




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

第2版

可再生能源概论

左然 施明恒 王希麟 徐谦 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

双色印刷



免费电子课件

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

可再生能源概论

第2版

主编 左 然 施明恒
王希麟 徐 谦
参编 闻建龙
主审 葛新石 黄素逸



机械工业出版社

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

可再生能源通常是指对环境友好、可以反复使用、不会枯竭的能源或能源利用技术，包括太阳能热利用、太阳电池、生物质能、风能、小水电、潮汐能、海浪能、地热能、氢能、燃料电池等。本书对上述相关知识进行了较为系统的介绍，重点介绍了各种可再生能源技术的基本原理和开发利用的方式，简要介绍了目前国内外可再生能源开发利用的现状和最新进展。此外，在第1版基础上，第2版新增加了储能技术一章。

本书适合作为理工科大学的教材，也可用作研究生参考教材。对于从事可再生能源技术研发的相关科技人员，本书也具有重要的参考价值。

本书配有电子课件，免费提供给选用本书的授课教师。需要者请登录机械工业出版社教育服务网（www.cmpedu.com）注册下载，或根据书末的“信息反馈表”索取。

图书在版编目（CIP）数据

可再生能源概论/左然等主编. —2版. —北京：机械工业出版社，2015.3

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-49448-5

I. ①可… II. ①左… III. ①再生能源—高等学校—教材 IV. ①TK01

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第037203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：刘涛 责任编辑：刘涛 冯钊

版式设计：霍永明 责任校对：佟瑞鑫

封面设计：路恩中 责任印制：李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2015年5月第2版第1次印刷

184mm×260mm·25印张·617千字

标准书号：ISBN 978-7-111-49448-5

定价：49.80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：010-88379833

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-88379649

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

第2版前言

本书第1版出版至今已将近8年。这8年来,世界可再生能源技术的发展,仿佛从黎明前的一抹霞光,演变成清晨冉冉升起的朝阳。以世界光伏发电的领头羊德国为例,2006年,德国的光伏发电量仅占全国发电量不到1%,到2013年底,这一数据已变成5%。虽然中国的光伏发电量至今占比仍很小,但近年来国内光伏发电市场迅速启动,并且发展迅猛。2013年全国新增光伏发电装机容量占全球的30%,中国首次超越德国,成为世界最大的光伏发电市场。风能也是世界范围内发展最快的可再生能源技术,到2013年底,全球风电累计装机容量达到318GW,与10年前相比增长了10倍,可以满足约4%的全球电力需求。而我国的风电装机容量超过90GW,已排名世界第一,发电量约1350亿kW·h,占全国发电量的2%。风电已占据我国继火电、水电后的第三大电力能源位置。

这8年来,可再生能源技术也有了长足的进展。仍以太阳光伏为例,2006年,晶硅光伏组件的光电转化率最高为15%,到2013年,这一数据提高到18%。而光伏组件的价格,从2006年的大约3美元/W_p,下降为2013年大约0.6美元/W_p(W_p为峰值瓦),降幅达到80%。

随着新能源产业的高速发展,国内许多大学都开设了相关的本科和研究生课程,许多高校还开设了新能源专业。本书也被国内许多高校选为教材或参考教材,令编者感到喜悦和欣慰。如同第1版前言中所说,可再生能源技术包含多门不同的学科以及多学科交叉的知识,在一本教材中将如此众多的知识汇总在内,并且给出较精炼的介绍,实在是艰难的任务,里面的缺点和不足也在所难免。而适时地修改第1版的内容也是编者的心愿。

本书第2版在保留第1版主要内容的基础上,修改其中的错误和疏漏,删去若干过时的内容,并适当增加可再生能源技术的最新进展。编者的主要修改思路是:进一步加强相关基础理论介绍,压缩一般性的能源概论和国内外研究现状等内容,尽量用生动浅显的语言,系统地介绍可再生能源的相关基础知识以及最新进展。本书第2版主要做了以下修改和增删:

1) 修正了第1版中存在的若干错误和重复之处,更换了若干过时或不够清晰的图片和表格。

2) 压缩了各章有关国内外发展现状以及一般性的能源概论等内容;对国内外新能源发展的主要数据进行了更新。

3) 增加了若干重要的基础理论介绍,例如太阳辐射的吸收和传递、光伏材料的直接带隙和间接带隙以及能量储存理论等。

4) 增加了第11章储能技术。由于能量储存与可再生能源密切相关,因此该章的增加使得本书内容更为全面。

本书第2版的编写,除了第1版的四位作者外,还邀请了江苏大学徐谦副教授加入。徐谦副教授在香港科技大学读博期间,专门从事燃料电池和储能电池的研究。所以储能技术一

章的编写以及电化学、燃料电池等部分的修改，均由徐谦博士承担。

在太阳电池一章的修改中，特别感谢常州天合光能有限公司（TSL）的张志强高级工程师，他不仅对该章进行了认真的审核，提出了很好的修改意见，而且提供了最新的光伏电池发展资料。

