



可持续世界的能源

从石油时代到太阳能将来

[意] 尼克拉·艾莫里 (Nicola Armaroli) 著
文思卓·巴尔扎尼 (Vincenzo Balzani)

陈军 李岱昕 译

Energy for a Sustainable World
From the Oil Age to a Sun-Powered Future 



化学工业出版社

可持续世界的能源

从石油时代到太阳能将来

[意] 尼克拉·艾莫里 (Nicola Armaroli) 著
文思卓·巴尔扎尼 (Vincenzo Balzani)

陈军 李岱昕 译

Energy for a Sustainable World
From the Oil Age to a Sun-Powered Future



化学工业出版社

本书在综合考虑环境、经济和社会因素的影响下,从广阔的科学视角调研了能源问题。书中阐明了一些基本概念,提供了能源发展的历史概要,评估了目前基于化石燃料的可持续发展的能源体系,列出了目前和今后能源的可能选择,给出了一个关于核能、太阳能光伏光热、太阳能燃料、风能发电、海洋能源及其他可再生能源的全面概述,强调了日益增长的电力的重要性和基于氢的长远经济前景。

本书可作为从事能源、化学、化工、材料、动力、环境等专业人员的学习和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

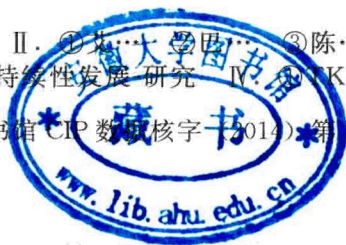
可持续世界的能源:从石油时代到太阳能将来/[意]艾莫里(Armaroli, N.),[意]巴尔扎尼(Balzani, V.)著;陈军,李岱昕译. —北京:化学工业出版社,2014.6

书名原文:Energy for a Sustainable World: From the Oil Age to a Sun-Powered Future

ISBN 978-7-122-20430-1

I. ①可… II. ①艾… ②陈… ④李…
III. ①能源-可持续发展-研究 IV. ①TK01

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第077287号



Energy for a Sustainable World/by Nicoli Armaroli, Vincenzo Balzani

ISBN 978-3-527-32540-5

Copyright © 2011 by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim. All rights reserved.
Authorized translation from the English language edition published by WILEY-VCH.

本书中文简体字版由 WILEY-VCH 授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分,违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2012-0660

责任编辑:成荣霞

文字编辑:王琪

责任校对:宋玮

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市胜利装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张19 字数360千字 2014年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:88.00元

版权所有 违者必究

译者前言

能源是可以直接或经转换向人类提供所需的光、热、动力等任一形式能量的载能体资源。能源是人类生存和发展的重要物质基础，是从事各种经济活动的原动力，也是社会经济发展水平的重要标志。然而，人口的迅猛增长和矿物燃料的大规模开采利用，一方面导致化石能源的枯竭，另一方面还会对地球环境造成严重污染破坏。解决化石能源的诸多遗留问题、向生活在地球上的人类提供安全、清洁、可持续的能源是 21 世纪科学技术领域所面临的最重大挑战。因此，从广阔的科学视角，更好更多地了解能源发展历史、规律、动向及趋势是十分必要的。

2012 年底，我受化学工业出版社的委托，负责《可持续世界的能源》（“Energy for a Sustainable World”）的翻译工作。本书原版为威力出版社出版（2011 年），意大利博洛尼亚大学尼克拉·艾莫里（Nicola Armaroli）教授和文思卓·巴尔扎尼（Vincenzo Balzani）教授所著。这两位教授是国际著名的能源化学专家，在书中论述了从石油时代到太阳能将来，提供了能源发展的历史，评估了目前基于化石燃料的不可可持续发展的能源体系，概述了目前和今后新能源与可再生能源（如核能、太阳能光伏光热与燃料、风能发电、海洋能源等）的可能选择。

