



可再生能源系列

可再生能源基础

Renewable Energy:
A First Course

[英] Robert Ehrlich / 著

王社教 闫家泓 胡俊文 等 / 译



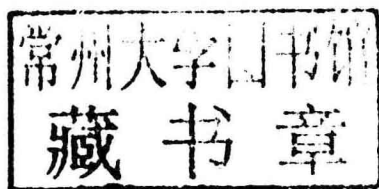
CRC Press
Taylor & Francis Group

石油工业出版社

可再生能源系列

可再生能源基础

[英] Robert Ehrlich 著
王社教 闫家泓 胡俊文 等译



石油工业出版社

内 容 提 要

本书是一本关于可再生能源方面的基础读物,内容涉及生物质能、地热能、风能、水电、太阳辐射能、太阳热能及光伏发电等可再生能源,并对煤炭、石油等化石能源及核能等常规能源做了介绍,分析了能源储存和传输的技术、方法,阐述了中国、美国、印度等国的能源政策,对我国可再生能源发展有一定的参考意义。

本书可供从事可再生能源研究的科研人员、管理人员及高等院校相关专业的师生参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

可再生能源基础 / (英) 罗伯特·欧利希 著 ; 王社教等译. — 北京 : 石油工业出版社, 2017. 9

书名原文: Renewable Energy: A First Course

ISBN 978-7-5183-2073-8

I. ①可… II. ①罗…②王… III. ①再生能源-研究 IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 223326 号

Renewable Energy: A First Course

by Robert Ehrlich

ISBN: 978-1-4398-6115-8

©2013 by Taylor & Francis Group, LLC

CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business

All Rights Reserved

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC.

本书经 Taylor & Francis Group, LLC 授权翻译出版并在中国大陆地区销售,简体中文版权归石油工业出版社有限公司所有,侵权必究。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2016-0887

出版发行: 石油工业出版社有限公司
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523544

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 20

字数: 512 千字

定价: 160.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

本书涉及可再生能源技术并解释其中的基本原理，对于具备一些物理学和微积分基础的理工科学生来说是一本有用的基础教程。本书尽可能避免使用技术性术语和常见于该类书籍的高深的数学方法。与其他可再生能源书籍不同的是，本书的章节也并不冗长，其 14 个章节的内容至少很适合美国大部分学校一个学期的教学。我个人认为有些教科书确实令人生畏，希望本书不会归类于此类教材。我从 4 年前才开始研究这一学科。相对而言，在能源领域算是新人。但我的确不是一名年轻的教员，事实上，我的教学生涯即将结束。4 年前，我试图找到余生可能致力的有意义的研究方向，而可再生能源对我来说是一个不错的选择。在此之前，我的教学和科研工作完全或几乎都集中于物理学领域。因此，4 年前，在可再生能源领域我还是一个相对的“新人”，不得不去弄清许多问题。如此一来，我对这一学科困扰学生的各种问题以及如何尽可能清晰地对这些问题做出讲解仍铭记在心。

考虑到与大多数能源生产方式相关的环境问题以及能源在社会中所占据的中心地位，可再生能源对世界的未来具有重大意义。为了避免环境灾害、严重的能源短缺甚至社会混乱或战争，需要做出适当的能源选择。这些适当的选择并不是显而易见的事，也定然不像说“拯救环境，请停止使用化石燃料和核能”那么简单。明智的决策需要充分考虑所有的干系并深入观察经济、环境、技术、政治等动态，权衡一系列潜在技术的相对成本和利益。因此，即便你的职业规划并非这一领域，但作为一个公民和消费者而言，本书也将帮助你做出更明智的选择。

本书尽管题名为“可再生能源基础”，但有三章为非可再生能源的内容：化石燃料有一个章节，核能有两个章节，核能的第一个章节关注科学，而第二个章节关注技术。这是对可再生能源的重要补充。因为只有与现今其他主要能源方式相对比，才能更好地评价可再生能源的优缺点。此外，即便有一些国家，例如德国，已选择逐步淘汰核能和燃煤发电厂，但这些类型的技术可能仍将保持一段时间。一些观察人士认为，就现实而言，到 2030 年才可能完全转为可再生能源（如太阳能、风能、生物燃料、地热和水力发电），而大多数观点认为在时间点上可能还要进一步往后延。本书还包含了 4 个不限定任何能源类型的重要主题，即能源保护、能源储存、能源运输、能源政策。能源领域是一个不断变化的领域，因而跟踪最新的进展非常重要。本书提供了最新的信息，尽管这些信息可能在几年内需要作一些修订。希望读者能喜欢本书。

