



国际电气工程先进技术译丛



# 可再生能源的转换、 传输和存储

**Renewable Energy  
Conversion, Transmission  
and Storage**

(丹) Bent Sørensen 著  
沈艳霞 吴定会 潘庭龙 等译



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

# 可再生能源的转换、 传输和存储

(丹) Bent Sørensen 著  
沈艳霞 吴定会 潘庭龙 等译



机械工业出版社

这是一本关于可再生能源的工程技术著作，它系统地介绍了可再生能源的能量转换、传输和存储技术。首先第 I 部分介绍了能源转换的基本原理，然后在第 II 部分 ~ 第 VI 部分详细阐述了各种能量的转换，包括热能、机械能、太阳能、电化学能和生物质能等；第 VII 部分介绍了能量的传输方式，第 VIII 部分讨论了能量的存储，最后在第 IX 部分探讨了高质量能量的存储形式。

本书可供研究院所、高等院校、企业从事新能源技术研究和开发的技术人员阅读，也可供高等院校相关专业研究生和本科生参考。

Translation from the English language edition:  
Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage  
By Bent Sørensen  
Copyright ©2007, Elsevier Inc. All Rights Reserved.

本书原版由 Elsevier 公司出版，并经授权翻译出版，版权所有，侵权必究。

本书中文简体翻译出版授权机械工业出版社独家出版，并限定在中国大陆地区销售，未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书版权登记号：图字 01-2009-6169

## 图书在版编目(CIP)数据

可再生能源的转换、传输和存储/(丹)索伦森(Sørensen, B.)著;沈艳霞等译. —北京:机械工业出版社, 2011.5

书名原文: Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage  
ISBN 978-7-111-34944-0

I. ①可… II. ①索… ②沈… III. ①再生能源-研究 IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 106750 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:朱林 责任编辑:朱林 版式设计:霍永明  
责任校对:张晓蓉 封面设计:马精明 责任印制:杨曦  
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷  
2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷  
169mm × 239mm · 16.75 印张 · 331 千字  
0001—3000 册  
标准书号: ISBN 978-7-111-34944-0  
定价: 78.00 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

社服务中心 : (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部 : (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部 : (010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者购书热线: (010)88379203

# 前 言

在不久的将来，可再生能源在能源系统中将占有主导地位已经得到越来越多的人的认可。这不仅是因为温室气体排放以及有限的汽油和核能源，也是由于它们在地球上的分布不均匀，并且在大多数采用不可再生能源的地区的政策越来越不稳定。

在人类历史中，可再生能源是我们能源系统的支柱，其发展过程曾被便宜的能源打断，这些便宜的能源只能使用几百年，并且是高度不可持续的。不幸的是，这一段时间内能源非常便宜，使得人们根本不会想到去提高能源的使用效率，尽管这样也可以省钱。最近的分析表明大量的提升效率所用的已有技术可以获得的成本比节约的能源成本还低。现在我们知道供能系统的任何再生能源都比当前能源的成本高，虽然本书是关于满足我们将来能源需要的一些可再生技术，它必须首先强调在转换系统中所有效率的提高，这样做的成本比设计新系统要低，因此需要牺牲我们更多的时间来确保供能系统的平滑过渡。

本书基于作者的《可再生能源》一书的能量转换、传输和存储部分章节。1979年，《可再生能源》一书被作为学术议程的标题，实际上获得了“可再生能源”的术语。《可再生能源》一书（现在是第3版）主要解决可再生能源系统中的物理、技术、社会、经济和环境方面的问题，而本书则集中在工程方面，以便为将来许多在线的可再生能源工程课程提供合适的教材，并希望同时为在该重要领域工作的人们提供入门参考。