本书第1章和第4章的图表做了较多更新，江苏大学能源动力学院硕士研究生赵江承担了大量工作。这里一并表示感谢！

希望本书第2版的出版对我国可再生能源技术的发展起到微薄的促进作用。同时也诚恳地欢迎读者提出批评意见。

编者

第1版前言

进入 21 世纪，人类社会面临着严重的能源紧缺和环境污染。传统能源中的石油和天然气将在未来几十年内耗尽，煤尽管还能用一二百年，但它会对生态和环境带来很多的副作用。在世界范围的能源危机中，中国更是首当其冲。因此，研究开发无污染、可再生的新能源与能源转换技术是科技界的当务之急，而培养这方面的人才更是重中之重。

早在 20 世纪 70 年代，发达国家工科类专业（包括机械、电子、化工、材料等）就普遍开设能源与环境、可再生能源技术等相关课程。例如，美国许多大学都开设了名为 Renewable Energy, Alternative Energy, Sustainable Energy 或单独的 Solar Energy, Wind Energy, Fuel Cell 等课程。近年来，国内许多大学也都开设了相关课程。面对我国日益严峻的生态失衡和能源短缺，作为 21 世纪的理工科大学生，迫切需要具备能源与环保、可再生能源技术等基础知识。

尽管太阳能、风能、燃料电池等许多可再生能源和相应的利用技术早已列为国家重点发展的高技术项目，《可再生能源法》也于 2005 年 2 月在全国人大顺利通过，但是国内至今还没有一本适合理工科大学的、专门介绍可再生能源及其利用的大学本科教材。20 世纪 80 年代初机械工业出版社出版过一本作为大学教材的《新能源发电》（西安交通大学陈听宽等编）。该书为国内最早较全面介绍可再生能源技术的大学教材，但由于当时的背景，核能和磁流体发电（不属于可再生能源范畴）占据很大篇幅，显然已不适应新时代的要求。近年来陆续有一些“新能源技术”类书籍问世，除了科普类以外，其中不乏介绍较全面的，但大都面向专业技术人员，偏重于某几类可再生能源，因此更适合于专业人士阅读。

因此，编写一本新的、适合理工科大学的“可再生能源及其利用”教材（本书将采用“可再生能源”这一更为准确的词汇，替代较为模糊的“新能源”一词），较为系统地介绍各种主要的可再生能源及其利用的原理、实用技术和当今国内外可再生能源技术的发展趋势，对于培养新一代具有开阔视野，将来能够从事与可再生能源相关的研究、开发和管理人才具有重要意义，也是改变我国传统的工科类专业陈旧的课程设置，与国际先进教育理念接轨的一个重要的尝试。

本书第 1 章是能源概论，内容包括能源与人类和环境的关系、能源的各种来源和分类以及人类所面临的能源和环境危机；第 2 章介绍可再生能源技术涉及的主要基础理论，包括热流体科学、半导体物理、电化学理论等；第 3~10 章，分门别类地介绍太阳能热利用、太阳能电池、生物质能、风能、小水能、潮汐能、海浪能、地热能、氢能以及燃料电池技术，重点介绍各种可再生能源的基本概念、利用原理和实用技术。此外，也简要介绍了目前国内外可再生能源开发利用的现状、最新进展、以及对环境的影响。

本书在写作上着重基本概念的阐述，尽可能联系实际，尽可能多利用图、表等。在介绍基本原理的基础上，也适当给出该领域正在发展的、较高深的内容，为学生提供发挥想象力

和创造力的空间。每章后备有5~10条思考题与练习题,供学生巩固所学内容,也给出一二道考核学生的创新能力的综合题,培养学生将书本知识转变为实际应用的能力。

本书需要的预备知识包括大学物理、大学化学、热力学、流体力学、传热学、半导体物理和电化学基础等,对于未学过后五门课程的同学,本书第2章给出了扼要的入门知识。其中半导体物理基础和电化学基础是学习太阳能电池和燃料电池的必要准备。本书适合作为理工科大学三年级的教材,也可作为研究生的参考教材。全部内容学习大约需60~80学时,也可利用30学时选择性地学习。本书也为从事可再生能源相关领域研发的科技人员提供必要的参考。

可再生能源技术涵盖了许多不同的学科,涉及广泛的物理和化学原理。因此,编写这样一本教材,需要很宽的知识背景。由于作者主要是在工程热物理相关领域从事教学和科研,因此尽管已经竭尽所能,但错误(包括笔误和技术错误)、遗漏在所难免。诚恳希望读者发现后及时批评指正,以利于以后的再版。

本书第1章、第2章(2.2节除外)、第4章、第8章由左然(江苏大学)撰写,第3章、第9章、第10章由施明恒(东南大学)撰写,第5章、第6章由王希麟(清华大学)撰写,第7章、第2章2.2节由闻建龙(江苏大学)撰写。全书由左然统稿。清华大学航空航天学院研究生邓佳耀参与了本书的部分工作,江苏大学能源与动力工程学院研究生徐谦、戴剑侠、段清彬、张立平等协助绘图。

本书在编写过程中,参阅了大量的国内外文献,引用了许多不同来源的资料和插图。除了各章后所附的参考文献外,本书主要参考了G. Boyle的Renewable Energy-Power for a Sustainable Future (2nd ed., Oxford University Press, 2004.)一书,以及下列网络资源:

