发电厂的总体效率为40%~60%（Çengel和Turner 2004）。请比较汽油和柴油发动机所必需的能量。柴油的效率为36%。一辆功率输出为240hp的小汽车发动机的热效率为24%。如果其燃

料的高热值为 20400Btu/lb，请确定该小汽车的燃料消耗。

9.72 汽油小汽车发动机的总体效率为 25%~28%，柴油发动机为 34%~38%，大型发电厂的总体效率为 40%~60%（Çengel 和 Turner 2004）。请比较汽油和柴油发动机所必需的能量。柴油的效率为 35%。一辆功率输出为 180hp 的小汽车发动机的热效率为 26%。如果其燃料的高热值为 20400Btu/lb，请确定该小汽车的燃料消耗。

9.73 一辆小汽车的燃料消耗为城市交通 11L/100km、高速公路 9L/100km，另一辆小汽车的燃料消耗为城市交通 6.5L/100km、高速公路 5L/100km。请估算燃料效率更高的小汽车每年平均行驶 7500km，每年所节约的燃料以及可以减少的排放量。

9.74 一辆小汽车的燃料消耗为城市交通 10L/100km、高速公路 8L/100km，另一辆小汽车的燃料消耗为城市交通 6.0L/100km、高速公路 5L/100km。请估算燃料效率更高的小汽车每年平均行驶 10000km，每年所节约的燃料以及可以减少的排放量。

9.75 一辆小汽车的燃料消耗为城市交通 12L/100km、高速公路 9L/100km，另一辆小汽车的燃料消耗为城市交通 7.0L/100km、高速公路 6L/100km。请估算燃料效率更高的小汽车每年平均行驶 12000km，每年所节约的燃料以及可以减少的排放量。

9.76 假设一个住宅平均用电率为 0.14 美元/kWh，一个家庭每年平均消耗大约 5000kWh。如果仅使用紧凑型荧光灯来照明，请估算每年的能量和成本节约。

流		T_{in}/°C	T_{out}/°C	$C=\dot{m}C_p$/(kW/°C)
C1	冷 1	20	180	40
C2	冷 2	160	250	55
H1	热 1	280	60	35
H2	热 2	190	20	25

构建 $\Delta T_{min}=20°C$ 和 $\Delta T_{min}=10°C$ 过程时的平衡组合曲线，并比较所需的热公用工程和冷公用工程。

9.77 假设一个住宅平均用电率为 0.16 美元/kWh，一个家庭每年平均消耗大约 14000kWh。如果仅使用紧凑型荧光灯来照明，请估算每年的能量和成本节约。

9.78 在一个过程中，可用的热过程流和冷过程流及其热容量如下所示。

热过程流和冷过程流的工况㊀

参 考 文 献

1. Alex W, Jennifer T, John M (2003) Consumer guide to home energy savings, 8th edn. ACEEE, Washington
2. Beggs C (2009) Energy: management, supply and conservation, 2nd edn. Elsevier, London
3. Bertoldi P, Atanasiu B (2007) Electricity consumption and efficiency trends in the enlarged european union. EUR 22753 EN, European Commission of the Institute for Environment and Sustainability
4. Blewitt J (2008) Understanding sustainable development. London, Earthscan
5. Breeze P (2005) Power generation technologies. Newnes, Oxford
6. Çengel YA, Boles MA (2002) Thermodynamics: an engineering approach, 4th edn. McGraw-Hill, New York

㊀ 此处原书即如此。——译者注

7. Çengel YA, Turner RH (2001) Fundamentals of thermal fluid sciences. McGraw-Hill, New York
8. Daly HE, Farley J (2004) Ecological economics: principles and applications. Island Press, Washington
9. Demirel Y (2007) Nonequilibrium thermodynamics: transport and rate processes in physical, chemical and biological systems, 2nd edn. Elsevier, Amsterdam
10. Demirel Y, Kunç S (1987) Thermal performance study on a solar air heater with packed flow passage. Energy Conver Mngmtl 27:317–325
11. DOE (2009) Where does the energy go? Advanced technologies and energy efficiency. Fuel economy guide, DOE
12. Dorfler F, Bullo F (2009) Synchronization and transient stability in powerpower networks and non-uniform kuramoto oscillators. In arXiv:0910.5673[math.OC].
13. Fuad-Luke A (2006) The Eco-design handbook. Thames and Hudson, London
14. Goodall C (2007) How to live a low-carbon life. Earthscan, London
15. Hak et al (2007) Sustainability indicators, SCOPE 67. Island Press, London
16. Hedman B (2007) Energy and environmental analysis/USCHPA, combined heat and powerpower and heat recovery as energy efficiency options, 10 Sept 2007, Washington
17. Kemp IC (2007) Pinch analysis and process integration, 2nd edn. Elsevier, Oxford
18. Energy audit of building systems: an engineering approach, 2nd edn. CRS Press, New York
19. Kreith F, Goswami DY (eds) (2008) Energy management and conservation handbook. CRC Press, New York
20. Krigger J, Dorsi C (2008) The homeowner's handbook to energy efficiency: a Guide to big and small improvements. Saturn Resource Management, Helena
21. Lekov A et al (2006) Electricity and natural gas efficiency improvements for residential gas furnaces in the U.S. LBNL-59745. http://www.energysavers.gov/your_home/space_heating_cooling/index.cfm/mytopic=12530. Accessed in May 2011
22. Miao He M, Murugesan S, Zhang J (2010) Multiple timescale dispatch and scheduling for stochastic reliability in smart grids with wind generation integration. In arXiv:1008.3932[cs.SY]. Accessed in June 2011
23. Scott CM (2009) Green economics. Earthscan, London
24. Soederbaum P (2008) Understanding sustainability economics. Earthscan, London
25. Solber G (2007) The magic of tesla roadster regenerative braking. http://www.teslamotors.com/blog/magic-tesla-roadster-regenerative-braking. Accessed July 2011
26. Steffy G (2001) Architectural lighting design. Wiley, New York

第 10 章　能 量 耦 联

10.1　能量耦联与吉布斯自由能

一个系统的吉布斯（Gibbs）自由能定义为焓减去温度与熵之积：

$$G = H - TS \tag{10.1}$$

系统的吉布斯自由能是一个状态函数，因为它是通过作为状态函数的热力学性质而定义的。因此，发生在一个反应期间的系统吉布斯自由能变化等于系统的焓变减去系统的温度乘以熵之积的变化。如果该反应发生在等温条件下，其方程可以表示如下：

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \tag{10.2}$$

ΔG 为负的任何反应都应该是有利的，或者是自发的，而 ΔG 为正的任何反应都是不利的：

$$\Delta G < 0\text{：有利的，或者是自发的反应} \tag{10.3}$$

$$\Delta G > 0\text{：不利的，或者是非自发的反应} \tag{10.4}$$

根据是否释放或吸收热量，反应可以分为放热（$\Delta H < 0$）反应或吸热（$\Delta H > 0$）反应。根据系统在反应期间自由能是降低了还是提高了，反应可以分为放能（$\Delta G < 0$）反应或吸能（$\Delta G > 0$）反应。

