

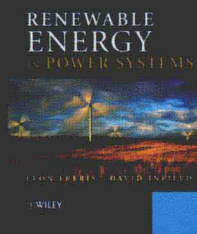


国际先进工业技术译丛

电力系统中的 可再生能源 Renewable Energy in Power Systems

【英】Leon Freris 著
David Infield

董长青 王孝强 刘永前 李继红 译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



国际先进工业技术译丛

电力系统中的 可再生能源

**Renewable Energy
in Power Systems**

人 民 邮 电 出 版 社
北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

电力系统中的可再生能源 / (英) 费里斯
(Freris, L.), (英) 因菲尔德 (Infield, D.) 著; 董长
青等译. — 北京: 人民邮电出版社, 2011. 1
(国际先进工业技术译丛)
ISBN 978-7-115-24273-0

I. ①电… II. ①费… ②因… ③董… III. ①电力系
统一再生资源: 能源—研究 IV. ①TM7②TK01

中国版本图书馆CIP数据核字 (2010) 第214572号

版 权 声 明

Leon Freris; David Infield

Renewable Energy In Power Systems

Copyright © 2008 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition published by Wiley Publishing, Inc..

本书中文简体字版由 Wiley Publishing 公司授权人民邮电出版社出版, 专有版权属于人民邮电出版社。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2010-0831 号

国际先进工业技术译丛

电力系统中的可再生能源

-
- ◆ 著 [英] Leon Freris David Infield
译 董长青 王孝强 刘永前 李继红
责任编辑 韦 毅
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 14
字数: 328 千字 2011 年 1 月第 1 版
印数: 1-3 000 册 2011 年 1 月北京第 1 次印刷
著作权合同登记号 图字: 01-2010-0831 号
ISBN 978-7-115-24273-0
-

定价: 48.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

内 容 提 要

本书主要介绍了可再生能源发电及并网的基础知识，包括可再生能源的特点及其不稳定性对应用的影响，以及可再生能源在并网前必须进行的调控过程。可再生能源的经济性会影响其商业应用，书中对此也进行了论述。本书还对可再生能源和电力系统未来的发展进行了展望。

本书的主要读者是可再生能源发电、输变电研究领域从业人员。本书也可作为可再生能源发电领域高年级本科生和研究生的参考资料。

丛 书 前 言

改革开放 30 年来，我国工业得到了飞速发展，在短短 30 年的时间内完成了发达国家上百年的工业化发展历程，建立了相对完整的工业体系。我国已成为全球制造业基地，中国模式备受世人瞩目。在信息技术快速发展以及对节能减排和环境保护日益重视的今天，为了促进我国工业由大变强的发展，我们必须走新型工业化道路，解决工业化过程中面临的一些突出问题，比如如何进一步增强自主创新能力，如何完善对工业行业的管理，如何在一些核心技术和关键技术上有更大的突破，如何促进高新技术与传统产业的结合，等等。

为配合我国工业领域设备改造，推动我国工业领域与国际间、行业内的交流与发展，加速工业生产及制造技术的进步和设备更新换代的步伐，我们精选了国外有关现代工业技术的部分图书，翻译出版了“国际先进工业技术译丛”。本丛书内容主要涉及新型能源开发与利用、绿色设计与制造、资源节约和环境保护、能效管理等方面。这些图书的原著均由英美等国的知名出版集团出版，汇集了多个国家著名专家学者在工业技术领域的重要研究成果，集中反映了当前工业领域的先进理念、方法和技术，对于解决我国当前工业发展过程中的一些关键问题和突出问题具有较大的参考价值。

现代工业技术呈现开放性、智能化、信息化与网络化的特点，融合了自动化技术、信息技术、现代控制技术、网络技术、先进制造技术、环境保护技术及现代管理理论和方法等诸多学科的先进技术，需要各学科的专家及工程技术人员通力合作，从而实现多学科专业知识与系统的集成，形成现代工业发展的手段和模式。因此，“国际先进工业技术译丛”在选编时，以促进信息化和工业化融合、技术创新和节能减排为原则，紧密结合我国国情，力求突出实用性和先进性，希望有助于解决我国工业技术应用中的一些实际问题，促进我国工业技术及管理模式的变革，提高我国工业企业的技术创新能力。

