

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
能源革命与绿色发展丛书
普通高等教育“十三五”规划教材

能源工程概论

第2版



吴金星 主编

赖艳华 刘泉 副主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“三五”国家重点出版物出版规划项目
能源革命与绿色发展丛书
普通高等教育“十三五”规划教材

能源工程概论

第2版

主 编 吴金星
副主编 赖艳华 刘 泉
参 编 刘利平 刘少林 王 蕾
 孙雪振 赵进元 田倩卉
主 审 孙晓林



机械工业出版社

为了改善生态环境,更加合理高效地利用常规能源,开发和利用新能源并使其逐步替代化石能源,同时使所有用能人员都具备能源开发与高效利用的相关知识,本书系统地阐述了能源的类型和特点,能量的形式,能源资源的概况及发展趋势,常规能源的转换、储存和高效利用技术,新能源的开发利用技术,以及能源工程中的节能环保技术,并介绍了能源管理方法与节能新机制。本书兼顾专业性与通俗性,既可作为高校能源动力类专业本科生的专业必修课教材,也可作为各工科专业学生了解能源工程和能源管理知识的选修课教材,还适用于相关行业的技术及管理人员培训等。

本书配有电子课件,向授课教师免费提供,需要者可登录机工教育服务网(www.cmpedu.com)下载。

图书在版编目(CIP)数据

能源工程概论/吴金星主编.—2版.—北京:机械工业出版社,2018.10

(能源革命与绿色发展丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-61093-9

I. ①能… II. ①吴… III. ①能源-高等学校-教材 IV. ①TK01

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第231600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:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 段晓雅 王小东

责任校对:刘 岚 封面设计:张 静

责任印制:孙 炜

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2019年1月第2版第1次印刷

184mm×260mm·19.25印张·470千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-61093-9

定价:49.00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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

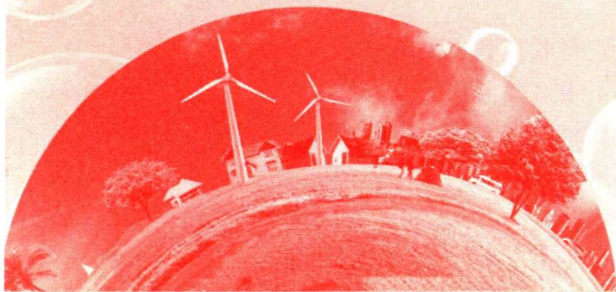
网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com



前言

能源是人类社会赖以生存和发展的资源，包括煤炭、石油、天然气、水能、核能、风能、太阳能、地热能、生物质能等一次能源和电力、热力、成品油等二次能源，以及其他新能源和可再生能源。随着世界经济的快速发展，对能源的需求量逐年增加，而地球内部常规化石能源（即矿物能源）总量有限并日渐枯竭，能源已成为制约世界各国经济发展的瓶颈。同时，化石能源的使用会产生大量 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等有害气体，造成生态环境恶化、地球变暖、局部地区酸雨和雾霾天气等环境问题，使农作物减产、生态遭到破坏，人类健康受到严重威胁。因此，开发能源管理新机制并提高能源管理手段、更加高效合理地利用常规能源、改善生态环境的呼声越来越高。开发和利用新能源尤其是可再生能源，已在全球范围内得到强烈关注，各国纷纷加大资金投入，以促进新能源技术的发展和规模化利用，并使新能源逐步取代常规能源。

掌握常规能源的高效利用技术和新能源开发技术的基础知识，不但对于能源动力类专业技术人员来说是必需的，而且对于所有工科专业技术人员来说都是必需的，对于工业企业管理人才的培养和未来发展也是不可缺少的。尤其在 21 世纪建设“资源节约型、环境友好型”社会的形势下，对于培养和造就创新型的复合人才，全面提高各类人才的科学素质，特别是培养节能降耗的科学意识，都是十分必要的。

本书系统地阐述了能源的分类和特点，能量的形式，国内外能源资源的概况及发展形势，常规能源的转换、储存技术和高效利用方法，新能源和可再生能源的开发利用方法，以及能源工程中的节能环保技术等；阐述了能源管理方法与节能新机制，如固定资产投资项目节能审查、企业能源审计、清洁生产审核、合同能源管理、节能产品认证和能效标识制度等。

本书可作为高等院校能源动力类专业本科生的专业必修课教材，也可作为各工科专业学生了解能源工程和能源管理知识的选修课教材，同时可作为工程热物理学科的教师和研究生、各级能源管理部门及企事业单位的节能管理人员、工程技术人员实施能源管理的参考书。

本书在第 1 版的基础上进行了全面修订，尤其是对各种能源的开发、生产和消耗数据进行了更新。全书由郑州大学节能技术研究中心主任吴金星教授担任主编并统稿，山东大学赖艳华教授、北京信息科技大学刘泉教授担任副主编，由河南省节能监察局孙晓林教授级高工担任主审。参与本书编写和修订的还有：郑州大学刘利平副教授，郑州大学研究生刘少林、王蕾、孙雪振、赵进元、田倩卉等。另外，郑州大学詹自力教授、赵金辉博士、王军雷博