考虑以下两个反应：

$$1.\ \mathrm{A} \rightarrow \mathrm{B} \quad \Delta G_{\mathrm{AB}} = (G_{\mathrm{B}} - G_{\mathrm{A}}) \ll 0\text{，放能} \tag{10.5}$$

$$2.\ \mathrm{C} \rightarrow \mathrm{D} \quad \Delta G_{\mathrm{AB}} = (G_{\mathrm{B}} - G_{\mathrm{A}}) > 0\text{，吸能} \tag{10.6}$$

如果它们是耦联的，而且只要它们的绝对值满足下面不等式，那么，第一个反应就能够驱动第二个反应：

$$|\Delta G_{\mathrm{AB}}| > |\Delta G_{\mathrm{CD}}| \tag{10.7}$$

然后，耦联反应将具有一个负的总吉布斯能量，因此该反应将变为放能和有利的反应：

$$(\Delta G_{\mathrm{AB}} + \Delta G_{\mathrm{CD}}) < 0 \tag{10.8}$$

能量耦联可能需要一些特殊的机制，比如生命系统中的酶动力学和配置，这个问题将在下一节中简要讨论。

10.2　生命系统中的能量耦联

一个耦联过程没有原发驱动力也能够发生，或者由它的原发驱动力强制反向发生。例如，活细胞能够将离子从低浓度区域泵到高浓度区域。因为有利的物质总是从高浓度向低浓度运输，只有当它与一个能量提供过程相耦联时，这种反向运输才是可能的。在生命系统中，这种能量是由三磷酸腺苷（ATP）来提供的。生命系统中的能量耦联意味着产生的能量是由细胞来采集的，以完成能量所需要的过程。代谢途径以这种方式相交：从有利的分解代谢反应释放的能量可以用于驱动不利的合成代谢途径反应。这意味着那些释放净能量值（放能）的生化循环被用于驱动那些吸收净能量值（吸能）的生化循环。从分解代谢到合成代谢的这种传递能量是能量耦联的结果[25]。

在光合作用中，植物中的叶绿体使用太阳的自由能来启动电子传递循环和质子梯度以产生 ATP。动物则是在氧化磷酸化中，利用呼吸循环来启动电子传递循环和质子梯度以产生 ATP。ATP 是一个富含能量生物分子，它储存并提供生命系统中必要的能量。光合作用、氧化磷酸化与分子泵代表了生命系统中一些主要的能量耦联例子。

10.3　生物能量学

生物能量学关注的是生命系统中的能量生产、节能与转换过程[2,9,17]。外部能量用于将二磷酸腺苷（ADP）和分子磷（Pi）合成称为 ATP 的富含能量分子。ATP 的化学分子式如图 10.1 所示。ATP 具有三种附属于腺苷的磷酸盐基，其中，末端的磷酸盐基有一个弱键，而且在 ATP 与酶形成一个复合物并释放化学能时，它能够自发地断裂。因此，ATP 成为了活细胞的能量储存器和能量来源。

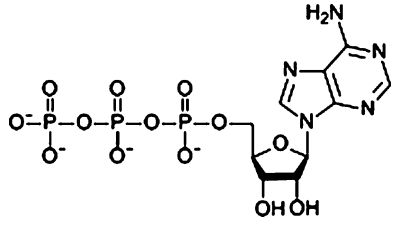


图 10.1　ATP 的化学分子式。ATP 是一个富含能量化合物，具有附属于腺苷的三种磷酸盐基。在这三种磷酸盐基中，最末端的磷酸盐基具有一个弱键。这种磷酸盐基能够在 ATP 与酶形成一个复合物时自发地断裂。这个键的断裂会释放出所有的生命系统中所需的化学能。

ATP 合成是一个吸热反应，因为它需要来自外部的能量。因此，APT 合成是与电子传递链相耦联的。因此，电子传递链能够驱动 ATP 的合成。ATP 的合成通过水解（与水组合）与细胞的 ATP 利用相匹配与合成：

$$ADP + P_i + nH^+_{in} = ATP + H_2O + nH^+_{out} \qquad (10.9)$$

式中，“in”和“out”表示两个相通过一个膜实现分离；n 为 H^+/ATP 比值，显示每个要合成的 ATP 的跨膜质子转运水平。

ATP 的利用与蛋白质分子合成、离子和底物的转运以及机械功的产生相耦联。因此，ATP 分子储存并传递生命系统中的能量。例如，一些内部机械功涉及心脏泵血。通过调节 ATP 能量的生产和传递，连续生化循环和转运过程可以维持在一个固定的状态。

生物能量学中的大多数生物化学反应发生在途径之中，其中，其他反应连续地增加底物并去除产物。这些反应的速率取决于酶。酶是在细胞中产生的蛋白质，并对反应起催化作用[26]。

10.3.1　线粒体

线粒体是长度范围为 0.5 ~ 1μm 的细胞器，可见于真核细胞的细胞质中。线粒体包含磷脂构造的内膜和外膜，其中嵌入了特定的蛋白质。线粒体膜产生被内膜包围的两个隔间，分别称为线粒体膜间隙和嵴间隙（见图 10.2a）。内膜具有被称作嵴的大量折褶，ATP 合成就是在嵴上发生的。

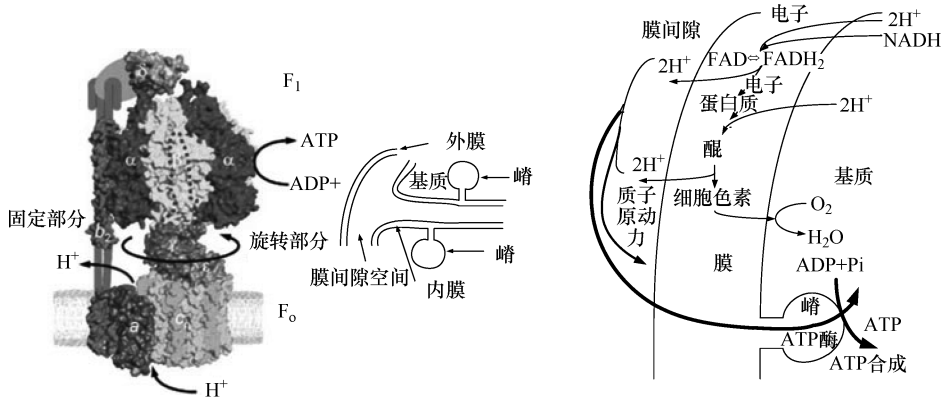


图 10.2　a）ATP 酶是一类带有 F_o 和 F_1 亚基的酶，它能够催化 ATP 的合成与水解。嵴具有主要的耦联因子 F_1（一种亲水性蛋白质）和 F_o（一种疏水性脂蛋白复合物）。F_1 和 F_o 一起组成了 ATP 酶（也称为 ATP 合成酶）[16]。

b）线粒体的内膜结构。c）ATP 的电子传递链和氧化磷酸化[4]

10.3.2　电子传递链与 ATP 合成

内膜含有电子传递链与 ATP 合成，如图 10.2c 所示。三羧酸循环（又称为柠檬酸循环）产生电子传递链，该链是主要的能量产生途径。电子传递链引起质子穿过线粒体的内膜流动，并通过 ATP 酶来合成 ATP，如图 10.2a 所示。ATP 酶是一类带有 F_o 和 F_1 亚基的酶，它能够催化 ATP 的合成与水解。嵴具有主要的耦联因子 F_1（一种亲水性蛋白质）和 F_o（一种疏水性脂蛋白复合物）[16]。