迄今为止，人类利用能源的历史经历了三个重要时期：以薪柴、木炭等植物燃料为主的“植物能源时代”，以煤炭为主的“煤炭时代”和以石油、天然气为主的“石油时代”。目前世界能源的生产及消费又在向以核能、太阳能、风能为主体的多元化的新能源时期过渡，并对日益增长的电力和基于氢的能源载体有重要依赖。从人类利用能源的历史中可以清楚地看到，每一种能源的发现和利用，都把人类支配自然的能力提高到一个新的水平。能源科学技术的每一次重大突破，也都带来世界性的产业革命和经济飞跃。

在过去的几十年里，地球已经发生了巨大的改变，我们需要全新的思路和举措来理解和应对由此产生的一系列问题。能源危机绝不仅仅是摆在人类面前的一项艰巨挑战，更是一个前所未有的重大机遇。它为人类创造了一个关爱我们共同生活的地球家园的独特机会。在追求生态和社会可持续发展的过程中，人人必须清醒地意识到，能源消耗水平应当符合实际需求，过度透支对于创建美好世界无益。地球的命运掌握在我们的手中，人人必须负责，在科技与政策的帮助下，立刻采取措施，大力推进清洁利用、资源保护、废物减排、改善民生、和平发展等，

为建立起一个更加平等、和谐、可持续的社会和生态体系而努力。

本书可用于从事能源、化学、化工、材料、动力、环境等专业的人员学习和参考。

本书在翻译过程中，力图反映原著的原貌，但由于原著个别内容与观点有待商榷，略作调整或删除，加之水平有限，错误、疏漏和不当之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

陈军

2014 年 7 月于南开大学
天津化学化工协同创新中心

前言

Foreword

“人无远虑，必有近忧。”——古谚语

通过数十年的观测研究，我们充分认识到，人类实际上是生存在一艘不能着陆、无处停泊、无法维修补给的地球号太空船上。我们孤独地在宇宙中航行，赖以生存的只有蕴藏于地球表面和地壳内部的资源，以及来自太阳的能量。地球是一个庞大且复杂的体系，人类活动会影响甚至破坏地球的生物化学循环。事实上，这颗 45 亿岁高龄的星球已经进入了一个以人类生态足迹大幅扩张为标志的新纪元——人类世。

能量存在于所有物品之中，它是人类开展一切活动的基础。相比于我们的祖先以及生活在贫困线以下的数十亿人群，今天发达国家人民之所以能够享受到舒适的生活，储量丰富、价格低廉、来源稳定的化石燃料是背后最根本的原因。众所周知，矿物能源不但不会持续存在，而且在使用时还会对地球环境造成严重破坏。不仅如此，化石燃料也是人类社会矛盾冲突和阶层分化的间接推手：发达国家 10% 的人口享用了当今世界近乎一半的一次能源供给，而富裕程度排名最后 25% 的人群却只消费了全球不到 3% 的能源。

今天人类对于能源的渴求已经愈发强烈，由此也引发了一系列复杂的问题。一个国家，不论因为何种原因发生断电事故，最好的解决方法无疑都是新建、扩建发电站。我们不禁要问，这种方案是明智的吗？一方面，在一些经济学家看来，社会福利水平与能源消耗量呈正相关关系；由于能源价格与原材料成本直接挂钩，任何社会问题都可以随着经济增长而逐步化解。另一方面，科学家们却坚信，技术进步能够解决能源问题以及随技术更新而出现的各种新问题。

本书旨在向读者说明这样一个问题：我们正生活在一个脆弱的世界中，这个世界的脆弱程度取决于人类应对能源问题的方式。根据斯蒂芬·杰伊·古尔德的研究，地球的脆弱程度由自然界的内部规律决定，这种规律也被其称为“间断平衡理论”（Gould S J. Science, 1998, 279: 812）：“人类社会的悲剧、科技滥用引发的灾难，本质上都源于自然规律的严重失衡。我们必须付出持续、艰辛的努力才能到达人类文明的顶峰，途中任何微小的失误都有可能功亏一篑。一场大火曾经使亚历山大图书馆中积攒千年的知识财富变为乌有，也曾经将有数百年历史的伦敦城夷为平地。”根据这一原理，灾难的破坏力度由它具体发生的地点和时间决