士，以及河南机电高等专科学校王任远讲师参与了资料收集和书稿整理、绘图等工作；编写过程中，郑州大学魏新利教授、王定标教授等提出了很好的修改意见和建议，在此一并表示感谢。在编写过程中还参阅了大量的国内外专著、教材和期刊论文，在此谨向这些文献的著者和相关单位表示诚挚的谢意。本书的修订和出版得到了郑州大学的支持，同时，机械工业出版社对本书的出版也给予了大力帮助，特此致谢。

由于作者水平和经验有限，书中难免出现疏漏和不足之处，敬请读者批评指正。

编者



目录

前言

第1章 能源资源概述 1

1.1 能源与能量 1

1.1.1 能源的分类 1

1.1.2 能源可持续利用的评价指标 4

1.1.3 能量的基本形式 8

1.1.4 能量的性质 11

1.1.5 能量传递的相关因素 12

1.2 能源利用与可持续发展 13

1.2.1 能源与国民经济发展 13

1.2.2 能源与经济可持续发展 15

1.3 我国的能源结构与发展战略 17

1.3.1 我国能源生产和消费结构 18

1.3.2 我国能源形势与发展战略 25

思考题 30

第2章 能量的转换与储存 31

2.1 能量转换的原理与效率 31

2.1.1 能量转换的方式 31

2.1.2 能量转换的基本原理 33

2.1.3 能量转换的效率 34

2.2 能量转换的形式与设备 36

2.2.1 化学能转换为热能 36

2.2.2 热能转换为机械能 40

2.2.3 机械能转换为电能 54

2.3 能量的高效储存技术 55

2.3.1 电能高效储存技术 56

2.3.2 热能储存技术及其应用 59

2.3.3 机械能储存技术 65

思考题 66

第3章 常规能源的高效利用 67

3.1 概述 67

3.2 煤炭 69

3.2.1 煤炭的高效清洁利用技术 70

3.2.2 先进煤炭燃烧发电技术 78

3.2.3 煤炭利用节能环保技术 84

3.3 石油 88

3.3.1 石油概述 88

3.3.2 炼油工业的发展历程及前景 89

3.3.3 原油炼制方法及节能技术 92

3.4 天然气 97

3.4.1 天然气概述 97

3.4.2 天然气高效利用技术 98

3.5 水能 102

3.5.1 水能概述 102

3.5.2 水力发电技术 103

3.6 电能 107

3.6.1 电能概述 107

3.6.2 电能的开发与输送技术 109

思考题 112

第4章 新能源的开发利用 113

4.1 新能源开发利用的意义 113

4.2 太阳能 115

4.2.1 太阳能及其利用原理 115

4.2.2 太阳能利用设备及系统 117

4.2.3 太阳能的应用前景 123

4.3 风能 124

4.3.1 认识风能 124

4.3.2 风能的利用技术 125

4.3.3 风电技术的发展趋势 128

4.4 生物质能 129

4.4.1 生物质能概述 129

4.4.2 生物质能利用技术 131

4.4.3 生物质能开发利用进展 132



4.5 核能	134	第6章 能源管理方法与节能新	
4.5.1 核能概述	134	机制	222
4.5.2 核能利用技术	135	6.1 能源管理概述	222
4.5.3 核能的和平利用前景	138	6.1.1 能源管理方法和内容	222
4.6 地热能	140	6.1.2 能源管理节能新机制	226
4.6.1 地热能的来源	140	6.2 节能审查	227
4.6.2 地热资源的分类及特征	141	6.2.1 节能审查的政策及意义	227
4.6.3 地热资源的开发利用		6.2.2 节能报告的编制依据与评价	
技术	143	方法	231
4.7 海洋能	145	6.2.3 节能报告的内容及编制	232
4.7.1 认识海洋能	145	6.3 企业能源审计	237
4.7.2 海洋能开发利用技术	147	6.3.1 能源审计的背景及发展概况	237
4.8 氢能	148	6.3.2 能源审计的定义及类型	239
4.8.1 氢能的特性及制备方法	148	6.3.3 能源审计的依据、内容及方法	241
4.8.2 氢能的储存与输送	151	6.3.4 能源审计步骤及审计报告编写	246
4.8.3 氢能的应用前景	151	6.4 清洁生产审核	250
4.9 天然气水合物	153	6.4.1 清洁生产的概念及意义	250
4.9.1 天然气水合物简介	153	6.4.2 清洁生产审核的原理	253
4.9.2 世界上天然气水合物的分布	153	6.4.3 清洁生产审核的步骤及特点	256
4.9.3 我国天然气水合物开发现状	154	6.5 合同能源管理	258
思考题	155	6.5.1 合同能源管理的背景及释义	258
第5章 能源工程中的节能环保		6.5.2 合同能源管理的运作模式及	
技术	156	优势	260
5.1 节能原理及方法	156	6.5.3 节能服务公司(ESCO)的业务	
5.1.1 节能的定义及意义	156	程序	263
5.1.2 节能的基本原理	161	6.5.4 合同能源管理项目的优惠政策	266
5.1.3 节能的方法和途径	166	6.5.5 合同能源管理机制在我国的	
5.2 能源转换与利用节能技术	172	推广前景	267
5.2.1 重点耗能设备节能技术	173	6.6 其他能源管理新机制	269
5.2.2 工业余热回收节能技术	188	6.6.1 能效标准、能效标识与能效	
5.2.3 热泵系统节能技术	201	对标	269
5.3 能源工程中的环保技术	208	6.6.2 节能产品认证	276
5.3.1 我国环境污染现状及危害	208	6.6.3 电力需求侧管理	284
5.3.2 保护环境及防治污染的措施	217	6.6.4 碳交易及其管理	289
5.3.3 节约能源与保护环境的关系	219	思考题	297
思考题	221	参考文献	298