动物的呼吸链通过氧化营养物的还原当量来产生能量，这些营养物是还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸 NADH 和黄素腺嘌呤二核苷酸 $FADH_2$。当 ADP 的水平高于 ATP 时，细胞需要能量，因此 NADH 被快速地氧化，而且三羧酸循环也会加速。当 ATP 的水平高于 ADP 时，电子传递链将会减速。

由光能驱动的光合作用通过电子传递与光合磷酸化作用导致了 ATP 的产生。光合节能发生于植物叶绿体的类囊体[⊖]膜之中。这些膜促进了氧化还原系统与 ATP 合成之间的相互作用，而且它们指的是耦联膜。

10.3.3　主动转运

线粒体涉及离子和其他分子（比如 Ca^{+2} 和蛋白质）的转运。主动转运是将一种物质从低浓度转运至高浓度，因此，与它的浓度梯度相反。这种过程为也称为上坡（uphill）转运，而且需要能量。ATP 的水解为所有的细胞活动（包括离子和分子的主动转运）提供能量。如果该过程使用化学能，比如从 ATP 的水解释放能量，它被称为原发性主动转运。次级主动转运涉及使用在细胞之内产生的电化学梯度。

1mol ATP 的水解是一个放能反应，在 pH = 7 时释放出 31kJ/mol 的能量。这些能量驱动各种能量依赖的代谢反应，并实现各种离子（比如 K^+ 和 Na^+）的转运，如图 10.3a 所示。K^+ 和 Na^+ 的这些浓度梯度经由离子的主动转运而建立起来。这些相同的 Na^+/K^+ ATP 酶，利用 ATP 水解释放的能量，从细胞中转运出三种 Na^+ 离子，将每对 K^+ 离子以与其浓度梯度相反的方向泵入细胞之中（见图 10.3a）。动物细胞中线粒体产生的所有能量将近 1/3 用于主动转运。在间接主动转运中，其他转运蛋白分子使用已经储存于直接泵离子梯度内的能量[7,8,17]。

⊖ 类囊体（thylakoid）是植物叶绿体中的蛋白质和脂肪膜皮，是由单层膜围成的扁平小囊，也称为囊状结构薄膜，分布在叶绿体基质和蓝藻细胞中，沿叶绿体的长轴平行排列，光合化学作用在此进行。——译者注

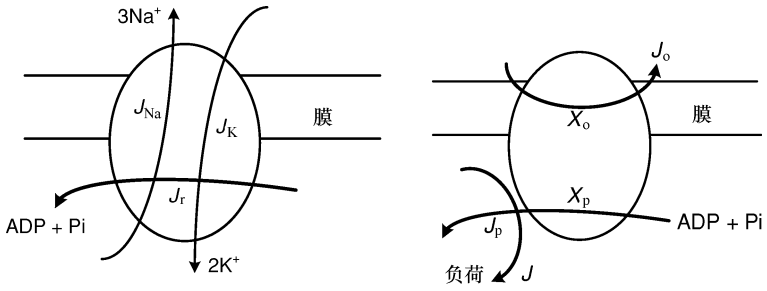


图 10.3　a）与 ATP 的水解相耦联的 Na^+ 和 K^+ 离子主动转运[9,14]。b）发生在线粒体的内膜中的呼吸循环和氧化磷酸化之间的能量耦联。其中，J_o 与 J_p 分别为氧气流量和 ATP 的生产率，而 X_o 和 X_p 则分别表示可氧化物质的氧化还原电位和磷酸盐电位。流动 J 表示与 ATP 生产相耦联的一个负荷（即渗透功）

10.4　能量耦联的简单分析

图 10.3b 给出了通过能量耦联驱动 ATP 生产的电子运输循环。Stucki 等人[22]使用下面无负荷（比如主动转运）氧化磷酸化的线性唯象关系的近似表达式：

$$J_o = L_o X_o + L_{op} X_p \tag{10.10}$$

$$J_p = L_{po} X_o + L_p X_p \tag{10.11}$$

其中，J_o 为氧气流量；J_p 为 ATP 生产率；X_o 为可氧化物质的氧化还原电位；X_p 为磷酸盐电位[6]；L_{op}和 L_{po}表示跨越系数；L_o 和 L_p 则被称为原发性系数。

J_o 与 J_p 称为流动，而 X_o 和 X_p 则称为力。跨越系数 L_{op}和 L_{po}遵从昂萨格倒易关系㊀，它表明 $L_{op} = L_{po}$。

耦联度 q 定义为

$$q = \frac{L_{op}}{(L_p L_o)^{1/2}} \quad 0 < |q| < 1 \tag{10.12}$$

㊀ 昂萨格倒易关系（Onsager's reciprocal rules）是指某种广义流（如热流、扩散流等）与引起这种流的各种广义力（如温度梯度、浓度梯度等）系数之间的关系。挪威裔美国物理化学家昂萨格发现并以其名字命名的昂萨格倒易关系，是线性不可逆过程热力学的主要理论之一。这一关系的确立和昂萨格后来提出的关于定态的能量最小耗散原理，为不可逆过程热力学的定量理论及其应用奠定了基础。——译者注

而且，耦联度 q 表示由线粒体内膜中的呼吸循环所驱动的 ATP 生产的总体耦联程度。通过定义唯象化学计量比 Z：

$$Z = \left(\frac{L_o}{L_p}\right)^{1/2} \tag{10.13}$$

并将式（10.10）除以式（10.11），根据 Z 得到流量比 j 和力比 x：

$$j = \frac{J_o}{j_p Z} \tag{10.14}$$

$$x = \frac{X_o Z}{X_p} \tag{10.15}$$

流量比 j 和力比 x 之间的相互关系可以通过下面的耦联度来实现：

$$j = \frac{x + q}{qZ + 1} \tag{10.16}$$

能量耗散 Ψ 可以表示为[6,7]

$$\Psi = J_o X_o + J_p X_p = \text{输入功率} + \text{输出功率} > 0 \tag{10.17}$$

氧化磷酸化线性能量耦联的效率可以定义为输出功率与输入功率之比。根据耦联度，可以给出：

$$\eta = -\frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} = -\frac{J_p X_p}{J_o X_o} = -\frac{x + q}{q + (1/x)} \tag{10.18}$$

最优效率值只是耦联度的一个函数，而且可以表示为

$$\eta_{opt} = \frac{q^2}{(1 + \sqrt{1 - q^2})^2} = \tan^2(\alpha/2) \tag{10.19}$$

其中，$\alpha = \arcsin(q)$[9,21,24]。在 η_{opt}的条件下，x 值变为

$$x_{opt} = -\frac{q}{1 + \sqrt{1 + q^2}} \tag{10.20}$$

因此，力比的最优值 x 取决于耦联度的值[6,18]。例 10.1 给出了光合作用中能量耦联分析的简要示例。

例 10.1　光合作用的能量转换效率

考虑一个在光子和复合粒子之间交换能量的过程模型。在这种过分简化的模型中，能量通过叶绿体的激发态来交换，在叶绿体处于激发态时，来自水的富含能量电子/质子对与二氧化碳发生反应。这将会产生碳水化合物和氧分子，同时热量也被消散出去了。各种流之间的关系可以近似为[3]

$$\left(\frac{J_D}{J_q}\right)^2 = \frac{k_B n D}{k_B} \tag{10.21}$$

式中，n 约等于 3.3×10^{28}分子/m^3，对于水和凝聚态物质来说，它通常是一个典型值；J_D 为二氧化碳的质量流量（扩散速率）；J_q 为热流；D 为扩散系数；k 为