定。暂且不考虑杀伤性核武器，目前地球号太空船所面临的巨大威胁来自自然资源的过度消耗、废物的大量产生和积累，以及社会贫富差距的日益扩大。能源问题对于脆弱地球的影响直接而深刻，包括食物、水、健康、财富、气候、供热、照明、制冷、运输、通信、战争在内，人类绝大多数的社会问题都与能源有着千丝万缕的联系。解决化石燃料时代的诸多遗留问题需要全世界协同努力：如何向地球号太空船的所有乘客提供安全、清洁、可持续的能源将是 21 世纪科学技术领域所面临的最重大挑战。

幸运的是，能源危机绝不仅仅是摆在人类面前的一项艰巨挑战，更是一个前所未有的重大机遇。它为人类创造了一个关爱地球家园的独特机会。那些早已成为公理的认知——科技发展能够解决一切问题、随着时间推移人类文明会不断进步，此时正在遭受巨大的挑战。我们必须立刻采取负责任的补救措施：明天或许已经太迟。在追求生态和社会可持续发展的过程中，每个个体都必须清醒地意识到，能源消耗水平应当符合实际需求，过度透支对于创建美好世界无益。地球的命运掌握在我们的手中：在科技的帮助下，我们是否有能力建立起一个更加平等、和谐、可持续的社会和生态体系？

一句意大利古谚语说道：乐观主义者与悲观主义者的唯一不同在于后者掌握更多的信息。目光短浅的乐观主义者不会将人类带向发展的正途。建立在充分了解实际状况基础上的悲观主义才是解决问题的正确出发点：只有正视问题并且掌握尽可能多的细节才能提出有效的解决方案。让民众知晓当前地球的危险状况已是当务之急。

寻找能源问题的解决之道意味着机遇与困难并存。如果能够当机立断，大力推进资源保护、废物减排、改善民生、和平发展等政策措施，我们或许还有时间重塑一个全新的人类世。为了达到这一具有划时代意义的目标，我们需要教育民众，同时任用有远见、有大局观的领导。如何应对能源危机将最终决定我们这一代人的命运。

致谢

任何书籍的出版都绝非一人之功。为了更加深入地理解、分析和阐述问题，本书在写作过程中吸收了前人数千部著作、论文的精髓。在此我们对所有作者及其优异的工作表示感谢，若不慎有所遗漏，敬请谅解。

值本书出版之际，我要对我们研究团队的所有工作人员和博士生们表示感谢，感谢他们在本书写作过程中的参与支持和建言献策。特别需要提及的包括 Gianluca Accorsi、Giacomo Bergamini、Francesco Bari-gelletti、Paola Ceroni、Sandra Monti John Mohanraj、Margherita Venturi 等。本书写作完成后，曾就重点章节邀请相关领域的专家学者进行过广泛讨论，相关提问和建议对于提升本书的学术水平大有帮助。

本书的封面图案由 Fausto Puntoriero 绘制，书中的插图和表格由 Filippo Monti 整理，相关文献由 Andrea Listorti 和 Abdelhalim Belbakra 搜集查阅，出版工作由 Wiley-VCH 出版社完成。在此对他们高水平、专业化的工作表示诚挚的谢意。

最后，我们要对家人们表示感谢，感谢写作过程中我们的夫人们 Claudia 和 Carla 给予的无微不至的关爱、鼓励和容忍。

Nicola Armaroli, Vincenzo Balzani

2010 年 8 月

于博洛尼亚

注 释

单位词头

英文名	名称	符号	量级
exa	艾	E	10^{18}
peta	拍	P	10^{15}
tera	太	T	10^{12}
giga	吉	G	10^9
mega	兆	M	10^6
kilo	千	k	10^3
milli	毫	m	10^{-3}
micro	微	μ	10^{-6}
nano	纳	n	10^{-9}
pico	皮	p	10^{-12}
femto	飞	f	10^{-15}
atto	阿	a	10^{-18}