作者简介

Robert Ehrlich 是美国乔治梅森大学物理学教授。在布鲁克林学院获得物理学学士学位、哥伦比亚大学获得博士学位，是美国物理学会会员。之前就职于乔治梅森大学物理系和纽约州立大学，从事物理学教学近四十年。

Ehrlich 博士是一名基本粒子物理学家，同时也从事许多其他领域的研究工作。已编写或主编书籍 20 本，发表论文约 100 篇。他当前的学术兴趣包括可再生能源和超光速粒子。
<http://arxiv.org/pdf/1204.0484.pdf>

目 录

| | |
|----------------------------------|------|
| 第 1 章 绪论 | (1) |
| 1.1 写作本书的目的 | (1) |
| 1.2 能源对社会为何如此重要? | (1) |
| 1.3 什么是能量? | (2) |
| 1.4 是否还有某些未知的新的能量形式? | (3) |
| 1.5 能量的单位是什么? | (4) |
| 1.6 热力学定律 | (5) |
| 1.7 什么是能源? | (7) |
| 1.8 世界能源问题究竟是什么? | (7) |
| 1.9 如何定义绿色或可再生能源? | (10) |
| 1.10 为何可再生能源和资源的保护长期以来被忽视? | (11) |
| 1.11 能效真的重要吗? | (12) |
| 1.12 哪一种可再生能源最有前景? | (13) |
| 1.13 谁处于可再生能源的世界领先地位? | (14) |
| 1.14 能源的未来可能是什么状况? | (15) |
| 1.15 为未来指明最佳方案的复杂性 | (17) |
| 1.16 小结 | (19) |
| 问题 | (19) |
| 参考文献 | (20) |
| 第 2 章 化石燃料 | (21) |
| 2.1 概述 | (21) |
| 2.2 煤炭 | (23) |
| 2.3 石油和天然气 | (34) |
| 2.4 小结 | (43) |
| 问题 | (43) |
| 参考文献 | (44) |
| 第 3 章 核能基础 | (46) |
| 3.1 早期概况 | (46) |
| 3.2 原子核的发现 | (48) |
| 3.3 卢瑟福散射实验的数学运算 | (49) |
| 3.4 原子及其核的组成和结构 | (52) |
| 3.5 核半径 | (53) |
| 3.6 核力 | (53) |
| 3.7 电离辐射和核转变 | (54) |

| | | |
|------------|-----------------------|--------------|
| 3.8 | 核的质量和能量 | (55) |
| 3.9 | 核结合能 | (56) |
| 3.10 | 核聚变的能量释放 | (57) |
| 3.11 | 核裂变的机制 | (57) |
| 3.12 | 核聚变的机制 | (58) |
| 3.13 | 放射性衰变定律 | (60) |
| 3.14 | 保健物理学 | (60) |
| 3.15 | 辐射探测器 | (60) |
| 3.16 | 辐射源 | (61) |
| 3.17 | 辐射对人类的影响 | (62) |
| 3.18 | 小结 | (64) |
| | 问题 | (64) |
| | 参考文献 | (65) |
| 第4章 | 核能技术 | (67) |
| 4.1 | 概述 | (67) |
| 4.2 | 早期历史 | (68) |
| 4.3 | 临界质量 | (69) |
| 4.4 | 核武器和核扩散 | (72) |
| 4.5 | 世界首个核反应堆 | (74) |
| 4.6 | 第Ⅰ代和第Ⅱ代核反应堆 | (75) |
| 4.7 | 已有反应堆类型 | (76) |
| 4.8 | 反应堆事故 | (80) |
| 4.9 | 燃料循环前端：获得原矿石 | (83) |
| 4.10 | 燃料循环后端：核废料处理 | (84) |
| 4.11 | 大规模核电力的经济效益 | (86) |
| 4.12 | 小型模块化核反应堆 | (88) |
| 4.13 | 核聚变反应 | (90) |
| 4.14 | 小结 | (92) |
| | 问题 | (92) |
| | 参考文献 | (93) |
| 第5章 | 生物燃料 | (95) |
| 5.1 | 概述 | (95) |
| 5.2 | 光合作用 | (96) |
| 5.3 | 生物燃料分类 | (99) |
| 5.4 | 生物燃料其他用途及社会环境影响 | (105) |
| 5.5 | 人造光合作用 | (108) |
| 5.6 | 总结 | (108) |
| | 问题 | (108) |
| | 参考文献 | (110) |
| 第6章 | 地热能 | (111) |