第 1 章

能源资源概述

1.1 能源与能量

能源不仅是人类社会生存与发展最为重要的物质基础，而且是发展社会生产力的基本条件。能源的开发利用程度是反映技术进步的重要标志。因而能源问题一直是世界各国普遍关注的重大问题，也是困扰工程技术人员的一大难题。随着常规能源的日益减少，如何更加高效合理地利用常规能源，开发和利用新能源尤其是可再生能源，是关系到全人类生存和发展的大事。

人类在认识和利用能源方面有四次重大突破，即火的发现、蒸汽机的发明、电能的使用、原子能的开发和利用。每次重大突破都推动了经济和科学技术的发展，而经济和科学技术的发展对能源的需求量又相应增加。例如，20世纪50年代世界总能耗为26亿t标准煤，70年代增长到72亿t标准煤，80年代增长到80亿t标准煤，到2013年，全球能源消费总量为168亿t标准煤。世界能源变化及发展趋势主要体现在两个方面，一是能源消费总量不断增长，二是能源结构不断变化，总的趋势是由传统化石能源向清洁能源或新能源转变。

在当今社会，一个国家要发展，要提高电气化、机械化和自动化水平，要改善人民的物质文化生活条件，就意味着要消耗更多的能源，因此，一个国家的人均能耗可直接反映国民生活水平的高低。20世纪90年代统计表明，工业发达国家约有11亿人口，消耗能量超过70亿t标准煤，平均每人约6t标准煤，而发展中国家约有28亿人口，人均消耗仅0.5t标准煤。可见，随着科技发展和人民生活水平的提高，发展中国家的人均能耗将大幅度增长。

我国既是能源生产大国，也是能源消耗大国，能源利用率较低，由此引起的环境污染和生态破坏问题比较严重。进入21世纪以来，我国的高速工业化和城市化又带来了能源消耗的迅猛增长。随着我国经济持续发展和人民生活水平的不断提高，能源短缺已成为制约经济发展的瓶颈。因此，从国家能源安全与能源战略的角度考虑，我国走节约能源与开发新能源两条并行之路势在必行。

1.1.1 能源的分类

能源是指煤炭、石油、天然气、生物质能和电力、热力等，能够直接或通过加工、转换



风能、太阳能、核能、地热能、海洋能、潮汐能等，称为一次能源。但能够直接用作终端能源（即通过用能设备供消费者使用的能源）使用的一次能源是很少的。天然气是少数几种可作为终端能源使用的一次能源之一。由一次能源经过加工或转换而成的能源产品，如煤气、石油制品、焦炭、电力、蒸汽、沼气、酒精、氢气等，称为二次能源。大部分一次能源均可转换成二次能源，这不仅会使生产或生活更方便（或为了满足生产工艺要求），而且使能源的用途更广，如电力和汽油。

一次能源转换成二次能源有不同的方法。例如，通过中心电站可生产电力，还可区域供热；石油通过不同的炼制工艺可转换成液体燃料——汽油、喷气燃料、柴油、石脑油等。能源转换设备多数情况下是能源系统的起点，为后续设备提供二次能源，如锅炉、核反应堆等；有时也是能源系统的终点，即在能源转换的同时也在消耗能源，如窑炉、空调器等；有时也则是能源系统的一个环节，即简单的机器，如电动机、风力机等。在一次能源转换成二次能源的过程中，无论如何都会有转换损失，把能源送到用户时还会有输送损失。能源系统的最后阶段是二次能源转换成终端使用的能源，即汽车、炉灶、计算机、灯泡等所用的能源。随后，终端能源变成有效能，能量实际上储存在产品中，或消耗于服务过程中。

一次能源按照能否再生又可分为可再生能源和不可再生能源两类。可再生能源，即不会随着它本身的转化或人类的利用而日益减少的能源，这类能源大都直接或间接来自于太阳，如太阳能、风能、水能、海洋温差能、潮汐能、生物质能、地热能等，是人类取之不尽、用之不竭的能源，“野火烧不尽，春风吹又生”，从字面上就说明了生物质能的可再生性。不可再生能源，是指随着人类的开发利用而变得越来越少的能源，如煤炭、石油、天然气、油页岩，以及核燃料铀、钍、钷等。能源的分类如图 1-3 所示。