缩写

bbI	桶石油
Dwt	载重吨
toe	吨油当量
W_{th}	热瓦
W_p	瓦峰值
W_{el}	电瓦

缩略词

AC	Alternating Current	交流电
AFC	Alkaline Fuel Cell	碱性燃料电池
ASPO	Association for the Study of Peak Oil and Gas	石油与天然气峰值研究协会
ASTM	American Society for Testing and Materials	美国检测与材料协会
BHJ	Bulk Heterojunction	本体异质结
BP	British Petroleum	英国石油

续表

bpd	barrel per day	桶/天
bpy	barrel per year	桶/年
BTU	British Thermal Units	英(制)热单位
CAES	Compressed Air Energy Storage	压缩空气储能
CBM	Coalbed Methane	煤层气
CCS	Carbon Capture and Sequestration	碳捕获和碳封存
CFC	Chlorofluorocarbons	含氯氟烃
CHP	Combined Heat and Power	热电联产
CNG	Compressed Natural Gas	压缩天然气
CPV	Concentrated Photovoltaics	聚光光伏发电
CR	Concentration Ratio	聚光率
CSP	Concentrating Solar Power	聚光式太阳能光热发电
DC	Direct Current	直流电
DME	Dimethyl Ether	二甲醚
DOD	US Department of Defense	美国国防部
DOE	US Department of Energy	美国能源部
DSSC	Dye-Sensitized Solar Cell	染料敏化太阳能电池
DU	Depleted Uranium	贫铀
EEA	European Environment Agency	欧洲环境署
EES	Earth Energy Systems	地能系统
EI	Energy Intensity	能耗强度
EIA	US Energy Information Administration	美国能源信息署
ENI	Ente Nazionale Idrocarburi (Italy)	国家碳化氢公司(意大利)
EPA	US Environmental Protection Agency	美国环境保护署
EROI	Energy Return on Investment	能源投资收益率
EU	European Union	欧盟
EUROSTAT	Statistical Office of the European Communities	欧共体统计署
EV	Electric Vehicle	电动汽车
FAME	Fatty Acid Methyl Ester	脂肪酸甲酯
FIT	Feed-in Tariffs	上网电价补贴
GDP	Gross Domestic Product	国内生产总值
GHG	Greenhouse Gas	温室气体

续表

GWP	Global Warming Potential	全球变暖趋势
HFC	Hydrofluorocarbon	氢氟烃
IAEA	International Atomic Energy Agency	国际原子能机构
ICE	Internal Combustion Engine	内燃机
ICF	Inertial Confinement Approach	惯性约束方法
ICT	Information and Communication Technology	信息和通信技术
IEA	International Energy Agency	国际能源机构
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle	集成气化组合循环技术
IPCC	International Panel on Climate Change	联合国政府间气候变化专门委员会
IR	Infrared (radiation)	红外光
KERS	Kinetic Energy Recovery Systems	动能回收系统
LCA	Life-Cycle Analysis	生命周期分析
LNG	Liquefied Natural Gas	液化天然气
LPG	Liquid Petroleum Gas	液化石油气
NASA	US National Aeronautics and Space Administration	美国国家航空航天局
NEA	Nuclear Energy Agency	经济合作与发展组织核能机构
NGO	Non-Governmental Organization	非政府组织
NIR	Near-Infrared (radiation)	近红外光
NPT	Non-Proliferation Treaty	不扩散核武器条约
NREL	US National Renewable Energy Laboratory	美国国家可再生能源实验室
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development	经济合作与发展组织
OSC	Organic Solar Cell	有机太阳能电池
OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion	海洋温差发电
OWC	Oscillating Water Column	振荡水柱
PCET	Proton-Coupled Electron Transfer	质子耦合电子转移
PEM	Proton Exchange Membrane	质子交换膜
PM	Particulate Matter	颗粒物
PS II	Photosystem II	光合系统 II
PV	Photovoltaic	光伏
QUAD	quadrillion BTU (10^{15} BTU)	10^{15} 英制热单位
RC	Reaction Center	反应中心