| | | |
|------------|------------------------|--------------|
| 6.1 | 概述 | (111) |
| 6.2 | 地球内部的地球物理特征 | (113) |
| 6.3 | 地温梯度 | (113) |
| 6.4 | 资源特征和相对富集程度 | (115) |
| 6.5 | 地热发电厂 | (118) |
| 6.6 | 地热民用和商业用途 | (119) |
| 6.7 | 地热可持续性 | (121) |
| 6.8 | 环境影响 | (123) |
| 6.9 | 地热发电经济效益 | (124) |
| 6.10 | 小结 | (127) |
| | 问题 | (127) |
| | 参考文献 | (128) |
| 第7章 | 风能 | (130) |
| 7.1 | 概述 | (130) |
| 7.2 | 风能特征和资源 | (132) |
| 7.3 | 传给涡轮机的能量 | (138) |
| 7.4 | 涡轮类型和相关术语 | (139) |
| 7.5 | 可控的和最优的风速涡轮机性能 | (144) |
| 7.6 | 供电及输电网集成 | (147) |
| 7.7 | 微风 | (150) |
| 7.8 | 近岸风力 | (151) |
| 7.9 | 环境影响 | (151) |
| 7.10 | 不同寻常的设计和应用 | (153) |
| | 问题 | (155) |
| | 参考文献 | (156) |
| 第8章 | 水动力能 | (157) |
| 8.1 | 概述 | (157) |
| 8.2 | 波浪、潮汐和海洋热能资源 | (167) |
| 8.3 | 潮汐能及成因 | (170) |
| 8.4 | 海洋热能转化 | (175) |
| 8.5 | 水力发电对社会和环境影响 | (175) |
| 8.6 | 小结 | (176) |
| | 问题 | (176) |
| | 参考文献 | (177) |
| 第9章 | 太阳辐射与地球气候 | (178) |
| 9.1 | 概述 | (178) |
| 9.2 | 电磁辐射 | (179) |
| 9.3 | 光谱类型 | (179) |
| 9.4 | 太阳在天空中的视运动 | (182) |
| 9.5 | 太阳辐射的利用 | (184) |

| | | |
|---------------|----------------------|--------------|
| 9.6 | 太阳能集热器的最优方位及倾向 | (185) |
| 9.7 | 温室效应 | (186) |
| 9.8 | 小结 | (196) |
| | 问题 | (196) |
| | 参考文献 | (198) |
| 第 10 章 | 太阳辐射热能 | (199) |
| 10.1 | 概述 | (199) |
| 10.2 | 太阳能热水系统 | (200) |
| 10.3 | 平板集热器 | (200) |
| 10.4 | 真空管集热器 | (202) |
| 10.5 | 集热器和系统效率 | (203) |
| 10.6 | 管道热损耗 | (206) |
| 10.7 | 水箱和热容 | (207) |
| 10.8 | 被动式太阳能热水系统 | (208) |
| 10.9 | 游泳池加热 | (210) |
| 10.10 | 空间加热和制冷 | (210) |
| 10.11 | 非常适合发展中国家的三个应用 | (211) |
| 10.12 | 发电 | (213) |
| 10.13 | 小结 | (219) |
| 附录 | 四种热量传递机制 | (219) |
| | 问题 | (222) |
| | 参考文献 | (223) |
| 第 11 章 | 太阳能光伏 | (224) |
| 11.1 | 概述 | (224) |
| 11.2 | 导体、绝缘体和半导体 | (226) |
| 11.3 | 半导体通过掺杂电导率增加 | (228) |
| 11.4 | pn 结 | (231) |
| 11.5 | 通用光伏电池 | (232) |
| 11.6 | 太阳能的电学性能 | (233) |
| 11.7 | 太阳能电池及太阳能系统的效率 | (234) |
| 11.8 | 太阳能系统的效率 | (236) |
| 11.9 | 电网连接和逆变器 | (237) |
| 11.10 | 其他类型的太阳能电池 | (238) |
| 11.11 | 环境问题 | (239) |
| 11.12 | 小结 | (239) |
| 附录 | 基本量子力学和能带的形成 | (239) |
| | 问题 | (242) |
| | 参考文献 | (243) |
| 第 12 章 | 节能和能源效率 | (244) |
| 12.1 | 概述 | (244) |