2007年6月于 Gilleleje, Bent Sørensen

# 目 录

译者序

前言

第 1 章 介绍	1
<b>第 I 部分 基本原理</b>	<b>2</b>
第 2 章 能源转换的基本原理	2
2.1 能源种类间的转换	2
2.2 不可逆热力学	5
2.3 能源转换装置的效率	7
第 3 章 热力学动力循环	10
<b>第 II 部分 热能转换过程</b>	<b>13</b>
第 4 章 直接热电转换	13
4.1 热电发电机	13
4.2 热电子发电机	15
第 5 章 太阳能的能量转换	16
5.1 Ericsson 热空气发动机	16
第 6 章 热泵	19
6.1 热泵的操作	19
6.2 热交换	21
第 7 章 地热能和海洋热能转换	22
7.1 地热能的转换	22
7.2 海洋热能的转换	23
<b>第 III 部分 机械能转换过程</b>	<b>24</b>
第 8 章 流驱动转换的基本描述	24
8.1 自由流涡轮机	25
8.2 风流转换的一般要素	27
第 9 章 螺旋桨式转换器	32
9.1 无互动流体管的理论	32
9.2 能量输出的行为模型以及负载匹配	36
9.3 非统一的风速	41
9.4 风力的恢复和风力涡轮机阵列的本质	45

9.5	岸上的地基问题 .....	48
9.6	风的高度比例和频率分布 .....	49
第 10 章	侧风和其他转换器概念 .....	50
10.1	Darrieus 类型转换器的性能 .....	50
10.2	增压器 .....	53
10.3	管道式转子 .....	54
10.4	叶片尖端型转子 .....	55
10.5	其他风能转换的概念 .....	57
10.6	热、电/机械能和燃料发电 .....	58
第 11 章	水能和潮汐能的转换 .....	60
11.1	水流转换 .....	60
第 12 章	磁流体力学变换器 .....	63
第 13 章	波能转换器 .....	64
13.1	波能的转换装置 .....	65
13.2	气动转换器 .....	66
13.3	摆动气缸或叶片转换器 .....	69
第 IV 部分	太阳能辐射转换过程 .....	72
第 14 章	光伏转换 .....	72
14.1	半导体中能带的介绍 .....	72
14.2	光伏转换 .....	76
第 15 章	光电化学转换 .....	99
第 16 章	太阳能热能转换 .....	108
16.1	热量的产生 .....	108
第 17 章	太阳热电发生器 .....	125
第 18 章	太阳能冷却和其他应用 .....	128
第 V 部分	电化学能量转换过程 .....	133
第 19 章	燃料电池 .....	133
19.1	电化学转化 .....	133
19.2	燃料电池 .....	133
19.3	燃料电池技术 .....	136
第 20 章	其他电化学能量转换 .....	141
20.1	盐度区别 .....	141
20.2	盐度差能源的转换 .....	143
第 VI 部分	生物能转换过程 .....	145
第 21 章	燃烧 .....	145

21.1 化石生物燃料 .....	145
21.2 来自生物质燃烧的热量 .....	146
第 22 章 生物质转化为气体燃料 .....	153
第 23 章 生物质与液体燃料的转换 .....	164
第 24 章 转化为气体和其他燃料的热化学转换方法 .....	170
24.1 新鲜生物质的热化学汽化 .....	172
24.2 来自生物质的甲醇 .....	175
<b>第 VII 部分 能量传输</b> .....	<b>178</b>
第 25 章 热传递 .....	178
25.1 传输的概述 .....	178
25.2 区域供热路线 .....	178
第 26 章 电力传输 .....	181
26.1 正常传输路线 .....	181
26.2 超导线 .....	182
第 27 章 燃料传送 .....	184
<b>第 VIII 部分 热存储</b> .....	<b>185</b>
第 28 章 热的存储 .....	185
28.1 热存储 .....	185
第 29 章 潜热和化工转型存储 .....	198
<b>第 IX 部分 高质量能源的存储</b> .....	<b>206</b>
第 30 章 泵水力存储 .....	206
30.1 高质量能源的存储概述 .....	206
30.2 抽水蓄能存储 .....	207
第 31 章 飞轮 .....	211
第 32 章 压缩气体的存储 .....	218
第 33 章 电池存储 .....	228
第 34 章 其他能源形式 .....	234
34.1 光的直接存储 .....	234
34.2 超导存储 .....	235
小型项目和习题 .....	237
参考文献 .....	243

# 第1章 介绍

本书首先介绍能源转换的基本原理，然后介绍了适合各类可再生能源的更加具体的转换类型，如风能、水能、潮汐能、用于发热和发电的太阳能辐射在燃料电池和电池操作中能量的二次转换，以及一系列涉及生物能的转换，还包括从传统的燃烧方式到产生液态或气态生物燃料等的先进方式。