“国际先进工业技术译丛”的翻译和审定工作主要由国内相关领域的知名专家学者和专业人士承担，力求准确真实地反映原著内容并便于国内读者理解和接受。本丛书致力于“传播国际先进工业生产管理理念，推广工业领域重大技术创新成果”，以便使我国工业领域内的相关人员能够对现代工业方面的知识和技术有更深入和全面的了解，并在我国现代化工业的建设中加以应用。今后我们将继续加强对国际上工业技术领域优秀图书的翻译和出版工作，欢迎专家学者以及广大读者提出宝贵意见和建议。

译者序

可再生能源近年来在我国发展迅速，为了借鉴和参考国外的经验和最新成果，在人民邮电出版社的支持下，译者开展了本书的翻译工作。在翻译过程中，译者本身承担大量的教学、科研和管理的工作，多数是利用节假日的时间完成了本书的翻译工作。可再生能源种类繁多，翻译此书不啻为一个学习的过程。

译者与本书作者观点一致之处在于：大规模发展可再生能源，需要进行顶层设计，长期规划，因此，需要结合我国实际，吸收国内外成功经验，合理布局 and 规划，确保可再生能源行业的可持续健康发展。

本书的第 1、2、7、8 章主要由董长青、王孝强、李继红翻译，盛淑慧（研究生）、王倩（研究生）、赵芳芳（研究生）、蒋景周（研究生）、董智慧（研究生）、张腾（研究生）也参与了翻译工作。第 3、4、5、6 章主要由刘永前、阎晓卿（研究生）、马其燕（研究生）、朱元林（研究生）翻译。

对于译者边学边译过程中导致的错误、疏漏和不畅之处，恳请读者批评、指正和宽宥。

译者

2010 年 10 月 8 日

序 言

你可以根据自己的想法理解当前的气候变化，你可以继续对近年来逐步达成一致的科学结论置之不理（或者否认），你可以彻底迷失在国内外气候变化的复杂政策和政治争议当中。但是，针对气候变化，我们已经讨论了 20 多年，至少有一点是清楚的，那就是：人类未来的发展在很大程度上依赖于可再生能源，取决于对可再生能源的大规模开发利用，以满足我们的能源需求。

当今世界正被能源问题所困扰。国际能源署（International Energy Agency, IEA）总是不断提醒我们：到 2030 年，人类的能源需求将会至少增加一倍，这大部分的需求增长将导致化石燃料消耗的显著增加。另一方面，气候科学家告诉我们：在 2050 年之前，我们至少要减少 60% 的二氧化碳及其他温室气体排放量。我们必须从现在开始着手解决这个问题。

现在，很多人在定义可再生能源的角色时都依然显得很执拗、小心，这让人觉得不可思议。他们对可再生能源的排斥和反对是基于他们“照常”的经济模式（business as usual），他们没有真正地意识到发展可再生能源的长远效益。

其实，遏制气候变化“即将进入战时状态”，我也认为这种比喻是合理的，我们不得不立刻去面对。比如说，如果油价一直保持在每桶 100 美元左右，而二氧化碳每吨的交易价格在未来三四年内会迅速上涨，那么那些认为发展可再生能源是“不经济”的垃圾想法就会消失得无影无踪。

然而，这只是问题的开始。我已经为 CREST* 的学生们授课 10 余年，在此期间，我深深体会到：即使技术本身发展很快，即使政治和经济环境也有巨大变化（至少我认为是这样），而真正的挑战来自于如何把现有的技术应用到供电系统中，与已有的电网或新建的输配设施相适应。在未来几年，将需要大量的创新和大量的投资。

这本具有极其丰富内容的新书，其真正主旨在于：汇集可再生能源的各方面信息和内容，向读者展示一幅清晰、合理的可再生能源蓝图。我们应对能源效率（常常被忽视）、能源安全给予足够的重视，以更好地驱动和驾驭未来的能源经济。

* CREST，英国 Loughborough 大学可再生能源系统技术中心（Centre for Renewable Energy Systems Technology）——译者注。

电力系统中的可再生能源

这是一个复杂且具有挑战性的领域，而本书信息可靠、富含指南式经验，值得强烈推荐。

Jonathon Porritt

Jonathon Porritt 是英国未来论坛 (*Forum for the Future*) www.forumforthefuture.org.uk 网站的创始人和主管，是英国可持续发展委员会 (www.sd-commission.org.uk) 主席，著有《*Capitalism as if the World Matters*》(2007 年修订，平装本，Earthscan 出版，可在未来论坛网站查到)。