| | | |
|---------------|--------------------------|-------|
| 12.2 | 除了效率之外影响能源相关选择的因素 | (246) |
| 12.3 | 最低的低挂果实 | (248) |
| 12.4 | 效率和节能的障碍 | (259) |
| 12.5 | 能源效率和节能最终会徒劳吗? | (260) |
| 12.6 | 小结 | (261) |
| | 问题 | (261) |
| | 参考文献 | (262) |
| 第 13 章 | 能源储存与运输 | (264) |
| 13.1 | 能源储存 | (264) |
| 13.2 | 能量传输 | (285) |
| 13.3 | 小结 | (293) |
| | 问题 | (293) |
| | 参考文献 | (294) |
| 第 14 章 | 气候和能源: 政策、政治和公众舆论 | (296) |
| 14.1 | 国际条约的重要性 | (296) |
| 14.2 | 三大温室气体排放国在干什么? | (298) |
| 14.3 | 世界摆脱化石燃料需要多长时间? | (300) |
| 14.4 | 公众舆论如何发展 | (301) |
| 14.5 | 最好的出路 | (303) |
| 14.6 | 小结 | (305) |
| 14.7 | 一些结论性的思考 | (305) |
| | 问题 | (307) |
| | 参考文献 | (307) |
| 附录 | 问题答案 | (308) |

第 1 章 绪 论

1.1 写作本书的目的

撰写本书的想法源于首次讲授的一门可再生能源课程。该课程并不属于“能源 101”项目，而是为已完成物理学入门系列和参加过微积分培训的学生设计的课程。在搜集适宜教材的过程中，我对可供选择的书籍感到非常失望，几乎所有的书籍都或多或少地显得太基础或太过深奥。少数水平适中的书籍似乎又太专注于技术，而不能鲜明地体现出我所期望的课程应涵盖的基本内容。此外，我更喜欢写作风格相对通俗的教材，甚至于偶尔也可来点幽默。但在我所见过的所有教材中都缺少这一点。本书主要专注于可再生能源，但我认为涉及一些非可再生能源（特别是化石燃料和核能）也相当重要，因为只有这样才能形成有效的对照，但我认为许多书籍忽略了该部分内容。虽然该课程含有物理量，由物理学家讲授，公正地说它有“物理学取向”，但其内容远远超出物理学的范围。物理学家有特定的、不同于其他科学家和工程师看待世界的方式。他们想知道“事物如何运作”，想剖开事物的现象看本质。从激光到计算机断层扫描（CT）再到原子弹，许多新技术的出现并非偶然，物理学家发明和发展新技术，而新技术的细化则由工程师来完成。因此，尽管工程学可能对可再生能源跨学科领域的贡献最大，但我感到作为一名物理学家，能担当起本书的写作任务是一件非常惬意的事情。

1.2 能源对社会为何如此重要？

我们这些有幸生活在发达国家的人通常理所应当认为有丰富的能量来源可用，完全不理解世界上有半数以上的人口所面临的生活困境，他们在用自己的劳力或畜力替代发达国家常见的机器和设备作业。停电可以让人短暂地体验到没有丰富能量来源的生活究竟是什么滋味。不过，这种短暂的间断对生存可能并没有太大影响（特殊情况除外）。但如果停电一段时间，譬如说 6 个月，试想生活会是什么样子？没有移动电话、电视、互联网或无线广播对你来说可能只是小问题，特别的情况下，如果食物短缺的寒冬腊月发生持久的电力故障，即便你拥有知识、工具和土地可以“从事农耕”，但那也纯粹只是笑谈。尽管我们当中的一些人可能幻想工业化前那种简单、没有现代高科技社会所有诱惑的生活方式是何等快乐，但如果我们突然陷入一个完全没有电力的世界，现实可能就完全不同。很可能大部分人挨不过 6 个月。多个国家的电网同时发生持久故障的想法不仅仅是某些奇幻电影的场景，正如本书第 14 章所讨论的那样，太阳大耀斑就可能造成这种状况。太阳耀斑最近一次大规模的影响显然是电气文明之前发生于 1859 年的“卡林顿事件”（Carrington Event），它导致了北美和欧洲电报系统失灵。

1.3 什么是能量？

上学时许多人都知道“能量是做功的能力”，“它不能被创造或被毁灭”（能量守恒）。但这些被熟记和人云亦云的表达在实际情况下并不总是能应用自如。例如，假定你有一台连接灯泡的手摇曲柄式或脚踏驱动式发电机，如果把灯泡从灯座中松开或换上一个低瓦数的灯泡，你是否认为转动发电机的难度和之前是一样的？多数人（甚至工科的学生）对这个问题的回答是“是”，而实验后经常会惊奇地发现答案是“否”——拿掉灯泡或换上一个低瓦数的灯泡的发电机更容易转动。遵循能量守恒定律必定如此，因为转动曲柄的机械能正在被转化为电能，当松开灯泡时则缺少电能。如果不管灯泡是否被点亮或发光有多明亮，发电机的手柄都一样容易转动，那么给一个百万人口的城市供电将会跟给一个只有一千人口的城市供电一样容易！顺便说一句，你可能忘了用脚踏驱动式发电机时付出的体力，因为即便是一个狂热的自行车手最多只能提供美国人平均消耗的几个百分点的电量。