由于一些可再生能源是间断的，仅仅依靠能源的地区间贸易补偿是远远不够的（在不同的地区根据政策需要做不同的改变），因此能源的存储在很多可持续能源系统中是一种重要的措施。在介绍了可再生能源系统中各种能量的传输后，本书最后一章介绍了能量的存储。总之，本书介绍了在设计可再生能源系统时需要考虑的所有技术上的问题。关于经济上政策、环境影响和规划进程，以及可再生能源的来源和分布的基本解释，可以参阅 Sørensen（2004 年）的大量论文。

如果本书作为能源课程的教材，教师可以采用书后的“小型项目和习题”，其中包含了一些简单的问题，但是大多数可以用作小型项目，让一个或者一组学生在几周时间内完成，最后递交一份 5~25 页的项目报告。做这些项目时，学生通过在计算机中建立模型以得到该问题的定量结果分析。

因为基本原理不随时间而改变，因此本书参考文献中包含了大量非常旧的文献，这些文献反映了对某一问题最早的研究而不是最新进展。



# 第 I 部分 基本原理

## 第 2 章 能源转换的基本原理

大量的能源转换过程都是在自然地进行。在人类历史中，人们利用其所发明的各种设备进行大量的能源转换。根据装置的结构类型、其遵循的物理或者化学规律、或者根据在设备转换前后能源出现的形式，可以对这些装置进行分类。在本章中，对可再生能源的各种转换和存储方法进行了综述。下文将讨论一般的转换原理，按照能源转换前后的形式，对特殊的能源转换设备的工程设计进行介绍。当然这些介绍是不完整的，同时还包含了对不同设备的重要性评价。

### 2.1 能源种类间的转换

表 2.1 根据转换后的能源类型，列举了一些目前正在应用的能源转换过程或者设备。在很多情况下，采用设备进行能量转换后，不只是得到一种能源形式，例如热能和所列举的其他能源形式。许多设备也需要一系列能源转换步骤，而不仅是列表中所给出的单一的转换步骤。例如，发电站在能源形式间经过以下转换过程链：化学能—热能—机械能—电能。也会出现如机械能到机械能的转换（如高架液的势能—流动液体的动能—涡轮机的转动能量）或者在低温条件下热能到热能（如转换和传导）的转换形式。热力学第二定律不允许单纯地从低温到高温的热能转换过程。但如果温度变化的同时伴随一些高质量能量的递减，则可以采用这种转换过程，例如热能泵（表 2.1 中列举的从电能到热能的转换器，并将在第 6 章中讨论）。

表 2.1 根据最初的能源形式和指定的一种转换后的能源形式（最想要的）  
列出的能源转换过程的例子

最初的能源形式	转换能源形式				
	化学能	光能	电能	机械能	热能
核能			燃料电池，电池 放电，光伏电池		反应堆
化学能					燃烧器，锅炉

(续)

最初的能源形式	转换能源形式				
	化学能	光能	电能	机械能	热能
光能	光分解				吸收器
电能	电分解, 电池充电	光源, 激光		电动机	电阻, 热能泵
机械能			发电机, MHD	涡轮机	摩擦力, 搅拌
热能			热离子和热电发生器	热力发动机	转换器, 散热器, 热导管

在指定的过程中能量转换效率即期望的能源输出和能源输入的比率，取决于整个转换过程中所遵循的物理和化学定律。对于热力发动机，利用热能工作，按照热力学理论的描述可以避免在分子层面采用显微镜描述的复杂性（在统计学假设的基础上）。根据热力学第二定律，没有任何热力发动机可以比可逆的卡诺过程更高效，如图 2.1 所示，用热力学不同状态变量的集合表示： $(P, V) = (\text{压力, 体积})$ ； $(T, S) = (\text{绝对温度, 熵})$ ；和  $(H, S) = (\text{焓, 熵})$ 。