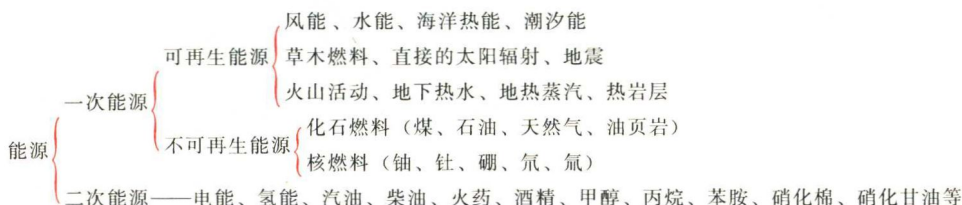


图 1-3 能源的分类

3) 能源按照性质可分为燃料能源和非燃料能源。燃料能源包括化石燃料（如煤、石油、天然气）、生物燃料（如柴草，沼气等）、化工燃料（如丙烷、甲醇、酒精等）和核燃料（如铀、钍）四种；非燃料能源包括机械能（如风能、水能、潮汐能等）、热能（如地热能，海水热能等）、光能（如太阳光能、激光能）和电能四种。

4) 按照使用技术的成熟程度和使用的普遍性，能源可分为常规能源和新能源。在一定的历史时期和科学水平条件下，已被人们广泛应用的能源称为常规能源。现阶段的常规能源包括煤炭、石油、天然气、水力和核裂变能，世界能源消费几乎全靠这五大能源来供应。许多能源需采用先进的技术才能加以利用，如太阳能、风能、海洋能、地热能、生物质能、核聚变能等，称之为新能源。这些能源尚未被大规模利用，有的尚处于研究阶段。可见，这里的“新”不是时间概念，而是意味着技术不成熟。从能源利用数量的观点看，人类社会经历了四个能源时期，即柴草时期、煤炭时期、石油时期和清洁能源时期。在不同的历史



时期，常规能源和新能源的分类是相对的。例如，原子核能在 20 世纪时还属于新能源，进入 21 世纪后，利用核裂变产生的原子能作为动力的发电技术已比较成熟，并得到广泛应用，因此核裂变能已成为常规能源。但核聚变能的和平利用仍存在大量技术难题，因此核聚变能仍被视为新能源。

5) 按照对环境有无污染，能源可分为：①清洁能源，如太阳能、风能、水能、氢能等；②非清洁能源，如化石燃料、核燃料等。

6) 按照能源本身的性质可分为：①含能体能源，是指集中储存能量的含能物质，如煤炭、石油、天然气和核燃料等；②过程性能源，是指物质运动过程产生和提供的能量，此能量存在于某一过程中，并随着物质运动过程的结束而耗散，如电能、风能、水能、海流能、潮汐能、波浪能、火山爆发、雷电、电磁能和一般热能等。目前，过程性能源尚不能大量地直接储存，因此，机动性强的现代交通运输工具（如汽车、轮船、飞机等）主要采用含能体能源（如柴油、汽油），无法直接大量使用过程性能源（如电能）。

1.1.2 能源可持续利用的评价指标

能源的来源不同，形式多种多样，各有优缺点，因此实现能源合理利用的方式也不同。为了正确地选择与利用能源，监测我国能源的可持续利用状况，必须建立一套能源可持续利用的评估指标体系，如图 1-4 所示。

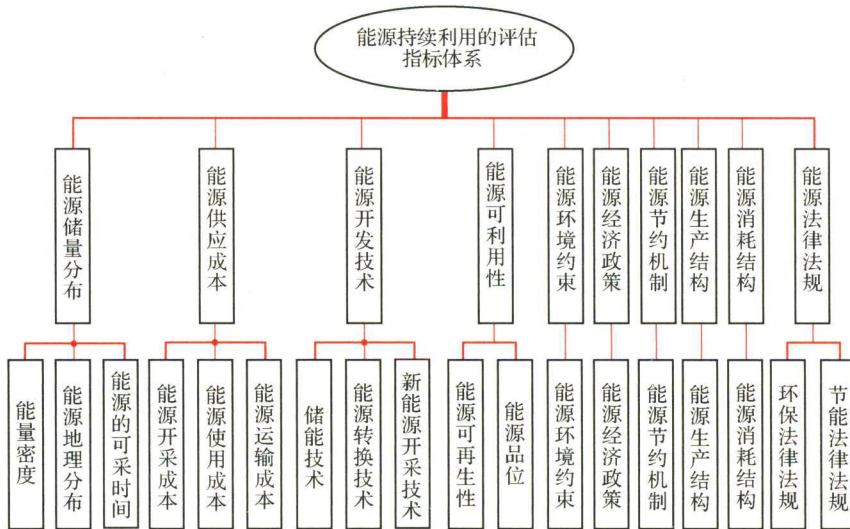


图 1-4 能源可持续利用的评估指标体系

根据对每个指标的分析、计算，对各种能源进行正确的评价，从而获得整个能源系统的评估结果，以此为依据来制定我国的能源发展战略。通常能源评价的指标包括以下几方面。

1. 能源储量分布

储量是指有经济价值的可开采的资源量或技术上可利用的资源量。作为能源的一个必要条件是储量要足够丰富，只有储量丰富且探明程度高的能源才有可能被广泛地应用。

(1) 能量密度 能量密度也称为能流密度，是指在一定的空间或面积内，从某种能源中所能得到的能量多少。如果能量密度很小，就很难用作主要能源。例如，太阳能和风能的



能量密度就很小，而各种化石能源的能量密度都比较大，核燃料的能量密度最大，可达到煤炭的几百万倍，此外，水能的能量密度与落差有关。几种能源的能量密度对比见表 1-1。我国水能资源比较丰富，在水电开发上具有很大的优势。许多河流的总落差都在 1000m 以上，主要大河流的总落差达 2000m~3000m，有的甚至达 4000m~5000m，如长江、黄河、雅鲁藏布江、澜沧江、怒江等，天然落差高达 5000m 左右，形成了一系列世界范围内落差很大的河流，这是我国得天独厚的资源条件。