续表

RMFC	Reformed Methanol Fuel Cell	甲醇重整制氢燃料电池
SEGS	Solar Energy Generating System	太阳能发电系统
SHP	Small Hydropower	小型水电项目
SI	International System of Units	国际单位制
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage	超导磁储能系统
SUV	Sport Utility Vehicle	运动型多用途车
TPES	Total Primary Energy Supply	一次能源总供给量
UCG	Underground Coal Gasification	地下煤炭气化
UCTE	Union for the Coordination of the Transmission of Electricity	电力传输协调联盟
UNEP	United Nations Environment Programme	联合国环境规划署
URFC	Unitized Regenerative Fuel Cell	再生型燃料电池
USGS	US Geological Survey	美国地质调查局
UV	Ultraviolet (radiation)	紫外光
Vis	Visible (radiation)	可见光
VOC	Volatile Organic Compound	挥发性有机物
WEC	World Energy Council	世界能源委员会
WHO	World Health Organization	世界卫生组织
WNA	World Nuclear Association	世界核能协会
WW II	World War II	第二次世界大战

目录

CONTENTS

第一部分 地球号太空船

第1章 能源挑战 /2

- 1.1 我们的地球号太空船 /2
- 1.2 不平等世界中的不可持续增长 /4
 - 1.2.1 人口增长与承载能力 /4
 - 1.2.2 经济增长与生态恶化 /4
 - 1.2.3 不平衡性 /5
- 1.3 能源和气候危机 /6
- 1.4 应对挑战 /6
- 1.5 无法回避的问题 /7

第2章 概念和误解 /9

- 2.1 能量的定义 /9
- 2.2 基本定律 /10
- 2.3 一次能源转化为可用能源 /10
- 2.4 消耗能量以获取能源: EROI /11
- 2.5 内能 /12
- 2.6 能量单位与转换 /13
- 2.7 巨大的能量和电力需求 /14

- 2.8 一些能量关键参数 /15
- 2.9 能源普及与能源文盲 /16
- 2.10 关键数字: 唤醒能源意识的算盘 /17

第3章 能源的历史 /21

- 3.1 简史 /21
- 3.2 畜力 /22
- 3.3 人类奴隶和能源奴隶 /23
- 3.4 水车和风车 /24
- 3.5 从木柴到煤炭 /25
- 3.6 蒸汽机 /26
- 3.7 机动车 /27
- 3.8 飞机 /27
 - 3.8.1 传统发动机 /27
 - 3.8.2 喷气式引擎 /28
- 3.9 电力 /29
 - 3.9.1 早期发展 /29
 - 3.9.2 信息和通信技术 /29

第二部分 化石燃料

第4章 石油 /34

- 4.1 什么是石油 /34
- 4.2 石油的历史、勘探、开采和产量 /35
 - 4.2.1 历史 /35
 - 4.2.2 勘探 /35
 - 4.2.3 开采 /36

- 4.2.4 产量 /37
- 4.3 石油运输 /39
 - 4.3.1 管线运输 /39
 - 4.3.2 油轮运输 /40
- 4.4 石油提炼 /41
- 4.5 石油储存 /42

- 4.6 非常规石油 /42
- 4.7 石油化工产品 /44
- 4.8 石油燃料 /45
 - 4.8.1 世界版图 /45
 - 4.8.2 美国及其他发达国家 /46
 - 4.8.3 中国和印度 /46
- 4.9 美国对石油的依赖 /47
- 4.10 石油价格 /51
- 4.11 石油峰值和储备 /52
 - 4.11.1 非可再生资源 /52
 - 4.11.2 石油储量 /53
 - 4.11.3 石油峰值 /53