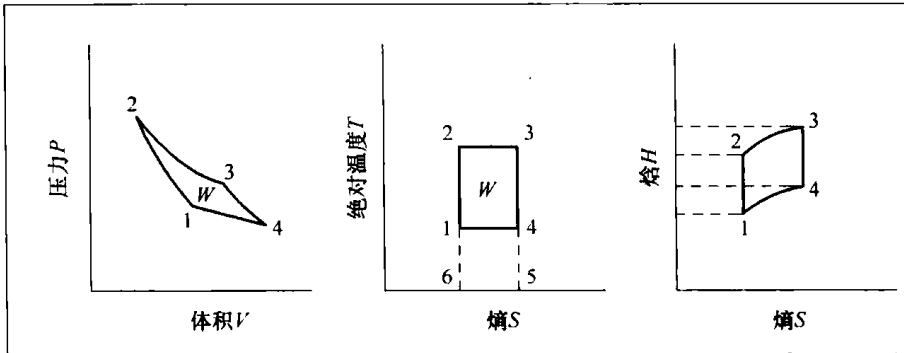


图 2.1 卡诺循环过程不同的表述

注：按照方向 1—2—3—4 经过一个循环，使大量的热能投入到工作中（详见细节）。

在能量转换过程中，系统从状态 1 变到状态 2 时熵  $S$  的改变定义为

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} T^{-1} dQ \tag{2.1}$$

其中积分以连续无限小且可逆的步长进行（不必涉及真正的过程，真正的过程可能是不可逆的），大量的热能  $dS$  从温度为  $T$  的存储器转移到系统中。在真实的过程中该温度存储器是不存在的，但是为了在式 (2.1) 中应用，系统初始和结束的状态必须精确定义为  $T_1$  和  $T_2$ 。熵包含了一个由热力学第三定律（斯特定律）确定的任意的通用常数，它表示在零绝对温度 ( $T=0$ ) 时  $S$  为 0。焓  $H$  定义为

$$H = U + PV$$

用系统中的  $P$ 、 $V$  和内部能量  $U$  表示。根据热力学第一定律， $U$  是一个状态变量，

$$\Delta U = \int dQ + \int dW \quad (2.2)$$

由大量的热能和施加到系统的功表示 ( $Q$  和  $W$  不是状态变量，式 (2.2) 中每个积分取决于积分路径)。式 (2.2) 决定了  $U$  可以达到一个任意常量，即能量的零点。采用定义式 (2.1)，有

$$dQ = TdS$$

和

$$dW = -PdV$$

在可逆过程中上述两个定义均是有效的。在微分方程中可以发现以下的联系：

$$dU = TdS - PdV$$

$$dH = TdS + VdP \quad (2.3)$$

这些联系通常被假设为普遍有效的。

如果系统中发生化学反应，在式 (2.3) 两个方程的右侧同时加上额外项  $\mu_i d_{ni}$ ， $\mu_i$  为化学势能（可以参照 Maron 和 Prutton，1959 年）。

对于如图 2.1 所示的循环过程， $\int dU = 0$  返回到上面任何一张图的最初轨迹，依照式 (2.3)， $\int TdS = \int PdV$ ，这表示在图 ( $P, V$ ) 或 ( $T, S$ ) 中循环过程路径所围成的面积等于系统在一个周期内所完成的功  $W$ （按照图 2.1 中数字增大的顺序）。

在等温进程 2—3，加到系统中的热能为  $\Delta Q_{23} = T(S_3 - S_2)$ ，温度恒定为  $T$ 。在另外一个等温过程 4—1 中，温度为  $T_{ref}$  时加到系统的热量是  $\Delta Q_{41} = -T_{ref}(S_3 - S_2)$ 。由图 ( $T, S$ )， $\Delta Q_{23} + \Delta Q_{41} = -W$ 。当参考温度为  $T_{ref}$  时，在温度  $T$  时卡诺过程将热量转换为功的效率为

$$\eta = \frac{-W}{\Delta Q_{23}} = \frac{T - T_{ref}}{T} \quad (2.4)$$

卡诺循环（见图 2.1）包括了 4 个步骤：1—2，绝热压缩（不与环境进行热交换，即  $dS=0$ ， $dQ=0$ ）；2—3，在恒温下从周围环境吸收热量（热交换  $\Delta Q_{23}$  由图 ( $T, S$ ) 中路径 2—3—5—6—2 包围的面积给出）；3—4，绝热膨胀；4—1，恒温下通过逆过程将能量释放到周围环境（ $\Delta Q_{41}$  等于图 ( $T, S$ ) 中路径 4—5—6—1—4 所围成的面积）。