导热系数；k_B 为玻尔兹曼常数。

只有一小部分的光子自由能可用于光合作用，其余的都消散掉了。在光合作用中，能量转换的效率很低，变化范围为 2.4%~7.5%[3]。能量转换的效率定义为

$$\eta = \frac{J_D}{J_q}\frac{\Delta G}{h\nu} \tag{10.22}$$

式中，ΔG 为每个分子的吉布斯（Gibbs）能量；$h\nu$ 为每个光子的能量。

这些驱动力的近似值如下：

- ΔG 约等于 7.95×10^{-19}J/1 单位碳水化合物。
- $(h\nu)$ 约等于 2.92×10^{-19}J/1 个太阳能光子（有关红色光的波长为 680nm，最易被叶绿素-α 吸收）。
- 基于水的导热系数：$k=0.607$W/mK。
- 假设二氧化碳的细胞间扩散在光合作用中为极限过程，基于水中的二氧化碳可以得到 $D\approx1.95\times10^{-9}$m^2/s，或者基于水中的葡萄糖可以得到 $D\approx0.67\times10^{-9}$m^2/s。

$$k_B = 1.3806503\times10^{-23}\text{m}^2\ \text{kg/s}^2\ \text{K}$$

在下面方程中使用这些近似值：

$$\eta = \frac{J_D}{J_q}\left(\frac{7.95\times10^{-19}}{2.92\times10^{-19}}\right) = 2.72\left(\frac{k_B nD}{k}\right)^{1/2} \tag{10.23}$$

能量转换效率的近似预测值变为

η（预测值）（%）	η（测量值）（%）	D /(m^2/s)
2.4	4.9	0.10×10^{-9}
6.1	6.2	0.67×10^{-9}
7.5	约为 7	1.0×10^{-9}

注：资料来源 Andriesse 和 Hollestelle[3]。

在理想条件下，所有植物的生长效率预期接近 7%。

10.5　能量耦联变化

耦联度 q 的值可以根据测量氧气在静压头（sh）$(J_o)_{sh}$ 与解偶联状态（unc）$(J_o)_{unc}$ 下的流动来计算，在静压头时 ATP 的净速率降为零，在解偶联状态时，质子梯度降为零而且呼吸循环与氧化磷酸化解耦[5]：

$$q = \sqrt{1-(J_o)_{sh}/(J_o)_{unc}} \tag{10.24}$$

例如，大鼠肝线粒体的总体能量耦联度（0.955 ± 0.021）要高于大脑

（0.937 ± 0.026）或心脏（0.917 ± 0.037）[5]。

当 ATP 生产与一个负荷（比如 ATP 的水解）相耦联时，所需的氧化磷酸化耦联度也会变化（见图 10.3b）[21]。根据耦联度，可以给出 ATP 和输出功率生产的最优生产函数 f：

$$f = \tan^m(\alpha/2)\cos(\alpha) \tag{10.25}$$

在特定的耦联度值时，ATP 生产和功率输出如下：

- 在最优效率下 $q_f = 0.786$ 时，ATP 生产的最大值为 $f = (J_p)_{opt}$。
- 在最优效率下 $q_p = 0.91$ 时，最大功率输出为 $f = (J_p X_p)_{opt}$。
- 在最低能源成本下 $q_f^{ec} = 0.953$ 时，有效的 ATP 生产值为 $f = \eta(J_p)_{opt}$。
- 在最低能源成本下 $q_p^{ec} = 0.972$ 时，经济功率输出为 $f = \eta(J_p X_p)_{opt}$。

在考虑电导匹配的情况下，Stucki[18] 确定了四个生产函数，见表 10.1。图 10.4所示为耦联度对最优效率的影响。氧化磷酸化对波动的 ATP 利用的灵敏度在耦联度 $q = 0.95$ 时是最小的。这表明，针对氧化磷酸化的净 ATP 生产能源成本最低时的耦联度（它非常接近于 q_f^{ec} 值），磷酸盐电位对于波动的能量需求具有高度的缓冲能力[21,22]。

耦联度取决于所需的线粒体的能量耦联系统的输出性质以及代谢调节和稳定性。在心脏和大脑中，细胞呼吸途径的实验值 q 接近于 $q_f^{ec} = 0.953$，这表明该途径对于细胞过程的经济 ATP 是最优的。在大脑中，$q_p = 0.91$ 说明细胞能量状态处于最大化。不过，在心脏中耦联度为 0.786，该值处于 q_p 和 q_f 之间，而且与保持细胞能量状态所必需的 ATP 生产最大值相一致[5,18]。

最优输出功率 $(J_1X_1)_{opt}$ 和效率 $(J_1X_1\eta)_{opt}$ 分别可以根据 J_1X_1-x 图和 $J_1X_1\eta$-x图计算而得。从 q_p 变为 q_f^{ec} 可能会导致输出功率 (J_1X_1) 下降 12%，效率提高 51%。如果期望以氧化磷酸化最优效率进行 ATP 生产，应该使 $q < 1$。

10.5.1　能量耦联的调节

能量耦联的调节意味着操作线粒体功能的生理结果。这些线粒体调节的生理原因主要是将 ATP 供应与生物能量学中的工作负荷变化有效地匹配，并响应外部刺激[12,19]。跨膜电化学质子梯度是调节呼吸和 ATP 合成速率的重要机制之一。各种底物调节能量的代谢，脂肪酸可以通过诱导解偶联来调控耦联度，从而实现氧化磷酸化的最优效率。使用一些缓冲酶可以极大地克服 ATP/ADP 比率的波动以及对氧化磷酸化最优效率的偏离。例如，线粒体肌酸激酶是有氧能量代谢的一个关键酶，涉及系统瞬态性质的缓冲、运输和还原[11,12,23]。

表 10.1　考虑电导匹配的情况下的生产函数[5,21]

生产函数	最优效率状态的位点	q	能源成本
ATP 生产的最优速率：$J_p=(q+x)ZL_oX_o$	根据 J_p-x 图：	$q_f=0.786$	否
	$(J_p)_{opt}=\tan(\alpha/2)\cos\alpha ZL_oX_o$	$\alpha=51.83°$	η=恒定值
OP 的最优输出功率：$J_pX_p=x(q+x)L_oX_o^2$	根据 J_pX_o-x 图：	$q_p=0.910$	否
	$(J_pX_p)_{opt}=\tan^2(\alpha/2)\cos\alpha L_oX_o^2$	$\alpha=65.53°$	η=恒定值
最低能源成本时的 ATP 生产最优速率：	根据 $J_1\eta$-x 图：	$q_f^{ec}=0.953$	是
$J_p\eta=-\dfrac{x(q+x)^2}{xq+1}ZL_oX_o$	$(J_p\eta)_{opt}=\tan^3(\alpha/2)\cos\alpha ZL_oX_o$	$\alpha=72.38°$	
最低能源成本时的 OP 的最优输出功率：	根据 $J_1X_1\eta$-x 图：	$q_p^{ec}=0.972$	是
$J_pX_p\eta=-\dfrac{x^2(q+x)^2}{xq+1}L_oX_o^2$	$(J_pX_p\eta)_{opt}=\tan^4(\alpha/2)\cos\alpha L_oX_o^2$	$\alpha=76.34°$	