1. 美国可再生能源国家实验室(NREL)网站: www.nrel.gov
2. 加拿大自然资源部(CANMET)能源技术中心网站: www.retscreen.ca
3. 欧洲可再生能源组织(EREC)网站: www.erec-renewables.org
4. 中国新能源网: www.newenergy.org.cn
5. 中国可再生能源网: www.creinfo.org.cn

全书承蒙我国可再生能源领域的两位著名学者——葛新石教授(中国科技大学)和黄素逸教授(华中科技大学)在百忙之中审阅,在此深表谢意。

最后,希望本书对培养我国可再生能源技术领域的人才有所裨益。

编者

目 录

第 2 版前言	
第 1 版前言	
第 1 章 能源、人类与环境	1
1.1 人类利用能源的历史	2
1.2 能量的各种形式和转换	3
1.3 能源的定义和分类	5
1.4 能源的品质评价	7
1.5 我国的能源问题	8
1.6 能源与生态环境的关系	9
1.7 可再生能源的应用和前景	11
思考题与习题	12
参考文献	12
第 2 章 能量转换基础知识——热力学、 流体力学、传热学、半导体 物理、电化学基础	13
2.1 热力学基础	13
2.2 流体力学基础	24
2.3 传热学基础	38
2.4 半导体物理基础	52
2.5 电化学反应基础	72
思考题与习题	80
参考文献	81
第 3 章 太阳能热利用	82
3.1 太阳辐射	82
3.2 地面太阳辐射的接收和传递	88
3.3 平板型太阳能集热器	93
3.4 真空管集热器与太阳能热水器	103
3.5 太阳房	106
3.6 太阳灶	111
3.7 太阳能热发电	113
3.8 太阳能制冷与空调	119
3.9 太阳能干燥	125
3.10 太阳能储存	126
思考题与习题	129
参考文献	129
第 4 章 太阳能电池	131
4.1 太阳能电池原理、发展历史和现状	131
4.2 光吸收与载流子产生、光伏效应 原理	134
4.3 太阳能电池的 $I-V$ 特性	137
4.4 太阳能电池的工作特性与功率输出	140
4.5 太阳能电池的转换效率和影响因素	141
4.6 太阳能电池分类与太阳能电池模块的 标准测试条件	145
4.7 单晶硅电池的基本结构和制备工艺	146
4.8 太阳能电池制备——从石英砂到 单晶硅片	148
4.9 太阳能电池制备——从硅片到 太阳能电池	150
4.10 其他类型的太阳能电池	153
4.11 太阳能电池发电系统	158
4.12 太阳能电池的环境影响和发展前景 展望	160
4.13 例题	162
思考题与习题	162
参考文献	163
第 5 章 生物质能	164
5.1 生物质能的形成和利用	164
5.2 生物质能的来源	168
5.3 生物质直接燃烧技术	171
5.4 生物质压缩成型燃料技术	176
5.5 厌氧消化制取气体燃料	180
5.6 生物质气化技术	187
5.7 生物质热裂解技术	191
5.8 生物质燃料乙醇技术	194
5.9 生物柴油技术	197
5.10 生物质能与环境	200
5.11 生物质能发展与展望	202
思考题与习题	205
参考文献	206
第 6 章 风能	207
6.1 风的形成	207

6.2 风能利用简介	212	第9章 地热能	297
6.3 风能资源及分布	215	9.1 地热能概述	297
6.4 风的基本特征	219	9.2 我国的地热资源	299
6.5 风能的计算	221	9.3 热储工程学基础	305
6.6 风力机的空气动力学基础	224	9.4 地热发电	310
6.7 各种类型的风力机	230	9.5 地热供暖	314
6.8 风力发电机的结构	233	9.6 地热能的其他利用	317
6.9 风力机的控制	235	9.7 地热能开采	320
6.10 风力机的选址和输出功率	238	9.8 地热回灌技术	322
6.11 各种风力系统	240	思考题与习题	323
6.12 风能利用的发展	243	参考文献	323
6.13 环境影响和风能利用展望	245	第10章 氢能与燃料电池	325
思考题与习题	248	10.1 氢元素和氢能	325
参考文献	248	10.2 氢的制备	327
第7章 小水电和潮汐能	249	10.3 氢的储存	331
7.1 水力发电基本原理	249	10.4 燃料电池的基本原理	334
7.2 小型水电站类型和建站型式	250	10.5 燃料电池的分类及特征	339
7.3 水电站水工建筑物	252	10.6 燃料电池的发展和展望	351
7.4 水轮机的工作参数及类型	254	思考题与习题	352
7.5 水轮机的工作原理	256	参考文献	353
7.6 潮汐电站	263	第11章 储能技术	354
7.7 抽水蓄能电站	267	11.1 飞轮储能	355
7.8 环境问题与未来展望	269	11.2 化学电池原理	357
思考题与习题	270	11.3 铅酸电池	361
参考文献	271	11.4 锂离子电池	364
第8章 波浪能	272	11.5 钠硫电池	370
8.1 波浪的起因和定义	273	11.6 液流电池	375
8.2 波浪的特征和波浪能的功率	274	11.7 各种储能技术的对比、环境影响和 未来展望	379
8.3 波浪在深水和浅水中的传播	275	思考题与习题	382
8.4 波浪能资源	278	参考文献	382
8.5 波浪能转换技术	281	附录	383
8.6 世界主要波浪能装置的范例	288	本书常用符号	384
8.7 波浪发电的经济性、环境影响和 技术展望	294	全文索引	386
思考题与习题	296		
参考文献	296		