( $H, S$ ) 图给出了一种能量表示方法，图中可以直接读取能量的差异，而不是采用面积表示。

实现可逆卡诺循环的步骤需要很长一段时间。对人来讲，时间是非常重要的（能源转换过程的目标是功率，而不仅仅是大量的能源），因此可以将不可逆过程

引入到实际转换装置的热力学循环中。不可逆过程的热力学将在下文以一个实际的估算进行描述，其中将涉及很多例子。读者如果对于热力学的描述没有特殊的兴趣可以轻松地忽略公式（除非读者需要应付考试）。

## 2.2 不可逆热力学

不可逆的程度用能源的损耗率表示，即

$$D = T \frac{dS}{dt} \quad (2.5)$$

式中， $\frac{dS}{dt}$ 是系统在恒温  $T$  下的熵值（即  $T$  可以认为是与系统进行交换的大型热量存储器的温度）。为了描述该耗散过程，引入自由能量的概念（E. G. Callen, 1960年）。

系统的自由能量  $G$  定义为当系统和其环境之间只有功的交换时从系统中获取的最大的功。当自由能量为零时该系统处于热动力平衡状态。

考虑将一个系统分为两个子系统，一个具有泛变量  $U$ 、 $S$ 、 $V$  等的小系统（变量与系统大小成正比），一个具有密集变量  $T_{\text{ref}}$  和  $P_{\text{ref}}$  等的大系统，该系统初始状态处于热力学平衡。术语“小系统”和“大系统”表示大系统的密集变量（不是其泛变量  $U_{\text{ref}}$  和  $S_{\text{ref}}$  等）可以作为常量，而不管整个系统如何达到平衡。

这就意味着当整个系统达到平衡时小系统的未在过程中定义的密集变量将趋于大系统的变量。自由能源或者最大功可以在初始状态和平衡点的可逆过程中获得，等于初始内部能量  $U_{\text{init}} = U + U_{\text{ref}}$  和最终的内部能源  $U_{\text{eq}}$  之差，或者可以写为（所有都写成初始状态变量的形式）

$$G = U - TS_{\text{ref}} + P_{\text{ref}}V \quad (2.6)$$

如果涉及化学反应，再加上  $\sum \mu_{i,\text{ref}} n_i$ 。在电磁能量相互作用时类似。

如果整个系统是封闭的，它自发地通过内部的不可逆过程达到平衡，能量变化率为

$$\frac{dG}{dt} = \frac{d}{dt}(U_{\text{init}} - U_{\text{eq}}(t)) = \frac{\partial U_{\text{eq}}(t)}{\partial S(t)} \frac{dS(t)}{dt}$$

假设熵是唯一的变量。 $S(t)$  是整个系统在时间  $t$  时的熵， $U_{\text{eq}}(t)$  是在时间  $t$  时一个实际状态变量  $S(t)$  在假定平衡状态所拥有的内部能量。对于任何平衡状态，根据式 (2.3)， $\frac{\partial U_{\text{eq}}(t)}{\partial S(t)}$  等于  $T_{\text{ref}}$ ，并通过与式 (2.5) 的比较可以看出，耗散率可由

自由能量的损耗和熵的增加确定

$$D = -\frac{dG}{dt} = T_{\text{ref}} \frac{dS(t)}{dt} \quad (2.7)$$

对于实际的系统，往往有约束条件限制系统达到绝对零自由能平衡状态。例如，上述的小系统与大气系统分离以维持系统体积  $V$  为常数。在这种情况下，可以利用的自由能（即可以获取的最大有用功）成为绝对的自由能量式 (2.6)，减去相对平衡点的自由能量，从而合并后的系统满足约束条件。如果受限平衡状态的泛变量定义为  $S^0$ 、 $U^0$  和  $V^0$  等，则可以应用的自由能量为

$$\Delta G = (U - U^0) - T_{\text{ref}}(S - S^0) + P_{\text{ref}}(V - V^0) \quad (2.8)$$

再加上化学势能。在式 (2.6) 或式 (2.8) 中， $G$  称为 Gibbs 势能。如果小系统受限，使容积无法改变，自由能减少到 Helmholtz 势能  $U - TS$ 。如果小系统受限，使它不能进行热交换，则自由能降低到焓  $H$ 。对应的式 (2.8) 给出了给定条件下从热动力系统中获取的最大的功。