表 1-1 几种能源的能量密度对比

能源类别	能量密度/(kW/m ²)	能源类别	能量密度/(kJ/kg)
风能(风速 3m/s)	0.02	天然铀	5.0×10^8
水能(流速 3m/s)	20	铀 235(核裂变)	7.0×10^{10}
波浪能(波高 2m)	30	氘(核聚变)	3.5×10^{11}
潮汐能(潮差 10m)	100	氢	1.2×10^5
太阳能(晴天平均)	1.0	甲烷	5.0×10^4
太阳能(昼夜平均)	0.16	汽油	4.4×10^4

(2) 能源的地理分布 能源的地理分布与能源的利用关系密切。如果能源的地理分布不合理，那么开发、运输和基本建设等费用都会大幅度增加。

1) 煤炭资源分布。从煤炭资源的分布区域看，山西、内蒙古、陕西、新疆、贵州和宁夏 6 个省（自治区）的煤炭资源最多；山西、陕北—内蒙古西部地区、新疆北部及川、黔、滇交界地区的煤炭资源分别占全国煤炭资源总量的 9.6%、38%、31.4% 和 5.3%，共计约占 84.3%；而沿海工农业发达的 13 个省（自治区）总共仅占总资源的 3.4%；其余省（自治区）约占 12.3%。

2) 风能资源分布。在我国西北、华北和东北的草原或戈壁地区，可以找到许多功率密度大、面积广阔的风电场厂址；东部和东南沿海及岛屿风能资源也比较丰富，东部沿海的风能资源丰富而且稳定；在离海岸较远的深海海域，风能资源更加丰富，随着深海风电技术的发展，那里的风能资源也将得到开发。

3) 水能资源分布。我国可开发的水能资源分布很不均匀，大部分集中在西南地区，其次在中南地区，经济发达的东部沿海地区的水能资源较少。

4) 燃气资源分布。我国天然气已探明储量达 38 万亿 m³，天然气探明储量主要集中在 10 个大型盆地，依次为渤海湾、四川、松辽、准噶尔、莺歌海-琼东南、柴达木、吐鲁番-哈密、塔里木、渤海、鄂尔多斯。我国煤层气资源量达 36.8 万亿 m³，居世界第三位，约占世界总量（240 万亿 m³）的 1/7。

我国用能量大的工业区主要分布在东部沿海。因此，我国能源的地理分布对能源利用非常不利，需要建设“北煤南运”“西气东输”“西电东送”等诸多大型能源输送工程，从而消耗大量人力、物力及能源，大大增加了用能成本。

(3) 能源的可采时间 截至 2016 年底，我国煤炭的剩余可采储量约为 1400 亿 t，石油的剩余可采储量约为 25.36 亿 t，天然气的剩余可采储量约为 5.44 万亿 m³。从人均拥有量来看，煤炭、石油和天然气分别为世界人均水平的 70%、10% 和 5%。按照目前剩余可采储量和能源消费量来看，煤炭还可以开采 40 年，石油还可以开采 13 年，天然气还可以开采 31 年。



2. 能源供应成本

(1) 能源开采成本 太阳能、风能、海洋能等不需要任何开采成本即可得到,但化石能源需要勘探、开采等各种复杂的过程才可获得,因此需要大量的开采成本。

(2) 能源使用成本 利用能源的设备费用正好与能源的开采费用相反,利用太阳能、风能、海洋能的设备费用远高于利用化石能源的设备费用。核电站的核燃料费远低于燃油电站,但其设备费用却高很多。

(3) 能源运输成本 运输费用与损耗是能源利用中需要考虑的一个问题。太阳能、风能和地热能很难输送出去;煤炭、石油等化石能源则容易从产地输送至用户;核电站燃料的运输费用极少。因此,与核电站的燃料运输费相比,燃煤电站的输煤费用很高。

可见,在对能源的供应成本进行评价时,能源的开采费用、利用能源的设备费用、运输费用都是必须考虑的重要因素,要进行综合的经济分析和评估。

3. 能源开发技术

(1) 能源转换技术 能源转换后,只有保证供能的连续性才能对其进行有效的利用,这要靠转换设备和相关技术来完成。目前,煤炭、水能、风能、核能都有成熟的设备及技术进行电能转换。

(2) 储能技术 大多数情况下,用户对能源的使用是不均衡的,例如,白天用电多,深夜用电少,冬天需要取暖,夏天需要制冷。因此,把不用时多余的能源储存起来、需要时又能立即供应非常重要。在储能方面,化石燃料很容易储存,而太阳能、风能、海洋能则较难做到,采用蓄冷设备、蓄热设备可储存少量电能。