第5章 天然气 /56

- 5.1 什么是天然气, 天然气来自何处 /56
- 5.2 天然气性质和定义 /56
- 5.3 天然气开发简史 /57
- 5.4 天然气的生产、使用和储存 /58
- 5.5 液化天然气 /60
- 5.6 天然气加工 /61
- 5.7 运输、储存和分配 /62
 - 5.7.1 运输 /62
 - 5.7.2 储存 /64
 - 5.7.3 配送 /64
- 5.8 天然气用户: 能源和原料 /64
 - 5.8.1 能源应用 /64
 - 5.8.2 天然气作原料 /65
- 5.9 非常规天然气 /67

第6章 煤炭 /69

- 6.1 煤炭是什么 /69
- 6.2 煤炭开采 /70
- 6.3 煤炭的运输与工业应用 /71
- 6.4 煤炭气化 /71
- 6.5 煤炭的生产、消费和储存 /72
- 6.6 碳捕获和碳封存 /73
- 6.7 整体煤气化联合循环技术 /76

第7章 化石遗产 /78

- 7.1 能源的阴暗面 /78

- 7.1.1 不平等性和外部成本 /78
- 7.1.2 货币化成本 /78
- 7.1.3 间接影响 /79
- 7.2 矿物燃料燃烧对碳循环的改变 /79
 - 7.2.1 碳的储存与流动 /79
 - 7.2.2 CO₂浓度的测量 /80
 - 7.2.3 温室效应 /81
- 7.3 人为因素导致的气候变化 /82
 - 7.3.1 人类对气候变化的认识过程 /82
 - 7.3.2 冰川消融 /83
 - 7.3.3 洋流干扰 /83
 - 7.3.4 海洋酸化 /84
 - 7.3.5 冻土融化 /85
 - 7.3.6 气候变化对生态系统的影响 /85
- 7.4 空气污染与全球变暖 /86
 - 7.4.1 烟尘和雾霾 /86
 - 7.4.2 气溶胶与黑碳 /86
 - 7.4.3 臭氧、臭氧层耗蚀物质和 N₂O /87
 - 7.4.4 复杂的状况 /87
- 7.5 应对之策 /87
- 7.6 限制 CO₂ /89
 - 7.6.1 监管、限制温室气体排放 /89
 - 7.6.2 CO₂浓度和温度 /91
- 7.7 空气污染和人类健康 /92
 - 7.7.1 复杂的大气成分 /92
 - 7.7.2 NO_x /92
 - 7.7.3 臭氧 /93
 - 7.7.4 悬浮颗粒物 /93
 - 7.7.5 一氧化碳 /94
 - 7.7.6 二氧化硫和酸雨 /94
 - 7.7.7 重金属 /95
- 7.8 陆地和水质的退化 /95
 - 7.8.1 原油泄漏 /96
 - 7.8.2 燃煤残渣 /97
- 7.9 然后又能怎样 /98