第 1 章

能源、人类与环境

能源是人类赖以生存的基础，也是人类从事生产和社会活动的基础。能源的开发利用程度标志着人类社会进化和发展的程度。能源对于现代社会的重要性如同粮食对于人类的重要性，没有粮食，人类将不能生存；没有能源，现代社会将陷入瘫痪，人类只能回到远古的刀耕火种时代。

能源的消费水平是衡量国民经济发展和人民生活水平的重要标志。随着现代社会的发展和人民生活水平的提高，人类的能源消耗迅速增长（图 1-1），能耗的增长速度大大超过了人口增长速度。在 20 世纪的 100 年中，世界人口从 16 亿增长到 60 亿，大约增长了 4 倍；而同一时期，世界一次能源的年消耗量从 20 亿 t 标准煤增长到 200 亿 t 标准煤，足足增长了 10 倍。据能源专家预测，以目前的消耗速度，地球上已探明的储藏，煤大约能维持 200 年，石油和天然气大约还能维持 50 年。全世界人口从 2011 年起已经突破 70 亿，这意味着地球资源紧张将进一步加剧。

传统的化石能源不仅储量有限，而且已经造成严重的生态失衡和环境污染。人类不能无节制地向自然索取，只有合理地开发和利用能源，与自然和谐相处，才能从根本上解决能源问题。我国的现代化建设，在很大程度上取决于能源的充分供应和有效利用。开发无污染、可再生的新能源是科技界的当务之急。

现代科学技术有四大支柱：信息科学、材料科学、生命科学、能源科学。属于能源科学的新能源技术的特点是，它并不自成一个学科，而是多种学科的交叉。能源技术研究各种能源的开发、生产、转换、储存和综合利用。简言之，研究能源技术的目的有两个：一是寻找新的能源和能源利用方式；二是提高现有能源的利用效率，特别是转换为电能的效率。对于可再生能源技术来说，最重要的是能量的高效率低成本的转换。因此，学习和了解可再生能源技术需要宽广的知识背景，需要掌握多方面的知识，特别是物理学和化学的基础知识。

在系统地介绍可再生能源技术之前，本章和第 2 章将分别介绍有关能源利用的一般知识和基础理论：本章将介绍能源利用的历史、能源的定义和分类、能源的品质评价、中国所面临的能源和环境问题、可再生能源的开发前景等。第 2 章将给出有关能源利用与转换的基础理论知识，包括热力学、流体力学、传热学、半导体物理以及电化学的基础知识。

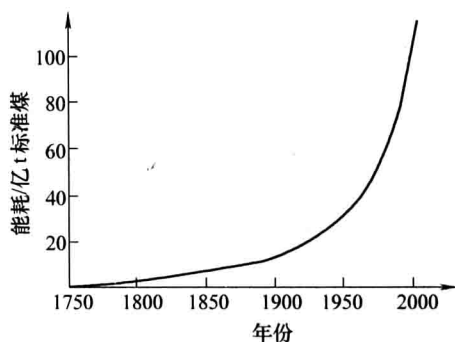


图 1-1 工业革命以来人类能源消耗的增长

1.1 人类利用能源的历史

人类进化的历史，也是一部不断地向自然界索取能源的历史。伴随着能源的开发利用，人类社会逐渐地从远古的刀耕火种走向现代文明。如表 1-1 所示，人类使用能源大致可以分为四个时期：

表 1-1 人类利用能源的历史

名称	时期	特点
(1) 柴草时期	约 50 万年前~18 世纪中叶	以柴草、人力、畜力为主，辅以少量风车、水车
(2) 煤炭时期	18 世纪中叶~20 世纪中叶	以煤炭为主要能源，以蒸汽机为主要驱动力
(3) 石油时期	20 世纪中叶~21 世纪中叶	以石油为主要能源，以内燃机和电机为驱动力
(4) 新能源时期	21 世纪中叶以后	包括太阳能、风能、水能、生物质能等可再生能源以及人工核聚变等多种能源利用体系

(1) 柴草时期 大约 50 万年前，人类学会了使用工具和火，特别是学会了利用火来取暖和做饭（图 1-2），从此人类完成了从猿到人的进化。此后一直到 18 世纪中叶，人类一直以柴草烧饭、取暖和照明，以人力、畜力和极少量水车、风车为动力，从事手工生产和交通运输。在马车的低吟声中，人类度过了悠长的农业文明时代。尽管生产力和生活水平非常低下，但火的发现和使用，使人类开始了迈向具有理性的文明社会的步伐。这一时期生产力低下，人类基本受制于大自然。

(2) 煤炭时期 从 18 世纪中叶开始，以蒸汽机的发明为代表，人类进入了能源利用的煤炭时期。中国人早在 1000 多年前就学会使用煤，但大规模地开采和利用煤则始于 17 世纪的英国。煤气灯的使用，结束了人类的漫漫长夜。蒸汽机的发明，使煤炭一跃成为第二代主体能源。到 18 世纪以煤炭为燃料的蒸汽机的广泛应用，使纺织、冶金、采矿、机械加工等产业获得迅速发展。