除了对能量守恒定律在特定条件下的意义有误解，定律本身也有一些有趣和微妙的复杂性。理查德·费曼（Richard Feynman）是20世纪最伟大的物理学家之一，他有许多重大发现，包括与朱利安·施温格（Julian Schwinger）在量子电动力学领域的发现。费曼的人生多姿多彩，且是一位天赋极高的老师，具有独到的观察世界的方式。他知道能量的概念和能量的守恒远比许多其他的物理量更复杂和抽象，如电荷的守恒涉及一个单独的量——净电荷量。然而，就能量而言，问题在于其表现形式多样，包括动能、势能、热能、光能、电能、磁能和核能都可以相互转化。跟踪净能量和认识能量的守恒牵涉到一些复杂的“记账式工作”，例如，要知道多少个单位的热量（卡路里）与多少个单位的机械能（焦耳）相当。

知识盒 1cal 等于多少 J？

1cal 是 1g 水升温 1°C 的热量。由于这个量对温度有少许依赖，有时引进换算因子把它视为稍微不同的值，通常是 4.1868 J/cal。

在介绍能量的概念及其守恒定律时，费曼编了一个小男孩玩 28 块固定积木的故事（Feynman, 1985）。男孩的妈妈每天回家都看到有 28 块积木，直到有一天，她发现只有 27 块积木。善于观察的妈妈注意到有一个积木落在了后院，意识到她的儿子一定是把它抛出了窗外。很明显，积木的数量（像能量一样）只有在封闭系统中才能“守恒”，既不会有积木或能量的进入，也不会有丢失。之后，她更加留心不让窗户开着。一天，当这位妈妈回到家里，她发现只剩下 25 块积木，她推断失踪的三块积木一定被藏在什么地方——但到底藏在哪儿呢？

男孩为了增加他妈妈搜寻的难度并没有让她打开可能藏有积木的盒子。但这位聪明的妈妈发现盒子的重量比空时要重，确切地说超出了一块积木重量的三倍，由此她得出了明确的答案。随着母子间的这一游戏一天天地继续，孩子找到更多巧妙的藏积木的地方。例如，有一天他把几块积木藏到了水槽的污水下，但这位妈妈注意到水位上升了相当于两块积木体积的高度。需要注意的是，这位妈妈从没看到任何藏着的积木，但通过仔细观察就能推断出不同地方所藏的积木数量，由于窗户是关闭的，她总能发现积木的总数不变。如果这位妈妈愿意的话，她可以把她的发现写成“积木守恒”方程。

$$\text{可见积木数} + \text{藏在盒子中的数} + \text{藏在水槽中的数} + \dots = 28$$

其中，每个所藏积木的数量必须通过仔细测量推断出， \dots 表示可能藏在其他地方的任意积木数。

能量守恒类似于积木的故事，当你考虑所有能量的形式时（所有积木的藏匿地）算出的总数是一个常数。但请记住，为了得出积木数守恒的结论，这位妈妈需要确切地知道对应一块积木盒子超重多少、洗碗水上升了多少等。这同样也适用于能量守恒。如果我们想看涉及运动和热的某些过程其能量是否守恒，需要确切地知道每单位的机械能（J）与多少单位的热（cal）相当。事实上，物理学家詹姆斯·普雷斯科特·焦耳（James Prescott Joule）就是用这种方式证明了热是能量的一种形式。是否会有能量不守恒的物理状况，结果只可能有四种。在进一步阅读之前看你能否把它们找出来。

1.4 是否还有某些未知的新的能量形式？

费曼的“男孩与积木”的故事恰如其分地类比了人类发现新的能量形式的过程，能量往往藏匿得很好，只有当看似违反了能量守恒时才被发现。例如，一个世纪以前，谁会幻想所有原子核内都贮存着巨大的能量并可能被释放？即便在原子核发现之后，当科学家们意识到原子核所含的巨大能量可以被利用时已过去了30年时间。当然，发现新的能量形式并不是常见的事情，而最近一次的发现事实上与核能有关。

知识盒 能量不守恒的四种可能结果：

- 所面对的不是封闭系统——能量正以一种形式进入，或以另一种形式逃离系统。
- 能量虽存在于系统中，但因表现为某种方式而被忽略（可能由于我们对它的存在形式一无所知）。
- 因测量导致的错误分析。
- 发现了违反能量守恒的案例。

对多数物理学家而言，最后一种可能性完全是不可想象的，因而当看似发生这种情况时，提议用高度游离的替代物——中微子来替代，例如，解释 beta 衰变中见不到能量的“消失”——见第3章。