(3) 新能源开发技术 新能源除了包括太阳能、风能、地热能、生物质能、海洋能以外,还包括天然气水合物、氢气、可控核聚变能等。天然气水合物主要蕴藏在水深 300m 以下的深海海底地层,全世界天然气水合物的储量可能超过已探明的石油、天然气和煤炭蕴藏量的总和,但目前的开发利用技术还很不成熟。氢燃料是一种优质、清洁的能源,目前利用太阳能和风能等制造氢燃料的技术已获得较大进展,氢燃料的利用技术正在走向实际使用阶段。

4. 能源可利用性

(1) 能源可再生性 煤炭、石油和天然气等化石能源一直是能源消费主体,但这些不可再生能源正在迅速枯竭,可再生能源如太阳能、生物质能、风能、水能等将获得快速的发展。据世界能源委员会的观点,未来可再生能源将成为世界主要能源消耗的重要构成,预计到 2050 年,可再生能源将占世界能源构成的 30% 左右,到 2100 年,它将占世界一次能源构成的 50% 左右。

(2) 能源品位 能源品位是指做功能力。例如,水的势能可以直接转换为机械能做功,再转换为电能也很容易通过电动机做功,其品位比先由化学能转变为热能、再由热能转换为机械能的煤炭要高。燃气的品位要比煤炭的品位高,燃气机组的起动速度高于燃煤机组的起动速度。在热机中,热源的温度越高,冷源的温度越低,循环的热效率就越高,因此,温度高的热源比温度低的热源品位高。在使用能源时,需要防止高品位能源被降级使用所产生的浪费现象。

5. 能源环境约束

使用能源时应尽可能采取各种措施来防止对环境的污染。众所周知,对环境产生污染的



主要是化石能源，而太阳能、风能、氢能等新能源基本上对环境没有污染。我国的能源供应以化石能源为主，能源消费对环境产生了严重的污染，目前已经引起政府和社会的高度重视。我国“十三五”期间的节能减排目标是，到2020年，全国万元国内生产总值能耗比2015年下降15%，能源消费总量控制在50亿t标准煤以内，其中非化石能源占一次能源消费比重达到15%，天然气比重达到10%以上，煤炭消费比重控制在62%以内，石油比重为13%；全国化学需氧量、氨氮（ $\text{NH}_3\text{-N}$ ）、二氧化硫、氮氧化物排放总量分别控制在2001万t、207万t、1580万t、1574万t以内，比2015年分别下降10%、10%、15%和15%。

6. 能源节约机制

我国从1998年开始实施《中华人民共和国节约能源法》，在工业节能方面还要制订一系列标准，包括电力、建筑、交通、化工、冶金等行业标准。电力作为煤炭的第一消费大户，其节能工作更为重要。我国节能服务产业产值从2004年的33.6亿元增长到了2013年的2155.6亿元，年均复合增长率为58.78%。作为节能服务产业发展的主要模式，合同能源管理市场发展迅速。2004年至2013年期间，我国合同能源管理总投资额从11.0亿元增长到742.3亿元，年均复合增长率为59.71%，节能量2559万t标准煤，占2013年全国节能能力目标（6000万t标准煤）的42.65%。

7. 能源生产结构

目前，我国的能源生产结构很不合理，主要以化石能源为主，核能及可再生能源所占比重较小。2016年，我国能源领域供给侧结构性改革初见成效，能源供给质量进一步提高。2016年原煤产量34.1亿t，全年原煤产量下降明显；全国原油产量为19969万t，同比下降6.9%；天然气产量稳定增长，全年常规天然气产量为1368亿 m^3 ，同比增长2.2%；发电量增长较快，电力生产结构进一步优化，非化石能源发电比重进一步提升，水电、风电、太阳能发电装机容量世界第一，2016年核能发电、风力发电、太阳能发电比重进一步提高，分别占全部发电量的3.5%、3.9%和1.0%，水力发电占19.4%。可见，加快发展新能源与可再生能源是今后能源发展的重点。

8. 能源消费结构

我国的能源资源储量结构、能源生产结构状况决定了能源消费结构在一定时期只能是以煤为主体。据统计，2015年我国煤炭消费量占能源消费总量的比重达63%，石油消费比重为18%，天然气消费比重为8%，水电、核电、风电等非化石能源消费比重为9%，其他可再生能源消费比重为2%。从能源消费比例来看，我国的清洁能源消费所占比重依然较低，能源消费对于煤炭的依赖性过高，需要改进。

9. 能源经济政策

为了保证能源生产结构和能源消费结构的合理性，政府需要出台有关经济政策进行正确的引导。我国已经开始这方面的工作，例如，2006年国家发展与改革委员会出台的《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》规定：风电等可再生能源发电优先上网，电网企业应当为可再生能源上网提供方便，并与发电企业签订并网协议和全额收购上网电量，风力发电项目上网电价按照招标形成的价格确定；水力发电项目上网电价按现行办法执行；生物质发电项目上网电价实行政府定价，由国务院价格主管部门分地区制定标杆电价。我国出台这样的经济政策，有利于调动社会对可再生能源投资开发的积极性。