蒸汽机车、轮船的出现，又使交通运输业得到巨大进步。通过大规模使用机器，欧洲国家率先进入了工业社会，人类开始对大自然进行大规模的改造。

(3) 石油时期 从 19 世纪末开始，以发明内燃机和电力为代表，人类进入以石油为主要能源的时代。中国人很早就发现石油是一种可燃的液体，宋朝的沈括就对石油作了详细的记载。但漫长的封建社会，压抑了中国人的聪明才智和科学技术的发展。而在地球的另一端，工业革命带来了巨大的技术进步。1854 年，美国宾夕法尼亚州打出世界上第一口油井，现代石油工业由此发端。1886 年，德国人本茨和戴姆勒研制成以汽油为燃料的世界上第一辆汽车，从此开始了大规模使用石油的汽车时代。从 19 世纪初法拉第发现电磁感应，到世纪末爱迪生发明电灯，作为一次能源的石油和煤炭被转换成便于输送和利用的二次能源——电能，使人类永远地脱离了黑暗。到 20 世纪 60 年代，全球石油的



图 1-2 钻木取火——人类最早从事的能量转换过程

消费量已超过煤炭，成为第三代主体能源。以石油和电能为基础，内燃机、电力机等动力机械，以及电话、电视、计算机、互联网等信息设备的发明和使用，将人类快速推进到现代文明时代。

(4) 可再生能源时期 进入 21 世纪，在使用石油、煤、天然气等化石能源以及核能的同时，水力能以及太阳能、风能、海洋能、生物质能等可再生能源也逐渐走上历史舞台。由于传统的化石能源面临枯竭，人类正在积极地开发可再生的新能源。尽管目前人类仍处于石油能源时期，但按照当前的发展趋势预测，到 21 世纪中叶，很可能形成包括太阳能、风能、水力能、生物质能等可再生能源以及核能（核裂变和核聚变）的多种能源联合利用体系，可再生能源将占据社会总能源需求的至少半壁江山。

1.2 能量的各种形式和转换

按照物理学的定义，能量即物体（或系统）对外做功的能力。物体对外界做功 W ，则外界能量增加 W ，而物体本身能量减少 W 。这是能量最重要的特征——能量守恒定律：能量既不能被创造也不能被消灭，它只能从一种形式转变为另一种形式。如动能变为势能、电能变为光能、机械能转换为热能、化学能转换为电能等。若用热力学的语言，则有热力学第一定律，它是目前除了核能以外的几乎所有能量转换的理论基础。若考虑爱因斯坦的质能关系式 $E = mc^2$ ，即质量和能量的相互转化，则有广义的能量守恒定律，它是核电站以及受控核聚变的理论基础。

能量的概念来源于力学，后来扩展到许多学科，成为人类认识世界的一个极其重要的物理量。能量有多种不同的形式，不同学科遇到的各种能量形式及表达式如表 1-2 所示。

表 1-2 不同学科遇到的能量形式及表达式

学 科	能 量	表 达 式	符 号 意 义
牛 顿 力 学	平动动能	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$	m ，物体的质量； v ，物体的平动速度
	转动动能	$E_r = \frac{1}{2}I\omega^2$	I ，转动惯量； Ω ，物体的转动角速度
	重力势能	$E_p = mgh$	g ，重力加速度； h ，物体的相对高度
热 力 学	热能、 热力学能	$\Delta U = Q - W$	ΔU ，系统热力学能的变化； Q ，热能； W ，做功
电 磁 场	电场能	$E_e = \frac{1}{2}CV^2$	C ，电容； V ，电压
	磁场能	$E_m = \frac{1}{2}LI^2$	L ，电感； I ，电流
核物理学	核能	$\varepsilon = h\nu$ $E = mc^2$	ε ，单个粒子或光子的最小能量； h ，普朗克常数； ν ，振动频率； m ，质量； C ，光速

(续)

学科	能量	表达式	符号意义
化学	化学键能、热能、光能	化学反应方程式	在化学反应中, 首先由外界提供能量, 如热能或光能, 使连接原子之间的化学键断开, 此能量即活化能; 然后, 原子发生重新组合, 释放出多余的化学能
生物化学	光合作用	$6\text{H}_2\text{O} + 6\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$	植物利用阳光将空气中的水和二氧化碳转变为葡萄糖
	无氧发酵		利用微生物将碳水化合物转变为醇, 此即酿酒过程
	酶催化或消化作用		能量以葡萄糖的形式储存在体内, 呼吸时与氧气作用, 反应释放出 H_2O 和 CO_2

在牛顿力学中, 有平动动能 E_k 、转动动能 E_r 、重力势能 E_p 。上述三种能量通称为机械能, 可再生能源中的水力能、波浪能、风能即属于上述能量形式。

在热力学中, 能量守恒定律转化为热力学第一定律。对于封闭系统, $\Delta U = Q - W$, 其中, ΔU 为系统内能的变化, Q 为热能, W 为做功。系统的内能是系统分子热运动的能量, 其本质是微观粒子随机热运动的动能。分子运动速度越快, 物体的温度越高。在热力学中, 热能也可以表示由温差传递的能量。绝大多数化石能源的利用, 都是先将燃料的化学能转变为热能, 然后再转变成其他形式的能量。