仍有可能存在某些至今仍未被发现的能量形式，但当下所有这类声明都没有足够的说服力。很可能是由于系统不封闭，或者没有合理地解释所有已知的能量形式从而导致能量在任何情况下都看似不守恒。同样地，那些认为人体周围有仪器不可测的能量场，可以被具有手电波特技的触摸理疗师操控的人是在自欺欺人。这种认为生物体的运转是基于特殊能量场而不是仪器可测量的正常电磁场的想法本质上被认为是19世纪臭名昭著的“活力论”思想。这一理论认为，生命结构中存在某种与生俱来的能量，或活力是生命体本身特有的力量。

在一个由六年级学生巧妙设计、完成，并发表于著名医学杂志的实验中，触摸理疗师无法感知任何本应感知到的能量场。事实上，他们猜对的次数低于正常概率，只有44%（Rosa, 1998）。不用说，如此荒谬的信徒是不太可能对本书感兴趣的（图1.1）。

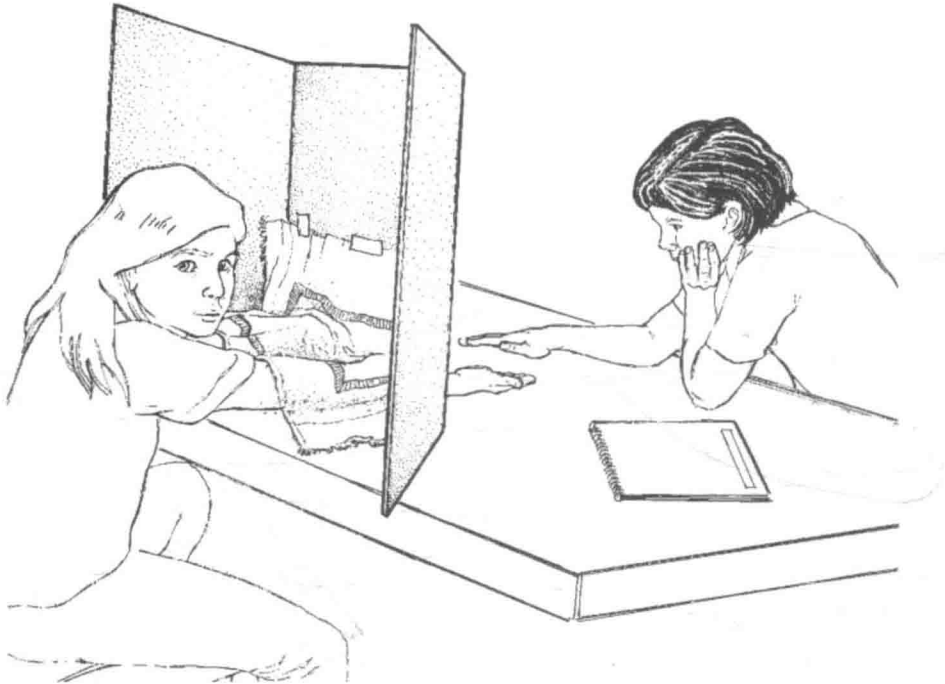


图 1.1 触摸理疗师（左）试图感知她两手中哪一只上方出现了右边年轻实验者的手
(据美国加利福尼亚州阿尔塔迪纳怀疑论学会授权)

1.5 能量的单位是什么?

事实上, 能量有多种多样的存在形式, 部分原因是它的量有多种不同的表征单位, 例如, 卡路里 (cal) 和英制热单位 (Btu) 通常用于热能; 焦耳 (J)、尔格 (erg, $1\text{J} = 10^7\text{erg}$) 和英尺·磅 (ft·lb) 用于机械能; 千瓦时 (kW·h) 用于电能; 兆电子伏 (MeV) 用于核能。然而, 由于所有这些单位均描述相同的基本实体, 它们之间必定有换算因子的关系。更容易迷惑人的是, 功率在定量上有一套独立的单位, 指的是能量产出或消耗的比率, 即:

$$p = \frac{dE}{dt} = \dot{E} \quad \text{或} \quad E = \int p dt \quad (1.1)$$

需要注意的是, 任意上方加点的量表示其时间导数的缩写。许多功率和能量的单位看起来相似, 如千瓦 (kW) 是功率单位, 而千瓦时是能量单位 (表 1.1)。

表 1.1 一些能量单位

| 名称 | 定义 |
|-----------|-----------------------|
| 焦耳 (J) | 1N 力作用 1m 所做的功 (即 1W) |
| 尔格 (erg) | 1dyne 力作用 1cm 所做的功 |
| 卡路里 (cal) | 1g 水升温 1°C 所需的热量 |
| Btu | 1lb 水升温 1°F 所需的热量 |