注：OP：氧化磷酸化；q_f、q_p 分别为最优 ATP 生产和功率输出时的耦联度，q_f^{ec}、q_p^{ec} 分别为最低能源成本时的最优 ATP 生产和功率输出的耦联度。

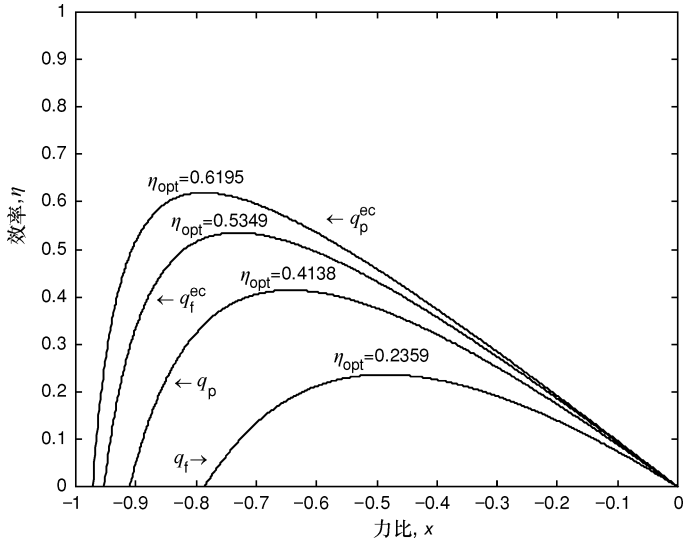


图 10.4　各种能量耦联水平下的效率-力比图。根据流量比 $x(X_oZ/X_p)$，式（10.18）中给出了效率 η 的变化，用于耦联度 q_f、q_p、q_f^{ec} 和 q_p^{ec}[21]

Stucki[19,20]分析了细胞 ATP 利用力的灵敏度（磷酸盐电位），结果发现在 $q=0.95$时，灵敏度最小。这表明，在相同的耦联度时，磷酸盐电位对用于动力学稳定性和效率最大化的能量需求的变化，具有高度的缓冲能力。在 $T=20$°C、pH = 8.0，pMg = 2.5 以及离子强度为 0.08M 时，可以获得的 ATP 生产的标准反应吉布斯（Gibbs）能量为 31.3kJ/mol，而且其标准反应焓为 28.1kJ/mol。

10.5.2　解耦联

ATP 合成与细胞 ATP（下坡和上坡）转运所用的渗透功或者肌肉收缩和细菌鞭毛旋转等机械功相匹配。线粒体电子传递链与 ADP 磷酸化的解耦联是生理的，实现了效率优化以及氧化磷酸化耦联度微调的微调[12]。脂肪酸促进了质子从线粒体膜间隙向线粒体基质的净传递，因此，降低了质子电位梯度并形成了弱解耦联。解耦联蛋白通常会促进呼吸链产生的 H^+ 或 Na^+ 跨膜电位的耗散，并提高了耦联膜的 H^+ 和 Na^+ 渗透性。一些解耦联有利于细胞呼吸的节能功能[27]。

10.5.3　滑动和泄漏

当一个循环过程中的两个耦联反应其中之一进行反应而另一个不进行反应时（它也被称为内在解耦联），主要会导致滑动现象。在微观层面上，通过没有参与 ATP 合成的质子，或者是没有参与质子泵的水解 ATP，单个酶都会引起滑动。在宏观层面上，测得的耦联度可以不同于预期的耦联。

根据能量转换，滑动可能会降低效率，不过，它可能会允许在驱动变化的范围内对酶和驱动力进行动态控制和调节。线粒体能量代谢可以由质子泵的滑动来调节。滑动和泄漏并行发生。耦联离子的泄漏率取决于在无其他力的系统之内运行的特定热力学力的量级。在氧化磷酸化中，泄漏会导致两个连续泵的特定解耦联（比如电子转运和 ATP 合酶），而且可以描述为膜电位驱动的跨双层质子回流[24]。

10.6　代谢

代谢是发生在生物体内以维持生命的一组生物化学反应。代谢包含分解代谢与合成代谢两个途径。在分解代谢中，有机物质被破坏，例如去收集细胞呼吸中的能量。在合成代谢中，能量用于构造蛋白质和核酸等细胞成分。在代谢途径中，一种化学物通过一系列的酶经由一系列步骤转化成另一种化学物。通过将这些酶与释放能量的自发过程相耦联，就能够使某些过程去驱动需要能量的必要反应。一个中央辅酶用于在不同的化学反应之间传递化学能的 ATP。细胞中的 ATP 连续地再生，并作为分解代谢与合成代谢之间的一个桥梁，同时，分解代谢反应产生 ATP，而合成代谢反应则通过能量耦联来消耗该 ATP[15]。

10.6.1　分解代谢

分解代谢是一组代谢循环过程，该过程将大分子断开并将其氧化，包括将食物分子断开并氧化为更简单的分子，比如二氧化碳和水。分解代谢反应为合成代

谢反应提供所需的能量和成分。

动物最常用的分解代谢反应组主要可以分为三个阶段（见图 10.5）。首先，大有机分子（比如蛋白质、多糖或者脂类）被消化成它们的细胞外部的较小成分。接下来，这些较小的分子被细胞所接受并转换成较小的分子［通常是乙酰辅酶 A（acetyl-CoA）］，同时释放部分能量。最后，在柠檬酸循环和电子传递链中，辅酶 A 上的乙酰基被氧化成水和二氧化碳，释放通过将烟酰胺腺嘌呤二核苷酸（NAD^+）还原为 NADH 所储存的能量。

这些消化酶包括将蛋白质消化为氨基酸的蛋白酶与将多糖消化为单糖的糖苷水解酶，如图 10.5 所示。

主要的分解途径是醣酵解，其中糖类（比如葡萄糖和果糖）被转化成丙酮酸，并生成一些 ATP。这种氧化会释放二氧化碳作为一种废弃产物。脂肪酸在氧化时会比碳水化合物释放出更多的能量，由于碳水化合物的结构中含有更多的氧分。氨基酸既可以用于合成蛋白质和其他生物分子，也氧化成尿素和二氧化碳以作为一种能量来源。

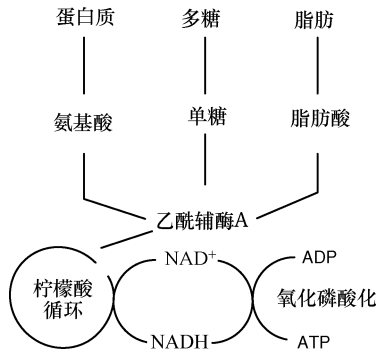


图 10.5　导致能量耦联系统的生物燃料蛋白质、碳水化合物与脂肪分解代谢简化图[1]