在电磁场中, 有电场能 E_e 和磁场能 E_m 。它们之间可以相互转化, 也可以根据法拉第电磁感应定律, 由机械能转化而来。

在化学反应中, 涉及的能量包括化学键能、热能、光能等。当燃料燃烧时, 内部的化学键能转变为热能和光能。无论是吸热反应或放热反应, 由于原子需重新组合, 首先必须由外界提供能量, 如热能或光能, 使连接原子之间的化学键打开, 此能量即活化能, 然后原子重新组合, 释放出多余的化学能。干电池和蓄电池都是利用了化学能。

在生物化学中, 涉及的能量过程包括:

1) 光合作用。植物利用阳光将空气中的水和二氧化碳转变为葡萄糖和氧气 ($6\text{H}_2\text{O} + 6\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$), 能量储存在葡萄糖中。粮食、薪柴、煤、石油中所含的能量都来自太阳的光合作用。

2) 无氧发酵。利用微生物将碳水化合物转变为醇, 此即酿酒过程。沼气也是来自这一过程。

3) 酶催化或消化作用。动物和人类要维持生存, 都要利用这一过程, 从食物中摄取能量。此时, 能量以葡萄糖的形式储存在体内, 呼吸时与氧气作用, 反应产生 H_2O 和 CO_2 , 释放出来。

在微观粒子中, 能量只能以一份份不连续的形式释放或接受。由量子力学得知, 粒子或光子的能量 $E = nh\nu$, n 为正整数, h 为普朗克常数, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$, ν 为振动频率, 即粒子能量只能取最小能量 $h\nu$ 的整数倍。由于普朗克常数为很小的数, 因此在宏观世界里通常观察不到这一能量的不连续性。但是, 当原子核发生裂变或聚变时, 释放出巨大的能量。由爱因斯坦的质能关系式, $E = mc^2$, 其中 m 为物体质量, c 为光速, $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。这里的能量 E 表示当物质的质量或原子核的数目改变时所释放出的原子核能。1kg 铀 235 裂变后产生的能量等

价于 2500t 煤燃烧后所产生的能量, 该能量足以产生一次强烈地震, 或一次原子弹爆炸。1kg 氘和氚放出的能量相当于 1 万 t 煤, 4 倍于铀裂变的能量。太阳能就是一种核聚变能, 其中大量的氢原子聚合到一起, 形成氦原子, 同时以光辐射的形式放出巨大的能量。

上述各种形式的能量, 可以简单地归为两类: 与运动相联系的能量, 称为动能; 与物体的相对位置或内部结构有关的能量, 统称为势能。目前人类使用的能源可以认为全都来自以下若干类型的势能: 由于水位差产生的水力能; 由于空气温差产生的风能; 储存在物质中的化学键中, 当原子发生重新组合时释放出的化学能, 如煤、石油、天然气等化石能源; 储存在原子内部, 当原子核破裂时释放出的原子核能。太阳其实就是一座天然的核聚变反应堆, 氢同位素的核聚变放出能量。原子核能释放时, 能量以热能、声能或光能的形式放出。

1.3 能源的定义和分类

广义地讲, 能源即能够向人类提供能量的自然资源。如煤和石油等化石能源提供热能, 水力和风力提供机械能, 地热提供热能, 太阳提供电磁辐射能 (可转化为热能或电能)。许多自然过程都产生一定的能量, 甚至普通的垃圾也可以转化为能量, 但转化的数量和转化的难易程度则差异极大。因此, 能源又可定义为较集中而又较容易转化的含能物质或含能资源。能源的分类有多种方式:

1) 按照来源的不同, 能源可分为来自太阳的辐射能量、地球内部固有的能量、地球与其他天体相互作用产生的能量共三大类 (表 1-3), 分别称为第一类能源、第二类能源、第三类能源。

表 1-3 一次能源的分类

	可再生能源	不可再生能源
第一类能源 (直接或间接来自太阳辐射)	太阳能、风能、水力能、波浪能、海流能、海水温差能、生物质能	煤、石油、天然气、油页岩、可燃冰
第二类能源 (地球内部带来的能量)	地热能、火山、地震、海啸	核燃料 (铀、钍、钷、氡等)
第三类能源 (地球—天体相互作用能)	潮汐能	

第一类能源来自太阳辐射, 又可分为: ①间接来自太阳辐射, 经光合作用转化为生物质能, 如草木中所含的能量, 其中一部分又经过生物体的转化, 变为煤、石油、天然气、沼气、油页岩等。②间接来自太阳辐射, 经空气或水的吸收转化, 变为风能、水力能、波浪能、海水温差能等。③直接吸收太阳辐射, 转化为热能或光能, 如太阳能热水、太阳能采暖、太阳光伏电池等。