前言

减少温室气体排放已在全球范围内达成共识，各国政府都为应对气候变化制定了各种政策。2007 年 1 月 10 日，欧盟委员会宣布了一项由欧洲理事会（European Council）签署通过的能源计划。到 2020 年，欧盟单方面的温室气体排放量要减少 20%，如果全球能达成协议，排放量可减少 30%。让可再生能源的比重在欧盟能源结构中的比例达到 20%，是实现这一目标的关键。

目前，风电是可再生能源利用的主力军。在过去 10 年中世界风电装机容量一直在以平均每年 30% 的累积速度迅速增长。2007 年，新装机 20GW，全球总装机容量达到了 94GW；年投资金额大概为 250 亿欧元，雇佣 20 万名工人，电力供应可以满足 2 500 万个家庭的需要。风电的迅速发展吸引了各大制造公司（如通用电气、西门子、ABB 和壳牌）以及许多电力公司（特别是 E.ON 公司和苏格兰电力公司）的投资。风电在未来 20 年间的前景非常之好。

太阳能发电可以通过直接使用光伏（PV）电池或太阳能热发电（太阳能聚焦、产生蒸汽、驱动传统汽轮机）的形式来实现。在过去的几年中，太阳能光伏发电的成本已经下降了很多。2006 年，光伏发电的装机总值达到了 150 亿欧元，装机容量达到了 2.5GW。预计未来 10 年技术进步及成本降低将大大提升太阳能发电的竞争力。

海洋能源是令人兴奋的新能源，但技术尚未成熟。潮汐坝、潮汐流涡轮机和波能装置都还处于实验研究或商业探索阶段，但预计到 2015 年左右将有极大改善。地热能在一些地热资源丰富的国家（如冰岛）已得到应用，随着科技的发展，应用将更为广泛。最后同样重要的还有生物能源和生物燃料，它们具有化石燃料的许多优点，特别是便于储存，因此得到了欧盟及北美决策者和研究人员的高度关注。

大部分的可再生能源将被转换成电能。由于可再生能源在地理位置上高度分散，受气候影响大，所以不能以传统化石燃料发电的控制方式来控制可再生能源发电。现有的电网主要是用来传输一些大型化石燃料发电厂所发出的电能，这些化石燃料包括煤、天然气或者铀，它们在国际市场上比较易于获取，而且运营控制也较方便。要将大量的可再生能源电能汇入到现有电网中，电网需要在设计及运营方面作出调整，以便更好适应波动大的可再生能源。本书就针对这一重要主题展开讨论。

本书内容源于硕士课程，在英国 Loughborough 大学可再生能源系统技术中心（Centre for Renewable Energy Systems Technology, CREST）已开课 10 余年。本课程总体上是可再生能源

电力系统中的可再生能源

发电及其电网融合的概述性技术教育，选修这门课程的学生通常应该具有物理、工程或环境科学的学士学位。因此，这门课程是为那些在自己的专业领域非常博学而在其他领域仅有一些基础认知的学生设计的。

同样，本书通过最基本的讲解，让没有任何电力系统知识的读者能够理解电力系统是如何集成的，以及是通过何种方式即时满足消费者电力需求的。本书描述了传统能源和可再生能源资源的特点，特别介绍了后者的波动性以及波动性对其利用造成的影响。这些资源可直接转化为电能加以利用，或输出的电能通过调整后并网。本书涵盖了这些内容，并着重强调了功率控制过程中电力电子技术的重要性。电网中的电流必须进行适当调控，本书对新能源集成后的电网电流控制方式进行了讨论。另外本书还详细分析了可再生能源利用的经济性，因为经济性直接决定其市场占有率。最后，本书对可再生能源技术的未来发展和电力系统为适应这些可再生能源技术的转变方式进行了展望。附录部分为电力生产、传输和分配的数学理论知识。