10.6.2　合成代谢

合成代谢是一组建设性的代谢过程，其中，分解代谢释放的能量用于三个基本阶段的复杂分子合成。首先是生产氨基酸、单糖和蛋白质多糖脂肪核苷酸等前体，其次是使用来自 ATP 的能量将其活化为活性形式，最后，将这些前体组装为蛋白质、多糖、脂类与核酸等复杂分子。

10.7　生物能源

碳水化合物、脂肪和蛋白质是身体化学能的主要来源，而且可以从日常饮食中获取。这些燃料的氧化所释放的热量用于维持体温：

- 碳水化合物大约释放 4kcal/g（17kJ/g）。
- 脂肪大约释放 9kcal/g（39kJ/g）。
- 蛋白质大约释放 4kcal/g（17kJ/g）。

超出身体直接所需的能量主要被储存于：

- 脂肪甘油三酯（甘油三酸酯）：脂肪甘油三酯是身体的主要能量储存。
- 糖原：通过糖原储存的能量相对较少，但非常关键。例如，肌糖原被氧化用于肌肉的收缩。

每日能量消耗为每天所需的能量值，包括基础代谢和身体活动所需要的能量。一个人每天的基础代谢率大约为每 kg 体重 24kcal，而且，基本身体活动需要消耗掉基础代谢率的 30% 左右[13]。

碳水化合物是带有多个羟基群的直链醛或酮，这些羟基群能以直链或者环的形式存在。碳水化合物是最为丰富的生物分子，而且具有多种功能，比如：能量（淀粉、糖原）的储存和转运、构成结构成分（如植物的纤维素、动物的甲壳素）。

燃料值等于反应燃烧热（氧化）。碳水化合物和脂肪可以被完全氧化，而蛋白质只能被部分氧化，因此，它的燃料值也较低。能量消耗可以根据能量平衡来计算。假设①氧化过程仅涉及碳水化合物（CH）、脂肪（F）和蛋白质（Pr）三类化合物；②其他化合物是固定不变的；③氧气、二氧化碳和氮气的吸收和消除是瞬时的。根据能量平衡，可以得到能量消耗 $\dot{E}$：

$$\dot{E} = \sum_i (\dot{n}\Delta H_r)_i = (\dot{n}\Delta H_r)_{CH} + (\dot{n}\Delta H_r)_F + (\dot{n}\Delta H_r)_{Pr} = \dot{q} + \dot{W} \qquad (10.26)$$

其中，比焓值为：$\Delta H_{r,CH} = -17\text{kJ/g}$，$\Delta H_{r,Fat} = -39\text{kJ/g}$，$\Delta H_{r,CH} = -17\text{kJ/g}$。例 10.2给出了葡萄糖的氧化，而例 10.3 ~ 例 10.5 则讨论了能量消耗的估算。

例 10.2　葡萄糖的氧化

① 请估算在 310K 和 1atm 的等温等压条件下葡萄糖氧化的反应焓。

② 请估算在稳定条件下每天氧化 390g 葡萄糖的能量消耗。

解：

假设：气态组分传递给水成溶液的能量很小。反应热的温度校正可以忽略不计。

$$C_6H_{12}O_6(aq) + 6O_2(g) \rightarrow 6CO_2(g) + 6H_2O(l)$$

其中，符号（aq）表示水成，（g）为气体，（l）为液体。如果控制体积是一块组织，上述反应可以发生在一个水成溶液（aq）中。

根据表 C1，得到上述反应的组分在标准状态（298K 和 1atm）下的生成焓：

$$\Delta H_r^o(298^\circ\text{K}) = 6(-393) + 6(-286) - (-1264) - 6(0)$$
$$= -2810\text{kJ/mol} \sim \Delta H_r(310^\circ\text{K})$$
$$\text{MW}(\text{葡萄糖}) = 180\text{g/gmol}$$

每天氧化 390g 葡萄糖的能量消耗为

$$n_G = \frac{(390\text{g/天})/(180\text{g/mol})}{(24\text{h/天})(3600\text{s/h})} = 0.025 \times 10^{-3}\text{mol/s}$$

$$\dot{E} = n_G(-\Delta H_r) = (0.025 \times 10^{-3}\text{mol/s})(2810\text{kJ/mol}) = 70.2 \times 10^{-3}\text{W} = 70.2\text{mW}$$

例 10.3　每日的能量消耗

某个体重为 146lb 的成年人，其饮食史显示他每天大约消耗 150g 碳水化合物、50g 蛋白质和 60g 脂肪。成年人进行的常规运动平均每天消耗 480kcal 的能量。请估算该成年人的能量消耗并评估其能量摄入是否过量。

解：

每日的能量消耗为每天所需的能量值，包括基础代谢和身体活动所需要的能量。一个人每天的基础代谢率大约为每 kg 体重 24kcal（101kJ）[13]。

身体活动所需的能量 = 480kcal/天

能量消耗 = 基础代谢率 + 身体活动

每日的能量消耗 = (24kcal/kg 天)(146 lb)(kg/2.2 lb) + 480kcal/天

= 1594kcal/天 + 480kcal/天 = 2074kcal/天

能量摄入：

碳水化合物：4kcal/g + (150g/天)(4kcal/g) = 600kcal/天。

脂肪：9kcal/g + (60g/天)(9kcal/g) = 540kcal/天。

蛋白质：4kcal/g + (50g/天)(4kcal/g) = 200kcal/天。

总能量摄入 = (600 + 540 + 200)kcal/天 = 1340kcal/天

总能量摄入为 1340kcal/天，低于基础代谢率 2074kcal。

例 10.4　小生物体的能量消耗

考虑一个体重为 10μg 的小生物体，在稳态时每小时消耗 4.0×10^{-9}mol 氧气，同时排出 3.6×10^{-9}mol 二氧化碳和 0.4×10^{-9}mol N（以氨的形式）。该生物体的外功为 50×10^{-9}W。请使用下面给出的反应热，估算其能量消耗和热损失。

碳氢化合物（葡萄糖）(G)：$C_6H_{12}O_6 + 6O_2(g) \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O - 2870\text{kJ/mol}$

脂肪 (F)：$C_{55}H_{104}O_6 + 78O_2 \rightarrow 55CO_2 + 52H_2O - 34300\text{kJ/mol}$

蛋白质 (Pr)：$C_{32}H_{48}O_{10}N_8 + 33O_2 \rightarrow 32CO_2 + 8NH_3 + 12H_2O - 14744\text{kJ/mol}$

解：

能量消耗可以通过上面给出的反应焓来计算：

$$\dot{E} = 2870(\dot{n})_G + 34300(\dot{n})_F + 14744(\dot{n})_{Pr}(\text{kJ/h})$$