第二类能源为地球内部固有的能量, 又可分为: 地热水或汽、热岩层、地震、火山运动、核能 (铀、钍、氡、氫) 等。

第三类能源为地球与其他天体的相互作用能, 主要是潮汐能, 它来自月亮和太阳对地球海水的引力。

2) 按照不同的资源形态, 能源可分为: ①含能体能源。能量存在于物质中, 易于储存,

包括化石燃料（煤、石油、天然气等）、核燃料、地热水或汽、氢能等。②过程性能源。能量存在于运动过程中，无法直接储存，包括太阳辐射、风、河流、潮汐、波浪等。

3) 按照人们开发和使用的程度，能源可分为：①常规能源，如煤、石油、水力等；②新能源，指正在研发、尚未普及的能源，如太阳能、风能、海洋能等。核能曾属于新能源，但随着其广泛地开发，已归类为常规能源。

4) 按照能否反复使用，能源可分为：①不可再生能源，即只能一次性使用，不可再生的能源，它包括所有化石能源和核能；②可再生能源，即可以反复使用，不会耗尽的能源，它包括太阳直接辐射能（简称太阳能）、风能、海洋能、地热能等。

5) 按照是否经过加工或转换，能源又可分为：①一次能源，指自然界中以天然形态存在的原油、原煤、天然气、薪柴、水流、核燃料，以及太阳辐射、地热、潮汐等；②二次能源，指由一次能源经过加工或转换得到的能源，如煤气、焦炭、汽油、煤油、热水、电能、氢能等。电能是最重要、也是最方便的二次能源。

能源的分类如表 1-4 所示。能量的各种形式以及从来源到终端用户的转换关系如图 1-3 所示。

表 1-4 一次能源、二次能源、可再生能源、不可再生能源分类

一次能源	可再生能源	太阳辐射、生物质、风、流水、海浪、潮汐、海流、海水温差、地热水、地热蒸汽、热岩层
	不可再生能源	化石燃料（煤、石油、天然气、油页岩、可燃冰）、核燃料（铀、钍、钷、氡等）
二次能源	电能、氢能、汽油、煤油、柴油、火药、酒精、甲醇、丙烷、苯胺、焦炭、硝化棉、甘油三硝酸酯（硝化甘油）等	

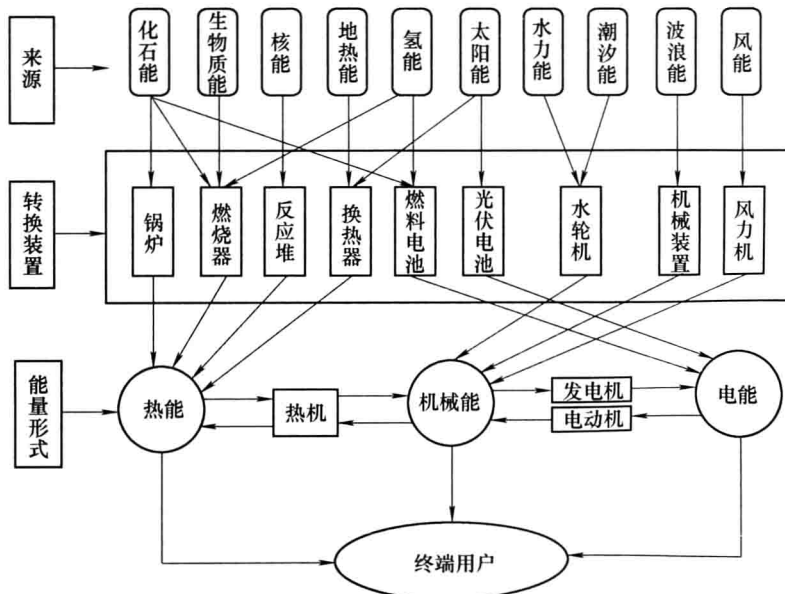


图 1-3 能量的各种形式和转换

6) 按照国际能源署 (IEA) 的推荐, 新能源和可再生能源又分为三类: 第一类, 大中型水电; 第二类, 传统的生物质能利用; 第三类, 新的可再生能源。前两类统称为旧的可再生能源, 因为它们的开发相对较成熟, 而且都对环境有较大的不利影响。第三类即为新的可再生能源, 包括太阳能、风能、现代生物质能、氢能、地热能、海洋能和小水电等。显然, 新的可再生能源还有另一个含义, 即它们除了不会耗尽外, 也较少污染排放, 对环境友好。新的可再生能源是 21 世纪最具发展前景的能源, 它们必将取代传统的化石能源, 成为人类的主流能源。本课程所要讲述的即是新的可再生能源, 简称为可再生能源, 或新能源。

1.4 能源的品质评价

能源的种类很多, 各有优劣。通过对能源进行品质评价, 可以了解各种能源利用的难易程度。评价各种能源的技术指标主要有以下几方面:

1) 能流密度。即在单位体积或单位面积内从能源获得的功率。新能源如太阳能和风能的能流密度较小, 只有几百 W/m^2 ; 常规能源和核能的能流密度大。能流密度小是可再生能源的共性。因此, 太阳能、风能等可再生能源利用需占用较大的接收面积。