将实际过程描述成时间的函数需要对泛变量“运动方程”的知识，即

$$\begin{aligned} J_s &= \frac{dS}{dt} (\text{熵流量}) & \text{或者 } J_Q &= \frac{dQ}{dt} (\text{热流量}) \\ J_m &= \frac{dm}{dt} (\text{质量流量}) & \text{或者 } J_\theta &= \frac{d\theta}{dt} (\text{角速度}) \\ J_q &= \frac{dq}{dt} = I (\text{电荷流量或者电流}), \text{等等} \end{aligned} \quad (2.9)$$

作为第一近似，电流和力间的联系可认为是线性的（Onsager, 1931 年）

$$J_i = \sum_j L_{ij} F_j \quad (2.10)$$

每个流动元素的方向是  $\frac{J_i}{J_i}$ 。式 (2.11) 给出的能量耗散降低了选择广义受力的任意性，就像 Onsager 所做的

$$D = - \frac{dG}{dt} = \sum_i J_i \cdot F_i \quad (2.11)$$

式 (2.10) 的线性关系的例子是欧姆定律，表明电流  $J_q$  与电动势的梯度成正比，也是热传导或扩散中的傅里叶定律，表明热流量  $E^{\text{trans}} = J_Q$  与温度梯度成正比。

考虑热膨胀过程中所需的卡诺循环（见图 2.1），热量以速度  $J_Q = \frac{dQ}{dt}$  流向系统，根据式 (2.10)，最简单的形式为  $J_Q = L F_Q$ 。由式 (2.11)，能源损耗可以表示为

$$D = T \frac{dS}{dt} = J_Q F_Q = L^{-1} J_Q^2$$

在有限时间  $\Delta t$  内，熵增加为

$$\Delta S = \frac{dS}{dt} \Delta t = (LT)^{-1} J_Q^2 \Delta t = (LT \Delta t)^{-1} (\Delta Q)^2$$

所以，为了转移有限热量  $\Delta Q$ ， $\Delta S \Delta t$  必须等于  $(LT)^{-1} J_Q^2$ 。为使这一进程可

逆，作为理想的卡诺循环， $\Delta S$  必须趋近于零，即  $\Delta t$  趋于无穷大。这证明了本节开始提出的观点，为了在有限的时间经过热力学发动机循环，我们必须放弃可逆性，并允许一定的能量损耗和比理想值式 (2.4) 要小的效率。

## 2.3 能源转换装置的效率

能源转换设备原理图如图 2.2 所示，足以涵盖在实际应用中大多数类型的转换器 (Angrist, 1976 年; Osterle, 1964 年)。有一种质量流入装置，另外一种从装置中流出，同时有热量的传入和传出。输出的功是电能或旋转轴的功率。

假设转换器处于稳态，即导入和传出的质量流是确定的，设备本身的热熵是常数，所有产生的熵值随着输出流消失。

由热力学第一定律，获得的功率  $E$  等于网络能量的输入，即

$$E = J_{Q,\text{in}} - J_{Q,\text{out}} + J_m (w_{\text{in}} - w_{\text{out}}) \quad (2.12)$$

电流大小由式 (2.9) 给出，其惯例符号可从图 2.2 推断出。传入的质量流的指定能量  $w_{\text{in}}$  和输出的质量流的指定能量  $w_{\text{out}}$ ，是势能、动能和焓的总和。焓的意义代表固定流的热力学能量按照 BERNOULLI 定理 (PIPPARD, 1966 年) 确定。它指出，如果热传导可以忽略不计，对固定流而言，焓是常数。对于图 2.2 的设备所假设的质量流，焓  $h$  是质量流的性质，如同动能是运动的性质，例如，重力势能