流量的摩尔数可以根据反应化学计量系数来获得。例如，对于氧气：

- 1mol/h 葡萄糖消耗 6mol/h O_2。
- 1mol/h 脂肪消耗 78mol/h O_2。

- 1mol/h 蛋白质消耗 33mol/h O_2。

对二氧化碳和氮气使用类似的步骤，可以得到

$$\dot{n}_{O_2} = 6\dot{n}_G + 78\dot{n}_F + 33\dot{n}_{Pr} = 4.0 \times 10^{-9}\text{mol/h}$$

$$\dot{n}_{CO_2} = 6\dot{n}_G + 55\dot{n}_F + 32\dot{n}_{Pr} = 3.6 \times 10^{-9}\text{mol/h}$$

$$\dot{n}_N = 8\dot{n}_{Pr} = 0.4 \times 10^{-9}\text{mol/h}$$

求解上述方程，可以得到其能量消耗为

$$\dot{E} = [2870(0.194)_G + 34300(0.0152)_F + 14744(0.05)_{Pr}] \times 10^{-9}$$
$$= 1820 \times 10^{-9}\text{kJ/h} = 0.505\mu\text{W}$$
$$W = 50 \times 10^{-9}\text{W} = 0.05\mu\text{W}$$

热损失：$\dot{q} = \dot{E} - \dot{W} = (0.506 - 0.050)\mu\text{W} = 0.46\mu\text{W}$

例 10.5　成年生物的能量消耗

一个成年生物 24h 大约吸入 1.16mol 氧气，相应排出的二氧化碳和氮气分别为 16.95mol 和 5.76g[10]。如果成年人同时期做了 1.2 MJ 的外功，而且他在休息时的能量消耗为$\dot{E}_0 = 65\text{W}$；请使用下面给出的生物燃料参数，估算其能量消耗、热损失与外功的净效率。

燃　料	比反应焓/(kJ/g)	比转化率		
		O_2/(mmol/g)	CO_2/(mmol/g)	N/(g/g)
CH	-17	33.3	33.3	—
脂肪	-39	90.6	63.8	—
Pr	-17	43.3	34.43	0.16

注：CH：碳水化合物，Pr：蛋白质，资料来源 Garby 和 Larsen[10]。

解：

能量消耗可以根据能量平衡来计算。假设①氧化过程仅涉及碳水化合物（CH）、脂肪（F）和蛋白质（Pr）三类化合物；②其他化合物是固定不变的；③氧气、二氧化碳和氮气的吸收和消除是瞬时的。根据热力学第一定律，可以得到：

$$\dot{E} = \sum_i (\dot{m}\Delta H_r)_i = (\dot{m}\Delta H_r)_{CH} + (\dot{m}\Delta H_r)_F + (\dot{m}\Delta H_r)_{Pr} = \dot{q} + \dot{W}(\text{kJ/天})$$

使用燃料的比焓值：

$$17\dot{m}_{CH} + 39\dot{m}_F + 17\dot{m}_{Pr} = \dot{q} + \dot{W} = \dot{E} \qquad \text{(a)}$$

根据上表的参数，质量守恒为

$$\dot{n}_{O_2} = 33.3\dot{m}_{CH} + 90.6\dot{m}_F = 21160\text{mmol/天}$$

$$\dot{n}_{CO_2} = 33.3\dot{m}_{CH} + 90.6\dot{m}_F = 16950\text{mmol/天}$$

根据这些方程，可以得到：

$$\dot{m}_{Pr} = 5.76/0.16 = 36\text{g/天}$$

$$\dot{m}_{CH} = 208\text{g/天}$$

$$\dot{m}_F = 157\text{g/天}$$

根据式（a），有

总能量消耗 = 基础代谢率 + 身体活动

$$17(208) + 39(157) + 17(36) = -\dot{q} + (-\dot{W}) = \dot{E} = 10271\text{kJ/天}$$

因为做功（身体活动的一部分）为 1.2MJ/天 = 1200kJ/天

热损失：$\dot{q} = (10271 - 1200)\text{kJ/天} = 9071\text{kJ/天}$

基础代谢率（休息时的能量消耗）：$\dot{E}_o = 65\text{W} = 5616\text{kJ/天}$

身体活动的净有效能：$(10271 - 5616)\text{kJ/天}$

那么生物能量学效率被定义为

$$\eta_B = \frac{\dot{W}}{(\dot{E} - \dot{E}_o)} = \frac{1200}{(10271 - 5616)} = 0.257 \text{ 或 } 25.7\%$$

式中，$\dot{E}_o$ 为休息时的能量消耗；$\dot{E}$ 为总能量。

习　　题

10.1　请估算一个体重为 55kg 的成年人的每日能量消耗。

10.2　请估算一个体重为 20kg 的儿童的每日能量消耗。

10.3　请估算一个体重为 51kg 的成年人的每日能量消耗。

10.4　某个体重为 65kg 的成年人的饮食史显示，他每天大约要食用 250g 碳水化合物、120g 蛋白质和 160g 脂肪。成年人的常规运动每天平均消耗 600kcal 的能量。请估算该成年人的能量消耗并评估其能量摄入是否过量。

10.5　某个体重为 25kg 的儿童的饮食史显示，他每天大约要食用 150g 碳水化合物、80g 蛋白质和 100g 脂肪。儿童的常规运动每天平均消耗 450kcal 的能量。请估算该儿童的能量消耗并评估其能量摄入是否过量。

10.6　某个体重为 75kg 的成年人的饮食史显示，他每天大约要食用 275g 碳水化合物、160g 蛋白质和 190g 脂肪。成年人的常规运动每天平均消耗 700kcal 的能量。请估算该成年人的能量消耗并评估其能量摄入是否过量。

10.7　请讨论快速水解 ATP 的后果。

10.8　请讨论摄入与人体不匹配的能量的后果。

10.9　请讨论人体供氧不足的后果。

10.10　一个生物体热量散失的速率为 1.64W，对外做功为 1.4Nm/min。①请估算该生物的能量消耗；②如果该生物泵出流体的流量为 100mL/min，流体压降为 25mm Hg（3.34kPa），效率为 10%，请估算泵出该流体的效率。

10.11　一个生物体热量散失的速率为 2.1W，对外做功为 5Nm/min。①请估算该生物的能量消耗；②如果该生物泵出流体的流量为 52mL/min，流体压降为 2.5mm Hg（0.334kPa），效率为 10%，请估算泵出该流体的效率。

10.12　①请估算在 310K 和 1atm 的等温等压条件下葡萄糖氧化的反应焓。②请估算在稳定条件下每天氧化 390g 葡萄糖的能量消耗。

10.13　考虑一个体重为 10lg 的小生物体，在稳态时每小时消耗 8.0×10^{-9}mol 氧气，同时排出 7.1×10^{-9}mol 二氧化碳和 0.8×10^{-9}mol N（以氨的形式）。该生物体的外功为 80×10^{-9}W。请使用下面给出的反应热，估算其能量消耗和热损失。

碳氢化合物（葡萄糖）（G）：$C_6H_{12}O_6+6O_2(g)\rightarrow6CO_2+6H_2O-2870kJ/mol$

脂肪（F）：$C_{55}H_{104}O_6+78O_2\rightarrow55CO_2+52H_2O-34300kJ/mol$

蛋白质（Pr）：$C_{32}H_{48}O_{10}N_8+33O_2\rightarrow32CO_2+8NH_3+12H_2O-14744kJ/mol$

10.14　一个成年生物 24h 大约吸入 1.16mol 氧气，相应排出的二氧化碳和氮气分别为 16.95mol 和 5.76g[10]。如果成年人同时期做了 1.25MJ 的外功，而且他在休息时的能量消耗为 $\dot{E}_o=72W$。请使用下面给出的生物燃料参数，估算其能量消耗、热损失与外功的净效率。