2) 能源投资。即开发能源所需的费用和设备价格。化石能源与核燃料, 从勘测开采到加工运输, 需投入大量人力物力, 本身即耗能。太阳能、风能等可再生能源, 由大自然提供, 无能源费用, 只是设备的初投资仍较高。截至 2014 年, 太阳能光伏发电的设备投资平均为 2 万元/kW, 风能则已经降到 6 千元/kW, 接近燃烧天然气和石油的设备投资以及水电设备的投资。

3) 供应的连续性和存储的可能性。要求能源能连续供应, 不用时能储存起来, 需要时能立刻发出能量。一般化石燃料容易储存, 可再生能源如太阳能、风能则难以储存, 也难以连续供应。

4) 运输费用和损耗。能源需要从产地运输到使用地, 但运输本身消耗能源, 也需要投资, 所以远距离运输影响其使用。石油和天然气可以用管道从产地输送到用户, 太阳能、风能等则难以运输。

5) 对环境的影响。在能源利用中, 环境影响是必须要考虑的因素, 环境污染已成为影响全球的重大问题。几种主要能源对环境的影响简述如下:

核电站: 放射线污染、核废料。

燃煤电站: 温室效应、酸雨、粉尘排放。

水电站: 淹没土地、改变生态、引发地震、土地盐碱化、妨碍灌溉与航运。

太阳能、风能、潮汐能、波浪能: 对环境无直接污染, 但占用大量陆地或海面。风能对鸟类、海洋能对航运有部分影响。废弃的太阳电池也会造成污染。

6) 能源品位。从转换为电能的难易程度考虑, 能源有低品位和高品位之分。较难转化为电能的为低品位能源, 较易转化为电能的为高品位能源。能源的品位高低是相对的。例如, 比较水力能与化石燃料, 水力能可直接转化为机械能, 再转化为电能; 而化石燃料须先通过燃烧转化为热能, 再转化为机械能, 进而转化为电能。因此, 水力能更容易转化, 因此是高品位能源。在实际生活中, 大量的低品位能源未被利用, 白白浪费掉。如工业废热、太阳热能、小水能等, 它们积累起来仍是一笔巨大的能量。

1.5 我国的能源问题

根据国际上通行的能源预测,石油和天然气均将在未来 50~60 年内枯竭,煤炭也只能用 200 年左右。在人口众多的我国,传统能源将枯竭得更快,形势不容乐观。与世界上一些资源贫乏的国家相比,我国的能源资源并不缺少。水力资源居世界第一,煤炭储量居世界第三,石油居第六,天然气居第十六。但由于人口太多,技术落后,就人均资源占有量而言,我国的一次能源又非常匮乏。因此,开发利用新能源,提高资源综合利用效率,是我国现代化建设的关键。表 1-5 列出了 2013 年中国和世界主要能源的储量和储采比(按当年生产水平尚可开采的剩余能源储量的年数)的对比。从中可看出,随着国民经济的快速增长,我国正面临着日益严峻的能源危机。21 世纪我国在能源问题上面临着如下的挑战。

表 1-5 2013 年中国主要能源与世界的对比

	煤 炭	石 油	天 然 气
世界总可采储量	8915 亿 t	2382 亿 t	185.7 万亿 m ³
中国可采储量	1145 亿 t	25 亿 t	3.3 万亿 m ³
中国所占比例 (%)	12.8	1.1	1.8
世界储采比	113	53.3	55.1
中国储采比	31	11.9	28
中国产量名次	1	4	5

注:资料来源:BP 世界能源统计 2014。

(1) 人均能源不足 我国人口占世界总人口 21%,人均能源资源占有量不到世界平均水平的一半,人均煤炭储量只相当于世界平均值的 1/2,人均石油可采储量仅为世界平均值的 1/10,人均用电量不足世界平均值的 1/2。

(2) 能源分布不均 我国的煤炭、石油和天然气资源主要集中在东北、华北和西北地区,水电资源则集中在西南地区,而经济发达、人口集中的东部沿海地区能源却严重缺乏。因此,“北煤南运”“西电东送”的不合理格局造成过大的能源输送损失和交通运输的长期紧张。

(3) 能源构成不合理(图 1-4) 在我国一次能源的构成中,煤炭占 70% 以上,而国际上煤炭平均仅占 23%。大量燃煤造成严重的空气污染。我国目前是世界第一大温室气体排放国,面临巨大的国际压力。以煤炭为主要能源的结构带来严重的能源消费污染问题。

(4) 能源效率低 我国目前单位产值能耗是世界最高的国家之一,能源效率约为 30%,与发达国家相差 10%,主要工业产品单位能耗比发达国家高出 30% 以上。据统计,中国每生产 1 美元 GDP,消耗的能源是美国的 4 倍、德国和法国的 7 倍、日本的 11 倍。

(5) 农村能源严重短缺 我国农村生活用能的 2/3 依靠薪材和秸秆,即传统生物质能。每年砍伐薪柴 3000 万 t;森林年生长率 3 亿 m³,而年消耗量 4 亿 m³。由于盲目发展乡镇企业,乡镇工业用能剧增。许多乡镇企业能源利用率低且污染严重。我国单位面积粮食作物的能源投入量超过以“石油农业”著称的美国,农业生产高能耗、低效益。

(6) 能源过度依赖进口 从 1993 年起,我国就变成了石油净进口国。2013 年 10 月,