第三部分 核能

第 8 章 核能 /100

8.1 核裂变与核聚变 /100

8.1.1 放射性、质量和能量 /100

8.1.2 物质的结构 /101

8.1.3 核裂变 /102

8.1.4 链式核裂变反应 /103

8.1.5 核聚变 /103

8.2 核裂变的能量 /104

8.2.1 过去和现在 /104

8.2.2 核燃料 /105

8.2.3 铀资源供给 /106

8.2.4 核反应技术 /108

8.2.5 成本和建设工期 /109

8.2.6 核扩散 /110

8.2.7 安全与防护 /111

8.2.8 核废料的处置 /112

8.2.9 退役和拆除 /113

8.2.10 其他限制因素 /114

8.2.11 愿景 /115

8.2.12 核工业复兴 /116

8.3 核聚变民用化 /118

8.3.1 难点 /118

8.3.2 磁约束方法 /118

8.3.3 惯性约束方法 /119

8.3.4 一厢情愿 /119

第四部分 可再生能源

第 9 章 太阳能基础 /124

9.1 太阳光的起源 /124

9.2 太阳辐射和衰减 /126

9.3 储量、分布、重要性 /127

9.4 太阳能的缺陷：分散性和间歇性 /128

9.5 太阳能的转化：热、燃料和电 /129

第 10 章 太阳能光热和光电利用 /131

10.1 被动式太阳能建筑 /131

10.2 转换：分布式太阳能技术 /132

10.2.1 太阳能热水器 /132

10.2.1.1 集热器 /132

10.2.1.2 水管理 /133

10.2.1.3 日照量 /133

10.2.2 太阳能热水器的发展现状和趋势 /133

10.2.3 地能系统 /135

10.2.4 太阳能热电技术 /136

10.3 太阳能光热转换：太阳能流的

聚集 /138

10.3.1 聚光式太阳能光热发电技术 /138

10.3.2 槽式抛物面太阳能热发电系统 /139

10.3.3 塔式太阳能热发电系统 /140

10.3.4 碟式斯特林太阳能热发电系统 /141

10.3.5 太阳能塔热气流发电系统 /142

10.3.6 太阳能光热发电系统的成本和碳足迹 /143

10.3.7 太阳能热化学转换 /143

10.4 光伏起源和发展 /145

10.5 无机光伏材料：关键原理 /146

10.6 硅太阳能电池 /148

10.6.1 多晶硅和单晶硅太阳能电池的加工 /148

10.6.2 材料要求、循环寿命、成本 /149

10.6.3 非晶硅薄膜太阳能电池 /150

10.7 薄膜太阳能电池 /150

- 10.8 有机太阳能电池 /152
- 10.9 太阳能聚光光伏发电及其他前沿技术 /154
- 10.10 光伏产业：全球化布局和市场发展趋势 /155
- 10.11 太阳能：可再生、易获取 /156

第 11 章 太阳能燃料 /158

- 11.1 引言 /158
- 11.2 天然的光合作用 /158
 - 11.2.1 一个复杂的过程 /158
 - 11.2.2 天然捕光系统 /159
 - 11.2.3 天然的反应中心 /160
 - 11.2.4 光合效率 /162
- 11.3 生物质和生物燃料 /162
 - 11.3.1 生物质 /162
 - 11.3.2 生物燃料 /163
 - 11.3.3 第二代生物燃料 /166
 - 11.3.4 生物燃料的前景 /167
- 11.4 未来交通运输业的燃料选择 /167
- 11.5 人工光合作用 /168
 - 11.5.1 太阳能的需求 /168
 - 11.5.2 选择正确的光反应形式 /170
 - 11.5.3 选择正确的化学基底 /171
 - 11.5.4 人工光合系统的组成 /172
 - 11.5.5 人工光捕获系统与反应中心的结合 /173
 - 11.5.6 多电子氧化还原反应所存在的

问题 /174

- 11.5.7 半导体催化光解水反应 /175
- 11.6 染料敏化太阳能电池 /176
- 11.7 太阳能燃料所遇到的挑战 /177

第 12 章 其他可再生能源 /179

- 12.1 水电能源 /179
 - 12.1.1 水电的起源 /179
 - 12.1.2 发展潜力和实际应用状况 /180
 - 12.1.3 优势、劣势和环境影响 /181
 - 12.1.4 水电的未来 /181
- 12.2 风能 /182
 - 12.2.1 发展史概述 /182
 - 12.2.2 风电技术 /182
 - 12.2.3 风电的巨大发展潜力 /184
 - 12.2.4 发展现状和未来趋势 /185
 - 12.2.5 环境影响 /187
 - 12.2.6 风电成本 /188
- 12.3 海洋能 /188
 - 12.3.1 潮汐能 /188
 - 12.3.2 波浪能 /190
 - 12.3.3 海洋热能 /191
- 12.4 地热能 /191
 - 12.4.1 地热资源 /191
 - 12.4.2 地热发电 /192
 - 12.4.3 地热直接应用 /193
 - 12.4.4 优势、劣势、展望 /193
 - 12.4.5 下一步：深入挖掘 /194