致 谢

除了本书的主要作者之外，本书的完成离不开英国Loughborough大学可再生能源系统技术中心其他工作人员的帮助。特别要感谢Murray Thomson博士，他提供了本书第4章中电力电子部分的有关素材，并撰写了第5章和第6章的大部分内容，他对本书初稿的评论和建议是非常宝贵的。另外，Simon Watson博士提供了第7章的大部分素材。第3章中有关动态需求控制的内容来源于该研究中心J. A. Short的硕士论文。最后还要感谢Graham Sinden博士允许我们引用他近来研究所得的一些图表，部分还源于他未公开发表的博士论文；同时感谢David Milborrow先生允许我们在第7章中引用他的一些图表数据。

我们也感谢Chichester（英国英格兰南部城市）的Wiley公司的工作人员，在书稿准备过程中，他们给予我们很多指导。

最后，我们想把此书献给我们各自的配偶Delphine Freris和Marion Peach，她们牺牲了与家人相聚的空闲时间，以致力于本书的编辑工作。

Leon Freris, David Infield

目 录

第 1 章 能源与电力	1
1.1 世界能源形势	1
1.1.1 历史	1
1.1.2 世界能源消耗	1
1.1.3 有限的能源	2
1.1.4 能源安全和使用的 不均等性	2
1.2 能源使用的环境影响	3
1.2.1 存在的问题	3
1.2.2 科学研究	3
1.2.3 京都议定书	5
1.2.4 斯特恩报告	6
1.2.5 能源高效利用	7
1.2.6 电力行业	8
1.2.7 可能的解决方案及 可持续发展	8
1.3 电力生产	9
1.3.1 能量形式的转化——转化 效率的重要性	9
1.3.2 核电	9
1.3.3 碳捕集与封存	10
1.3.4 可再生能源	11
1.4 电力系统	13
1.4.1 电力系统结构	13
1.4.2 可再生能源集成到 电力系统	14
1.4.3 分布式发电	14
1.4.4 可再生能源的渗透率	15
参考文献	15
第 2 章 常规能源和可再生能源 发电的特点	17
2.1 引言	17
2.2 常规能源：煤、天然气和 核能	17
2.3 水电	18
2.3.1 大型水电	19
2.3.2 小水电	19
2.4 风电	21
2.4.1 风电资源	21
2.4.2 风的波动性	22
2.4.3 风轮机	23
2.4.4 风电的波动性	26
2.5 太阳能光伏发电与太阳能 热发电	27
2.5.1 太阳能资源	27
2.5.2 太阳能发电技术	28
2.5.3 太阳能光伏发电系统	29
2.5.4 太阳能热发电系统	30
2.6 潮汐发电	32
2.6.1 潮汐资源	32
2.6.2 潮汐强化	32
2.6.3 潮汐坝	33
2.6.4 运行策略	33
2.6.5 潮流发电	34
2.7 波力发电	36
2.7.1 波能资源	36
2.7.2 波力发电技术	36
2.7.3 波力发电的波动性	37
2.8 生物质发电	38
2.8.1 生物质资源	38
2.8.2 资源的可持续性	39
2.9 发电特点总结	39
2.10 多能互补	40
参考文献	41