| 名称 | 定义 |
|---------------|-----------------------|
| 千瓦时 (kW · h) | 1kW 电流持续 1h 的能量 |
| 库德 (quad) | 10^{15} Btu |
| 色姆 (therm) | 100000Btu |
| 电子伏 (eV) | 电子穿过 1V 的电位差获得的能量 |
| 兆吨 (Mt) | 100 万吨 TNT 炸药爆炸所释放的能量 |
| 英尺磅 (ft · lb) | 1lb 力作用 1ft 所做的功 |

注：根据上述定义，与食品相关的 1 卡路里实际为 1000cal 或 1 kcal。1 kcal 有时写成 1 Cal。读者应熟知一些更重要的换算因子。

知识盒 你支付电费或能量费用吗？

发电厂是根据其兆瓦 (MW) 级的输电功率来评级，但在大部分情况下，仅仅以千瓦时 (kW · h) 的总能量消耗而不是以使用率或每天使用的时间向用户收取费用。有些地方这些因素都考虑，消费者的处境经常就有很大差别。此外，为了缓和需求，实际上如果用户的使用率趋于一致，一些电力公司会考虑给一个特殊的费率，而对其他情况则按高峰和非高峰的使用率产生不同的付费。除了这些特殊的价格选项外，对于 100kW · h 的供电量，无论你是用 100W 的灯泡点 1000h 还是 200W 的灯泡点 500h，电力公司向你收取的费用相同。

1.6 热力学定律

能量守恒定律也被称为热力学第一定律，且正如我们所见，这一定律从来没有被违背过。对能量而言，本质上热力学第一定律说的是“不能无中生有”。而热力学第二定律更有意思，它讲的是“收支不能恰好相当”。热力学第二定律有多种形式，但最常见的一种形式是由热 Q_c 生成机械功 W ，其中，下标 C 代表燃烧热。一般说来，可定义任意过程的能效为：

$$e \equiv \frac{E_{\text{有用}}}{E_{\text{输入}}} = \frac{W}{Q_c} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_c} \quad (1.2)$$

方程 (1.2) 的最后一个等式提示我们能效方程适用于能量也适用于功率。根据热力学第一定律，能效可能的最大值是 1.0 或 100 %。而热力学第二定律则更严格地限定了它的值。对于燃料在温度 T_c 下发生燃烧，热在环境温度 T_a 下排放的过程而言，一般说来，由输出的有用功除以输入热所定义的能效不能超过卡诺效率：

$$e_c = 1 - \frac{T_a}{T_c} \quad (1.3)$$

其中，温度均为开尔文温度（绝对温度）。这一限制是热力学第二定律的直接结果，它阐明了热能总是自发地从高温流向低温。卡诺效率只适用于出现两个方向值均等的理想过程，除

了极限的情况，在真实世界中并不存在。例如，如果你拍一段任意真实过程的影片，如逐渐减慢的单摆运动，当影片倒放或正放时无疑类似于这种情况。时间可逆的理想过程要求净熵 S 为常数，熵的微小变化可以用某些特定温度 T 下的热流 dQ 来定义为：

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (1.4)$$

因此，热力学第二定律的另一种定义是对于任意真实过程 $dS > 0$ 。

知识盒 永动机

在历史发展的过程中，许多发明家曾提出名为永动机装置的想法，它或者能从无到有地产生能量（违背热力学第一定律），或者违背热力学第二定律。对于后者，产出的有用功虽然小于热消耗但超出由卡诺极限所决定的总量。尽管这类专利申请很普遍，但永动机从来都没有实现过，以至于美国专利和商标局（USPTO）定了一个官方政策，没有工作样机拒绝授权永动机专利。事实上，有意思的是 USPTO 对这类装置已给予了相当多的专利授权——甚至有一些是在最近几年。然而，也要注意专利授权并不意味着发明真正有效果，只不过是专利审查员想象不到为何它不会有效果。

例 1 计算功率随时间变化的能量

假定在一个核反应堆测试期间，2h 内其功率水平从 0 提升到 1000 MW 额定功率，接着全功率运行 6h，2h 内下降到 0。计算这 10h 内反应堆产生的总能量。