燃　料	比反应焓/(kJ/g)	比转化率		
		O_2/(mmol/g)	CO_2/(mmol/g)	N/(g/g)
CH	-17	33.3	33.3	-
脂肪	-39	90.6	63.8	-
Pr	-17	43.3	34.43	0.16

注：CH：碳水化合物，Pr：蛋白质，资料来源 Garby 和 Larsen[10]。

10.15　一个成年生物 24h 大约吸入 22.5mol 氧气，相应排出的二氧化碳和氮气分别为 17.4mol 和 6.6g[10]。请使用生物燃料参数，估算其能量消耗、热损失与外功的净效率。

参 考 文 献

1. Alberts B, Bary D, Lewis J, Raff M, Roberts K, Watson D (2002) Molecular biology of the cell, 4th edn. Garland, New York
2. Andrews AJ, Luger K (2010) A coupled equilibrium approach to study nucleosome thermodynamics. Methods Enzymol 488:265–285
3. Andriesse CD, Hollestelle MJ (2001) Minimum entropy production in photosynthesis. Biophys Chem 90:249–253
4. Brock TD, Brock KM, Ward DM (1986) Basic microbiology with applications, 3rd edn. Prentice Hall, Englewood Cliffs
5. Cairns CB, Walther J, Harken AL, Banerjee A (1998) Mitochondrial oxidative phosphorylation thermodynamic efficiencies reflect physiological organ roles. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 433:R1376–R1393
6. Caplan RS, Essig A (1999) Bioenergetics and linear nonequilibrium thermodynamics. The steady state. Harvard University Press, New York

7. Demirel Y (2007) Nonequilibrium thermodynamics: transport and rate processes in physical, chemical and biological systems, 2nd edn. Elsevier, Amsterdam
8. Demirel Y (2008) Thermodynamically coupled transport in simple catalytic reactions. Int J Chem Reactor Eng 6:1–22
9. Demirel Y, Sandler SI (2002) Thermodynamics of bioenergetics. Biophys Chem 97:87–111
10. Garby L, Larsen PS (1995) Bioenergetics. Cambridge, New York
11. Heinrich R, Schuster S (1998) The modeling of metabolic systems. Structure, control and optimality. Biosystems 47:61–77
12. Korzeniewski B (1997) Thermodynamic regulation of cytochrome oxidase. Mol Cell Biochem 174:137–141
13. Marks DB (1999) Biochemistry. Kluwer, New York
14. Nath S (1998) A thermodynamic principle for the coupled bioenergetic processes of ATP synthesis. Pure Appl Chem 70:639–644
15. Purves WK, Sadava D, Orians GH (2004) Life: the science of biology. MacMillian, Amsterdam
16. Sambongi Y, Ueda I, Wada Y, Futai M (2000) A biological molecular motor, proton translocating ATP synthase: multidisciplinary approach for a unique membrane enzyme. J Bioenerg Biomem 32:441–448
17. Schäfer G, Penefsky H (eds) (2010) Bioenergetics: energy conservation and conversion. Springer, Berlin
18. Stucki JW (1980) The optimal efficiency and the economic degrees of coupling of oxidative phosphorylation. Euro J Biochem 109:269–283
19. Stucki JW (1980) The thermodynamic-buffer enzymes. Euro J Biochem 109:257–267
20. Stucki JW (1984) Optimization of mitochondrial energy conversions. Adv Chem Phys 55:141–167
21. Stucki JW (1991) Non-equilibrium thermodynamic sensitivity of oxidative phosphorylation. Proc Biol Sci 244:197–202
22. Stucki JW, Compiani M, Caplan SR (1983) Efficency of energy-conversion in model biological pumps optimization by linear nonequilibrium thermodynamics relation. Biophys Chem 18:101–109
23. Soboll S (1995) Regulation of energy metabolism in liver. J Bioenerg Biomem 27:571–582
24. Soboll S, Stucki JW (1985) Regulation of the degree of coupling of oxidative phosphorylation in intact rat-liver. Biochim Biophys Acta 807:245–254
25. Tomashek JJ, Brusilow WSA (2000) Stoichiometry of energy coupling by proton-translocating ATPases: a history of variability. J Bioenerg Biomem 32:493–500
26. Wilson K, Walker J (2005) Principals & techniques of biochemistry and molecular biology, 6th edn. Cambridge University Press, Cambridge
27. Woitczak L, Schonfeld P (1993) Effect of fatty acids on energy coupling processes in mitochondria. Biochim Biophys Acta 1183:41–57

关于本书

本书为读者提供了实践问题的习题，对于工程和科学学科的本科生和研究生来说，是一本全面的宝典、学习指南和课程补充材料。

读者可以向Yaşar Demirel博士发送邮件来申请获得本书的所有资源（包括习题在内），邮箱为ydemirel2@unl.edu。

为中华崛起传播智慧

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037

电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203

网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
金书网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

策划编辑◎顾 谦

国际视野　科技前沿

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》
《微纳机电生物传感器》
《电力系统的扰动分析》
《体内机器人：从毫米级至纳米级》
《嵌入式系统在智能电器和能源管理中的应用》
《高级测量仪器与计算机I/O设计：精度界定和控制及其工业应用》（原书第2版）
《固体氧化物燃料电池的动态建模与预测控制》
《氢能源和车辆系统》
《纳米技术与能源》
《电能效率：技术与应用》
《自主移动机器人行为建模与控制》
《环境能源发电：太阳能、风能和海洋能》
《智能电网——融合可再生、分布式及高效能源》
《电动汽车融入现代电网》
《太阳能照明》
《超级电容器：材料、系统及应用》
《太阳能发电系统控制技术》
《ESD物理与器件》
《锂二次电池原理与应用》
《风力发电并网运行的无功管理》
《超大规模集成电路物理设计：从图分割到时序收敛》
《海上风电成本建模：安装与拆除》
《智能电网——设计与分析基础》
《功率理论与电能质量治理》
《混合动力电动汽车原理及应用前景》
《智能电网中的传导电磁干扰》
《风能转换技术进展》
《电机传动系统控制》
《储氢材料：储存性能表征》
《风力机技术》
《小型风力机：分析、设计与应用》
《通信系统高电压保护》
《磁性测量手册》
《ESD设计与综合》
《太阳能利用技术及工程应用》
《超级电容器的应用》
《小型风力机：分析、设计与应用》
《太阳电池、LED和二极管的原理：PN结的作用》
《风力发电系统 —— 技术与趋势》
《可持续电力系统的建模与控制：面向更为智能和绿色的电网》
《电力系统高级预测技术和发电优化调度》
《大规模储能技术》
《风电系统电能质量和稳定性对策》
《环境能源发电：太阳能、风能和海洋能》
《传热学：电力电子器件热管理》
《现代电力电子学与交流传动》
《功率半导体器件：原理、特性和可靠性》
《风能系统——实现安全可靠运行的优化设计与建设》
《储能技术》
《光伏系统工程》（原书第3版）
《光伏与风力发电系统并网变换器》

机械工业出版社E视界　　机械工业出版社微信公众号

上架指导 工业技术／电工技术／能源

ISBN 978-7-111-50132-9　定价：89.00元