第3章 功率平衡和频率控制	42	3.6.4 光伏发电	65
3.1 引言	42	3.7 频率控制模型	66
3.2 电力负荷	43	3.7.1 背景	66
3.2.1 需求负荷曲线	43	3.7.2 建模实例	67
3.2.2 削峰效应	43	3.8 储能	69
3.2.3 需求侧管理和负荷延迟性	44	3.8.1 简介	69
3.3 电能控制	45	3.8.2 储能装置	69
3.3.1 电能转换链	45	3.8.3 动态需求负荷控制	70
3.3.2 调速器	45	参考文献	71
3.3.3 双机并列运行	46		
3.3.4 多机系统	47	第4章 发电与电力调节	73
3.3.5 稳态条件下的功率—频率关系	48	4.1 可再生能源向电能形式的转换 ..	73
3.4 大系统的动态频率控制	49	4.2 同步发电机	74
3.4.1 负荷平衡	49	4.2.1 结构和运行方式	74
3.4.2 负荷预测	50	4.2.2 旋转磁场	76
3.4.3 频率极限	51	4.2.3 并网时同步发电机的运行	77
3.4.4 发电计划和备用容量	51	4.2.4 同步发电机的等效电路 ..	78
3.4.5 不同时间范围下的频率控制	52	4.2.5 电力传输方程	79
3.4.6 功率平衡与系统可靠性 ..	53	4.2.6 三相方程式	80
3.4.7 容量因数和容量信赖度 ..	54	4.2.7 四象限运行	80
3.5 可再生能源发电对频率控制及供电可靠性的影响	55	4.2.8 负荷角特性: 稳定性	81
3.5.1 简介	55	4.3 变压器	81
3.5.2 能源积聚	55	4.3.1 变压器基础	81
3.5.3 风能的利用价值	58	4.3.2 变压器等效电路	82
3.5.4 对功率平衡的影响	58	4.3.3 变压器的进一步细节	83
3.5.5 可靠性的影响	60	4.4 异步发电机	84
3.5.6 弃电/限电	60	4.4.1 结构和属性	84
3.5.7 渗透率增加引起的成本增加	61	4.4.2 感应发电机的等效电路 ..	85
3.5.8 不同的可再生能源的结合	61	4.4.3 感应发电机的效率	87
3.5.9 电力系统之间的差异	62	4.4.4 感应发电机的速度转矩特性	87
3.5.10 不可调度电源的渗透限制	62	4.4.5 感应发电机无功功率	90
3.6 可再生能源频率响应装置	64	4.4.6 异步和同步发电机的比较	90
3.6.1 风力发电	64	4.5 电力电子	91
3.6.2 生物燃料	65	4.5.1 简介	91
3.6.3 水电	65	4.5.2 电力半导体器件	92
		4.5.3 二极管桥整流器	93
		4.5.4 谐波	94
		4.5.5 晶闸管桥转换器	95
		4.5.6 晶体管桥	96

4.5.7 转换器内部控制系统	100	6.1.1 简介	133
4.5.8 直流—直流变换器	100	6.1.2 公共耦合点 (PCC)	134
4.6 可再生能源中的应用	101	6.1.3 连接电压	134
4.6.1 应用于光伏 (PV) 发电系统	101	6.2 电压影响	135
4.6.2 风电中的应用	103	6.2.1 稳态电压升高	135
参考文献	110	6.2.2 自动电压控制——变压器分接头	135
第5章 电力系统分析	112	6.2.3 可再生能源发电的有功和无功功率	136
5.1 引言	112	6.2.4 潮流实例	136
5.2 输电系统	112	6.3 热稳定极限	139
5.2.1 单相表示法	114	6.3.1 架空输电线和电缆	139
5.2.2 输电和配电系统	114	6.3.2 变压器	139
5.2.3 电网实例	115	6.4 嵌入式电源的一些问题	140
5.3 电压控制	116	6.4.1 电压闪变、电压阶跃和电压跌落	140
5.4 无耦合线路的潮流	117	6.4.2 谐波和畸变	140
5.4.1 架空线路和电缆的特性	117	6.4.3 相电压不平衡	141
5.4.2 单相等值电路	117	6.4.4 电能质量	141
5.4.3 电压损耗计算	118	6.4.5 电网结构强化	141
5.4.4 简化与结论	119	6.4.6 网络损耗	142
5.5 无功管理	120	6.4.7 故障等级升高	142
5.6 潮流与电力系统仿真	122	6.5 孤岛效应	143
5.6.1 潮流计算的功能	122	6.5.1 简介	143
5.6.2 特例分析	123	6.5.2 旋转发电机的解列保护	143
5.6.3 网络数据	124	6.5.3 逆变器的解列保护	144
5.6.4 发电量/负荷数据	124	6.6 故障跨越	144
5.6.5 潮流计算过程	126	6.7 发电机和变换器特性	145
5.6.6 潮流计算结果	127	参考文献	146
5.6.7 不平衡潮流	127		
5.7 故障与保护	127	第7章 电力系统经济学与电力市场	147
5.7.1 短路故障电流	128	7.1 引言	147
5.7.2 对称三相短路电流	129	7.2 发电成本	147
5.7.3 一般短路电流	129	7.2.1 可再生能源和常规发电厂的资金投入和运营成本	147
5.7.4 短路容量	129	7.2.2 发电总成本	148
5.7.5 戴维南等效电路	130	7.3 电力系统的经济最优化的	150
5.8 电网动态仿真	130	7.3.1 电力系统发电机的种类	150
5.9 可靠性分析	131	7.3.2 最佳经济性调度	151
参考文献	131	7.3.3 等增量成本调度	152
第6章 电力系统中的可再生能源发电	133		
6.1 分布式发电	133		