$$w = w^{\text{pot}} + w^{\text{kin}} + h \quad (2.13)$$

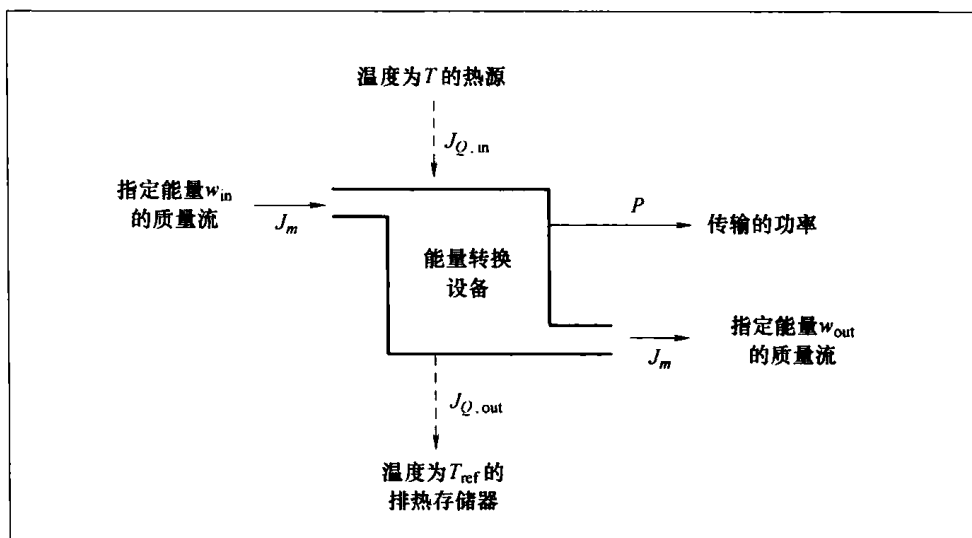


图 2.2 具有稳定的质量流的能量转换装置的示意图

注：转换的符号惯例不同于式 (2.2) 所用的，式 (2.2) 中所有流入的量都认为正的。

输出功率可以写成

$$E = -\mathbf{J}_\theta \cdot \mathbf{F}_\theta - \mathbf{J}_q \cdot \mathbf{F}_q \quad (2.14)$$

电流大小由式 (2.9) 给出, 广义力为

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_\theta &= \int \mathbf{r} \times d\mathbf{F}_{\text{mech}}(r) \quad (\text{转矩}) \\ \mathbf{F}_q &= -\text{grad}(\phi) \quad (\text{电场}) \end{aligned} \quad (2.15)$$

分别对应机械转矩和电动势梯度。熵的产生率即转换装置周围的熵增率 (如前所述, 设备内部熵在稳态模型下是常数) 为

$$\frac{dS}{dt} = (T_{\text{ref}})^{-1} J_{Q,\text{out}} - T^{-1} J_{Q,\text{in}} + J_m (s_{m,\text{out}} - s_{m,\text{in}})$$

其中,  $s_{m,\text{in}}$  是流入到设备的质量体 (液体, 气体等) 的指定熵,  $s_{m,\text{out}}$  是流出的质量体的熵。由式 (2.12) 可以消除  $J_{Q,\text{out}}$ , 能量耗散率可由式 (2.7) 获得

$$D = T_{\text{ref}} \frac{dS}{dt} = J_{Q,\text{in}} \left(1 - \frac{T_{\text{ref}}}{T}\right) + J_m [w_{\text{in}} - w_{\text{out}} - T_{\text{ref}}(s_{m,\text{in}} - s_{m,\text{out}})] - E = \max(E) - E \quad (2.16)$$

最大的功 (保证  $\frac{dS}{dt} = 0$ ) 包括卡诺项 (封闭循环, 即没有外部流动), 加上与质量流量成正比的项。将式 (2.16) 的耗散率代入式 (2.11) 的 Onsager 形式

$$D = J_{Q,\text{in}} F_{Q,\text{in}} + J_m F_m + \mathbf{J}_\theta \cdot \mathbf{F}_\theta + \mathbf{J}_q \cdot \mathbf{F}_q \quad (2.17)$$

除了式 (2.15), 定义广义力

$$\begin{aligned} F_{Q,\text{in}} &= \left(1 - \frac{T_{\text{ref}}}{T}\right) \\ F_m &= w_{\text{in}} - w_{\text{out}} - T_{\text{ref}}(s_{m,\text{in}} - s_{m,\text{out}}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

流入设备的热量和质量转换为功率的效率与式 (2.4) 类似

$$\eta = \frac{E}{J_{Q,\text{in}} + J_m w_{\text{in}}} \quad (2.19)$$

可将式 (2.16) 的  $E$  代入。这种效率有时可以认为是热力学第一定律的效率, 因为它只涉及理想形式的输入和输出能量, 并不涉及和输出能量质量相关的输入能量的质量。

为了考虑能量的质量, 按照热力学第二定律, 必须考虑和转换装置中热量和质量流动相关的熵的变化, 这由热力学第二定律效率实现。对能量发生装置, 定义

$$\eta^{(2.\text{law})} = \frac{E}{\max(E)} = -\frac{\mathbf{J}_\theta \cdot \mathbf{F}_\theta + \mathbf{J}_q \cdot \mathbf{F}_q}{J_{Q,\text{in}} F_{Q,\text{in}} + J_m F_m} \quad (2.20)$$