10. 能源法律法规

(1) 环保法律法规 国家需要制定法律法规,公民应依法保护环境。例如,国务院划定了“两控区”——酸雨控制区和二氧化硫污染控制区。在以下地区新建燃煤电厂要求同步安装脱硫装置,并需对老厂加装脱硫装置,以抵消新建火电脱硫后 SO_2 排放增量,包括华北地区的北京、天津、山西、河北,西南地区的四川、重庆,华东的浙江、江苏省南部、安徽省南部,南方的广东、云南、广西、贵州等在控区以内的地区。在以下地区新建燃煤电厂原则上要求同步安装脱硫装置:东北的辽宁、吉林“两控区”内,山东,西北的陕西、甘肃、宁夏的“两控区”内,华中的河南、湖北、湖南,华东的江苏北部、安徽中北部、福建、江西等地区;在以下地区新建坑口燃煤电厂存在着目前不能同步安装脱硫装置、预留脱硫场地、分阶段建设脱硫设施的条件:东北的吉林、黑龙江“两控区”外,华北的内蒙古“两控区”,西北的陕西北部、甘肃、宁夏、青海“两控区”外,南方的云南、广西、贵州“两控区”外等。

(2) 节能法律法规 能源问题已经成为制约我国经济社会发展的重要因素,国家需要从能源战略的高度重视能源节约问题,从而推进节能降耗,提高能源利用效率。早在1984年,国家相关部门就编制了《中国节能技术政策大纲》,系统地提出了主要耗能行业的节能技术政策;为了推动全社会节约能源,提高能源利用效率,保护和改善环境,促进经济社会全面协调可持续发展,1998年1月1日正式实施《中华人民共和国节约能源法》,指出节能是国家发展经济的一项长远战略方针;为配合《中华人民共和国节约能源法》的实施,又陆续制定了配套法规和政策,如《节能中长期专项规划》《中国节能技术政策大纲》《重点用能单位节能管理办法》《节约用电管理办法》《民用建筑节能管理规范》《中国节能产品认证管理办法》等,使我国的节能步伐迈上了一个新的台阶;2006年,国务院制定了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》,并从国家“十一五”规划开始制订了具体节能减排目标。这些节能法律法规对于我国建设“资源节约型、环境友好型”社会具有巨大的推动作用。

通过以上能源可持续利用的评价指标说明及分析可以发现,能源既为社会经济发展提供动力,又受到资源、环境、社会、经济的制约,能源工业的整体发展水平关系到国民经济和社会生活的可持续发展,因此,能源工业的可持续发展具有重要的经济意义和社会意义。建立能源可持续利用的评价指标体系,能够描述能源的可持续发展状态,有效监控我国能源的发展状况,并能发现影响能源可持续发展的关键指标因素,以便于今后有针对性地采取改进措施。

1.1.3 能量的基本形式

能源只是一种能量的载体,人们利用能源实质上利用的是能量。在物理学中,能量是指物质做功的能力。而作为哲学概念,能量是一切物质运动、变化和相互作用的度量。因此,任何物质都可以转化为能量,但转化的难易程度差别很大。利用能量实质上是利用自然界的某一自发变化的过程来推动另一人为变化的过程。例如,水力发电,就是利用水从高处流向低处这一自发过程,把水的势能转换为动能推动水轮机转动,水轮机又带动发电机,通过发电机将机械能转换为电能,电能可转换为人们需要的其他能量形式。显然,能量的利用效率与转换过程和采用的设备技术等密切相关。



上述各种能源所包含的能量形式，归纳起来有以下六种。

(1) 机械能 机械能是物体宏观机械运动或空间状态变化所具有的能量，物体宏观机械运动或空间状态变化所具有的能量又分别可称为宏观的动能和势能。如空气的流动所形成的风能，水的自然落差所形成的水能等，都是人类最早认识和利用的机械能形式。具体而言，动能是指系统（或物体）由于机械运动而具有的做功能力。势能与物体的状态有关。如物体由于受重力作用，在不同高度的位置而具有不同的重力势能；物体由于弹性变形而具有弹性势能，在不同物质或同类物质不同相的分界面上，由于表面张力的存在而具有表面能。

(2) 热能 热能是构成物质的微观粒子不规则运动所具有的动能和势能的总和。粒子不规则运动包括粒子的移动、转动和振动，宏观上表现为温度的高低，反映了粒子不规则运动的剧烈程度。从表面上人们并不能感受到一个物体所含热能的多少，但可以明显分辨出物体的热或凉，也就是温度的高低。热能是人类使用最为广泛的基本能量形式，所有其他形式的能量都可以完全转换为热能。实际应用中有 85%~90% 的能量都要转换成热能后再加以利用，如常规能源中燃料含有的化学能一般需首先转化为热能，新能源中太阳能、核能均可转化为热能，地热能和海洋热能等本身含有的就是热能。地热能是地球上最大的热能资源。