7.3.4	带若干机组和发电限额的最佳经济性调度	153
7.3.5	公平竞争环境下的成本	153
7.4	外部成本	154
7.4.1	简介	154
7.4.2	外部成本的类型	154
7.4.3	京都议定书	155
7.4.4	污染成本	156
7.4.5	污染定价	157
7.5	分布式发电的影响	158
7.5.1	不同电网节点的能源价值	158
7.5.2	现金流分析	159
7.5.3	分布式发电的价值——区域性和局部性问题	160
7.5.4	发电容量可信度	161
7.5.5	小结	162
7.6	可再生能源的支持机制	162
7.6.1	简介	162
7.6.2	法律法规	163
7.6.3	配额体制	163
7.6.4	碳税	164
7.7	电力贸易	164
7.7.1	简介	164
7.7.2	英国电力供应产业 (ESI)	165
7.7.3	其他国家和地区的竞争性批发市场	169
7.7.4	可再生能源在竞争性批发市场中的价值	171
	参考文献	174

第 8 章 可持续电力供应系统的未来

8.1	简介	176
8.2	风电的未来	177
8.2.1	大型风轮机	177
8.2.2	海上风电的发展	178
8.2.3	风电建筑一体化	181
8.3	太阳能的未来	182
8.3.1	太阳能光伏发电	183

8.3.2	太阳能热发电	183
8.4	生物质发电的未来	184
8.5	水电和海洋发电的未来	184
8.6	分布式发电及未来电网	185
8.6.1	配网的发展	185
8.6.2	主动电网	186
8.6.3	分布式发电的相关问题	186
8.6.4	解决技术难题的方法	187
8.7	结论	189
	参考文献	189

附录 A 电力工程的基本概念

A.1	介绍	191
A.2	发电机和电力用户	191
A.3	为什么选用交流电	192
A.4	交流电的波形	192
A.5	电路元件对交流电的响应	193
A.5.1	电阻	193
A.5.2	电感	194
A.5.3	电容	195
A.6	相量	196
A.7	相量求和运算	197
A.8	矩形表示法	198
A.9	电抗与阻抗	199
A.9.1	电阻	199
A.9.2	电感	199
A.9.3	电容	199
A.9.4	全阻抗	200
A.10	交流电路中的功率	201
A.11	无功功率	202
A.12	复功率	202
A.13	有功和无功功率守恒	204
A.14	无功潮流的影响——功率因数校正	204
A.15	三相交流电	205
A.16	戴维南等效电路	207
	参考文献	208

第 1 章

能源与电力

1.1 世界能源形势

1.1.1 历史

前工业时代的能源需求主要靠人力或役用动物来满足，还在一定程度上利用木材燃烧来取暖、烹饪和熔炼金属。煤的发现及使用技术的进步推动了工业革命。随后，蒸汽机、机械化生产及改进的交通工具都直接以煤作为燃料。在第一次和第二次世界大战之间，石油的开发和使用日益兴起，石油成了第二次世界大战的关键物资保障。战后工业的发展和繁荣以及私家车的大量使用都逐步由石油提供动力。最近时期经济的增长也在很大程度上依赖于天然气的开发与使用。

绝大部分的煤和天然气都被用来发电，一个世纪以来，电能已广泛普及。作为一种优质能源，电具有灵活性和易分配性。随着电子产品、相关工业的发展以及消费群体的增加，世界范围内的电力需求也在逐步增长。

1.1.2 世界能源消耗

目前全球每年消耗的一次能源（primary energy）^①大约是 500EJ^②，相当于 1.4×10^{17} Wh 或 140 000TWh，除以年小时数，可知世界一次能源消耗速率为 16TW/h 或 16 000GW/h。图 1.1 是 2006 年各种能源所占世界一次能源的比例（数据来自 IEA）。