当  $\max(E)$  是按照热力学第二定律定义为吸收功的最大效率时, 第二个表达式尤其适用于图 2.2 中的设备, 而第一个表达式是具有普遍性的。应当指出,  $\max(E)$  不仅取决于系统和可控的能量输入, 而且还取决于周围的环境。

对所希望的能量形式不能适用的能量转换装置，可采用图 2.2 中所示的例子进行处理。在式 (2.17) 中，各种能源形式的输入和输出是不加区分的。例如，电能作为输入（符号变化），输出可能是热能或质量流。效率表达式 (2.19) 和式 (2.20) 必须改变，将实际输入项放到分母中，实际的输出项放到分子中。如果所需的输出能量用  $W$  表示，第二定律效率可以写作以下通用形式：

$$\eta^{(2. \text{law})} = \frac{W}{\max(W)} \quad (2.21)$$

对于基于原理的转换过程而不是现象的热力学描述的过程，对应的效率可由式 (2.21) 定义，在无热力学描述的限制下计算  $\max(W)$ 。在这种情况下，“第二定律效率”的名称就必须修改。



## 第3章 热力学动力循环

大量的热力学循环，即采用共轭变量表示的（闭合的）路径，已在实践中得到证明。它们是将卡诺循环的“原型”修改成一种在有限时间内完成的循环的折中方案。每个循环可以将热能转换成功，但传统应用中的热源大多来自于燃料的燃烧，即最初的能量转换过程，在该转换中高质量的化学能转化为一定温度下的热量，同时产生一定的熵。

图 3.1 给出了对应于图 2.1 的  $(P, V) - (T, S)$  和  $(H, S)$  的一些动力循环。

布雷顿 (Brayton) 循环的工作物质是气体，在步骤 1—2 将其压缩，然后在步骤 3—4 进行释放。其余两个步骤在恒压（等压）条件下完成，在步骤 2—3 加热。在步骤 3—4 的气体释放过程中产生有效功，效率等于焓差  $(H_3 - H_4)$  除去总输入  $(H_3 - H_1)$ 。燃气涡轮机和喷气发动机便是遵循布雷顿循环的设备例子。在这些例子中，循环通常不是封闭的，因为燃气在点 4 已经耗尽，因此不存在步骤 4—1。故在某种情况下称这些转换过程“开环”。

目前在汽车发动机中大量使用的奥托 (Otto) 循环与布雷顿循环的不同之处在于步骤 2—3 和步骤 4—1（如果循环是闭合的），Otto 循环是在容积不变的情况（密度不变）下进行的，而不是恒压。

柴油机热循环（一般用在船舶、货车/卡车和越来越多的旅行车发动机）的步骤 2—3 是恒压的，步骤 4—1 容积不变，另外的两个步骤近似绝热。这些机器的实际设计，包括涡轮机车轮或活塞缸等，可查阅工程教科书（例如 Hute, 1954 年）。

接近理想的卡诺循环是斯特林 (Stirling) 循环，包括两条等容积线 (1—2 和 3—4) 和两条等温线。Ericsson 循环的目的是希望使用热空气作为工作液体。它包括两条等容积线 (1—2 和 3—4) 和两条介于等温线和绝热线之间的曲线（如 Meinel 和 Meinel, 1976 年）。

图 3.1 描述的最后—个循环是朗肯 (Rankine) 循环，因为存在工作流体的两个阶段，它的出现更加复杂。步骤 1—2—3 描述了将液体加热到沸点的过程。步骤 3—4 对应液体的蒸发，即液体和气体同时存在的阶段，这是一条等温等压线。步骤 4—5 代表气体的过热过程，其后步骤 5—7 为绝热膨胀。这两个步骤会重复一次或多次，在每一次膨胀到饱和时，逐渐降压实现过热。最后，步骤 7—1 再次完成常温常压下压缩的混合阶段。只有温度低于饱和温度时，才会进行压缩。在步骤 5—7 的气体释放中产生有效功，所以效率等于焓差  $(H_5 - H_7)$  除以总输入  $(H_6 -$