求解

在此，将假定功率的提升和下降随时间呈线性变化，因此 10h 内反应堆产生功率的相应变化如图 1.2 所示。

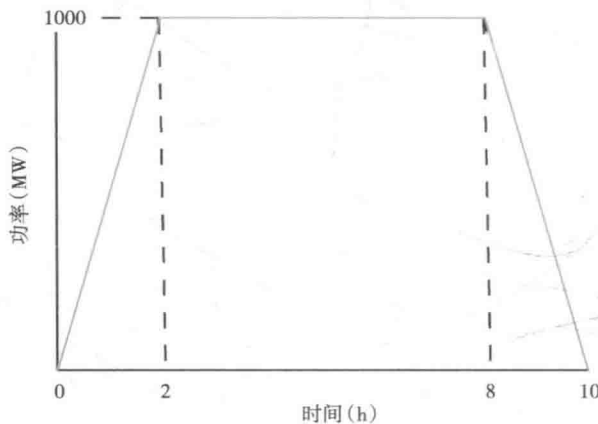


图 1.2 10h 测试期间核反应堆的功率分布图

根据方程 (1.1)，积分结果定义为功率—时间曲线下的面积，能量必等于图 1.2 中梯形的面积，即 $8000 \text{ MW} \cdot \text{h}$ (表 1.2)。

表 1.2 一些用于标示 10 的不同次方的常见前缀术语

| 前缀 | 定义 | 前缀 | 定义 |
|-------|-----------|-------------|------------|
| 尧 (Y) | 10^{24} | 毫 (m) | 10^{-3} |
| 泽 (Z) | 10^{21} | 微 (μ) | 10^{-6} |
| 艾 (E) | 10^{18} | 纳 (n) | 10^{-9} |
| 拍 (P) | 10^{15} | 皮 (p) | 10^{-12} |
| 太 (T) | 10^{12} | 飞 (f) | 10^{-15} |
| 吉 (G) | 10^9 | 阿 (a) | 10^{-18} |
| 兆 (M) | 10^6 | 仄 (z) | 10^{-21} |
| 千 (k) | 10^3 | 幺 (y) | 10^{-24} |

1.7 什么是能源?

一些能源的能量典型地是以化学能或核能等方式存储 (或储藏), 并在使用时释放出来。另一些能源的能量则是流动于自然环境中, 在特定时间和地点表现出不同程度的变化。第一类能源可以是煤、石油或铀, 而风能或太阳能为第二类能源。细想一下电力——它是不是一种能源? 自然环境中, 电以闪电的极端形式存在, 因此它可以被认为是第二类能源。事实上, 闪电可以被当作一种能源, 因为来自闪击的电荷可以被捕获和存储 (在电容器中) 并在使用时释放出来。任何见过风暴的人都有可能惊叹于闪电球的可怕力量, 其功率确实惊人——通常约 1 TW (10^{12} W)。数量上等于 1000 个 1000 MW 核反应堆输出的功率——而全世界现有的核反应堆也没那么多! 这样的比较可能会激发人们的想象: 好极了! 为何不利用闪电来作为一种能源呢? 问题不在于找出如何捕获闪电的方法, 而在于当功率非常高时, 闪电所含的能量非常小。由于闪电球持续时间短——约 $30\mu\text{s}$ (3×10^{-5} s), 根据方程 (1.1), 其所含的能量约 $10^{12}\times 3\times 10^{-5}=3\times 10^7\text{J}=30\text{MJ}$ 。30MJ 看上去也很不错, 但假如我们设计一个可捕获其 10% 能量的“闪电捕捉器”, 它仅够 100 W 灯泡使用的时间是 $t=E/p=3\times 10^6\text{J}/100\text{W}=3000\text{s}$, 低于 1h——考虑可能涉及的费用, 它几乎不是一种可用的能源。

人造电怎么样——它算是一种能源吗? 不是! 由于一些能量总是会作为热量散失到环境中, 任何创造电力所需输入的能量都大于电本身的能量。因此, 人造电无论是来自电池、发电机或太阳能板, 其本身不是能源, 而仅仅是由能源所创造的产品。就发电机而言, 无论如何它都是由迫使其转动的机械能产生, 而太阳能板提供的是作用在面板上入射光的能量。

1.8 世界能源问题究竟是什么?

所有的能源都会对环境产生一些影响, 众所周知, 不同能源的影响程度有很大差别。化石燃料 (煤、石油和天然气) 和核能大概是人们担心最多的能源, 而可再生的 (“绿色”) 能源被认为不构成危害——即便它们也有一些有害的影响。此外, 使用化石能源和核能对环境的影响随着时间的推移已变得越来越糟, 随着人口的增加, 人均能源使用量也在上升——这是世界各地生活水平提高不可避免的结果。更不用说人均财富变多人均能源使用量也随之相应增加, 二者强烈相关。根据新闻报道的石油泄漏、煤矿灾难以及像日本福岛这样的核能外