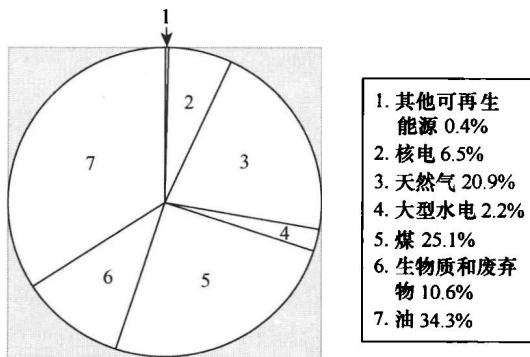


图 1.1 2006 年世界一次能源结构

① 一次能源：在转化成其他形式能源（如电能）之前的总能源。

② EJ：能量的国际制单位是焦耳，记作 J，焦耳的倍数有 KJ、MJ、GJ、TJ (10^{12} J) 和 EJ (10^{18} J)；功率的单位是瓦特（W），表示的是做功的速率（J/s），电能通常用 Wh 或 kWh 来衡量：1Wh=3 600J。

全球石油和天然气的需求逐年急剧增长。2006 年全球能源消耗的增长量超过英国能源年消耗量的两倍，创下了年增长量的最高记录。IEA 预测，2030 年世界能源需求量会在 2006 年的基础上再增加 60%。

1.1.3 有限的能源

很难准确判定化石燃料的最终可用年限。根据大型石油和天然气公司的报道，仍有大量新的石油资源正被开发或有待于勘探。按现有的需求量保守估计，传统的石油资源还可以满足 30 年的需求。最新数据表明天然气储量约比石油高 50%，能满足 60 年左右的需求，而且天然气的开采利用强度低于石油，可能还会发现新的气田。非传统的碳氢化合物能源，如重油、沥青、油页岩、气页岩和煤层气，全球储量约是传统石油和天然气能源的 3 倍。由于油、气田逐步趋于枯竭，化石燃料价格不断升高，非常规的碳氢化合物能源虽然提炼成本高，但也具备开发的潜力。对与化石燃料紧密相关的经济体而言，值得庆幸的是，煤的储量比石油和天然气高许多，供应能力还能持续几百年之久。煤的不足之处在于其含碳量过高，这点将在后续篇章中作进一步讨论。

目前很多争议都集中在何时会出现石油和天然气的峰值时期。所谓峰值时期是指在资源耗尽之前，石油和天然气的开采速率从最高点开始下降。这个时期非常重要，因为它意味着不能完全满足需求量，从而价格显著升高。2003 年，英国北海石油和天然气开采速率达到峰值以后，储量开始大幅下降。权衡石油工业领域的巨大投资与取得的经济效益，如果投资者不能对资源保持信心，其结果会让人震惊的。

核裂变的燃料并不是用之不尽的，快中子堆在近几十年来获得了发展，延长了燃料的利用时间。不过，快中子堆会产生钚这种核武器原料，引发的政治风险制约了它的发展，使得一些在操作上存在问题的原型堆到现在已经不复存在了。按现有常规裂变堆的使用量估计，铀矿储量可以使用 50 年左右，当然这些估计是依据于各种假设的。如果能承受极高的矿石价格，那么一些较低等级的铀矿石也可作为备用储量。英国贸易工业部（DTI）参考经济合作与发展组织/美国教育协会（OECD/NEA）的红皮书，根据 2004 年的开采水平，已探明的铀储量（130 美元/千克）可以持续使用约 85 年（见参考文献[1]和[2]）。

1.1.4 能源安全和使用的不均等性

能源安全是世界范围内备受关注的问题，全球大部分油田都分布于中东和其他一些政治不稳定国家，西方（Western）和这些国家的冲突正加剧人们对能源能否可靠供应的担忧。欧洲各国开始意识到他们过度地依赖天然气这种单一的资源。美国是世界上最大的能源消耗国，并且严重依赖于进口石油。经济的增长与廉价的燃料有着内在的联系，所以难以想象美国或其他国家的政政策性地要求民众大量降低燃料消耗并改变生活习惯。

另一个令人不安的方面是能源消耗在富国和穷国间的差距：全球最富的 10 亿人消耗了 50% 以上的世界能源，而全球最穷的 10 亿人只消耗 4% 左右，这是关系紧张的一个缘由。发达国家在能源使用方面的浪费受到了谴责，以工业发展的高能耗为借口是极其荒谬的。例如，日本是世界上第二大经济贸易国，但人均能耗只有美国的一半。