第五部分 能源载体

第 13 章 电能 /196

- 13.1 基本概念 /196
- 13.2 照明 /198
- 13.3 传统发电技术 /199
 - 13.3.1 需求与供给 /199
 - 13.3.2 基于矿物燃料火力发电站 /201
 - 13.3.2.1 煤炭火力发电站 /201
 - 13.3.2.2 石油或天然气火力发电站 /201
- 13.3.3 水电站 /202
- 13.3.4 核电站 /203
- 13.3.5 其他能源的贡献 /203
- 13.4 传统电网 /203
- 13.5 可再生能源发电 /205
 - 13.5.1 间歇性和波动性 /205
 - 13.5.2 风力发电 /206
 - 13.5.3 太阳能发电 /206
- 13.6 电能储存 /207

- 13.6.1 储能的意义 /207
- 13.6.2 抽水蓄能系统 /208
- 13.6.3 压缩空气蓄能系统 /208
- 13.6.4 飞轮储能系统 /208
- 13.6.5 超导磁储能系统 /209
- 13.6.6 静电能储存(电容器) /210
- 13.6.7 电池 /210
 - 13.6.7.1 电池要求 /210
 - 13.6.7.2 电池种类 /210
- 13.6.8 电解水制氢 /212
- 13.7 插电式交通工具 /213
 - 13.7.1 混合动力汽车和纯电动汽车 /213
 - 13.7.2 基础设施 /214
- 13.8 智能电网 /214
- 13.9 走向电驱动时代 /215

第14章 氢 /217

- 14.1 引言 /217
- 14.2 性质与工业应用 /218
- 14.3 氢气作为能量载体：一项艰巨的任务 /219
- 14.4 制取氢气的方法 /219
 - 14.4.1 “清洁煤”技术 /219
 - 14.4.2 生物质 /220
 - 14.4.3 水解 /220

- 14.4.3.1 基本概念 /220
- 14.4.3.2 水力发电 /221
- 14.4.3.3 风力发电 /221
- 14.4.3.4 太阳能光伏发电 /222
- 14.4.3.5 聚光光热发电 /222
- 14.4.4 光致水分解制氢 /222
- 14.4.5 核能发电 /222
- 14.5 氢储存 /223
 - 14.5.1 一个难题 /223
 - 14.5.2 液态氢 /224
 - 14.5.3 压缩氢气 /224
 - 14.5.4 金属氢化物 /224
 - 14.5.5 其他体系 /225
- 14.6 氢的运输和配送 /225
 - 14.6.1 集中输送 /226
 - 14.6.2 分散配送 /226
- 14.7 氢燃料终端应用 /227
 - 14.7.1 燃料电池：基本概念 /227
 - 14.7.2 质子交换膜燃料电池 /228
 - 14.7.3 其他形式的氢燃料电池 /228
 - 14.7.4 甲醇重整制氢燃料电池 /229
 - 14.7.5 直接甲醇燃料电池 /230
- 14.8 氢动力汽车 /231
- 14.9 面向氢经济 /232

第六部分 展望可持续发展的未来

第15章 前方的挑战 /236

- 15.1 对于地球状况的反思 /236
- 15.2 能源需求与供给 /237
- 15.3 能源与生活质量 /237
 - 15.3.1 聚焦错觉 /237
 - 15.3.2 能源、肥胖与不平等 /238
- 15.4 拯救气候 /239
- 15.5 淘汰矿物燃料 /239
- 15.6 规避核能 /239
- 15.7 生态可持续性 /240

- 15.7.1 自然资源 /240
- 15.7.2 学会知足 /241
- 15.8 为何要发展可再生能源 /242
- 15.9 结论 /243

附录 你知道吗？ /245

参考文献 /251

索引 /283