(3) 化学能 化学能是物质结构能的一种，即在原子核外进行化学变化时释放出来的一种能量。按照化学热力学的定义，物质或物系在化学反应过程中以热能形式释放的内能称为化学能。人们普遍利用放热反应使化学能转变为热能。目前，化石燃料如煤炭、石油、天然气的燃烧是化学能转化为热能的典型过程，燃烧过程主要是碳和氢的化学变化，其基本反应式和释放的化学能为



化石燃料中的主要可燃成分是碳和氢。从反应式可见，燃烧相同质量的氢所释放的能量将近为碳的 4 倍，因此，燃料中含氢量越高越好。

(4) 电能 电能是由带电荷物体的吸力或斥力引发的能量，是和电子的流动与积累相关的一种能量。电能是目前人们使用最多也最方便的二次能源。目前使用的电能主要是由电池中的化学能或通过发电机由机械能转换而来的。另外，电能也可由光能、核能转换，或由热能直接转换（磁流体发电）。反之，电能通过电动机也可以转换为机械能，从而显示出电能的做功本领。若驱动电子流动的电动势为 U ，电流为 I ，则其电能 E_e 可表述为

$$E_e = UI \quad (1-3)$$

(5) 辐射能 辐射能包括电磁波、声波、弹性波、核射线所传递的能量。辐射能是人们接触最多而感受最少的能量形式，因为辐射能存在于无形之中。从理论上讲，任何物体只要其自身温度高于绝对零度（即 -273.15°C ），都会不停地向外发出辐射能。不同的是，高温物体（如太阳）发出的辐射能属于短波，而低温物体（如地表物体）发出的辐射能属于长波。太阳能是人类利用最多最典型的辐射能。具有温度 T （热力学温度）的物体均能发出热辐射，所发出的辐射能为

$$E = \sigma \varepsilon T^4 \quad (1-4)$$



式中, σ 为斯特藩—波耳兹曼常数 [$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$]; ε 为物体表面的热发射率。

(6) 核能 核能是蕴藏在原子核内部的物质结构能, 是由于物质原子核内结构发生变化而释放出来的巨大能量, 又称核内能。轻质量的原子核 (如氘、氚) 和重质量的原子核 (如铀) 其核子之间的结合力比中等质量原子核的结合力小, 两类原子核在一定条件下可以通过核聚变和核裂变转变为自然界更稳定的中等质量原子核, 同时释放出巨大的结合能即核能。因此, 核反应可分为核裂变和核聚变两种, 目前技术成熟的是利用核裂变的能量。1kg U^{235} 核裂变反应可释放出 $69.5 \times 10^{10} \text{ kJ}$ 的热能, 即使仅利用其中的 10%, 也相当于 2400t 标准煤的发热量。利用核反应释放的热能是新能源利用的一条重要的新途径, 目前核能主要是用来发电。值得注意的是, 核能的产生过程不遵守质量守恒和能量守恒定律, 在反应中都有所谓的“质量亏损”, 但这种质量和能量之间的转换遵守爱因斯坦质能方程

$$E = mc^2 \quad (1-5)$$

式中, E 为能量 (J); m 为物体的质量 (kg); c 为光速 ($c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$)。

实际上, 无论是化学反应还是核反应, 在产生和释放能量的过程中, 质量一定会相应减少。即反应物质量的一部分能够在某种类型的能量转换过程中, 转换为另一种形式的能量。

在国际单位制中, 能量、功及热的单位都是焦耳 (J), 单位时间内所做的功或吸收 (释放) 的热量称为功率, 单位是瓦特 (W)。在实际的能量转换和使用中, 焦耳和瓦特的单位都太小, 因而更多地使用千焦 (kJ) 和千瓦 (kW), 或兆焦 (MJ) 和兆瓦 (MW)。在能源研究中还会用到更大的单位, 有关的国际单位制词头见表 1-2。

表 1-2 能源中常用的国际单位制词头

幂	词头	国际代号	中文代号
10^{18}	艾[可萨](exa)	E	爱
10^{15}	拍[它](peta)	P	拍
10^{12}	太[拉](tera)	T	太
10^9	吉[咖](giga)	G	吉
10^6	兆(mega)	M	兆
10^3	千(kilo)	k	千
10^2	百(hecto)	h	百
10	十(deca)	da	十

在工程应用和有关能源的文献中, 还会见到其他一些单位, 如卡 (cal)、千卡 (kcal)、吨标准煤 (tce)、吨标准油 (toe)、百万吨标准煤 (Mtec)、百万吨标准油 (Mtoe) 等。它们与国际单位之间的关系是

$$1 \text{ kcal} = 4.186 \text{ kJ} \quad (1-6)$$

$$1 \text{ kg 标准煤 (kgce)} = 7000 \text{ kcal (千卡)} = 29300 \text{ kJ} \quad (1-7)$$

$$1 \text{ kg 标准油 (kgoe)} = 10000 \text{ kcal (千卡)} \quad (1-8)$$

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 860 \text{ kcal} = 3600 \text{ kJ} \quad (1-9)$$

据此可对有关数据进行换算。

标准煤亦称煤当量, 标准油也称油当量, 是将不同品种、不同含热量的能源按各自不同的含热量折合成为一种标准含热量的统一计算单位的能源。能源的种类不同, 计量单位也不同, 如煤炭、石油等按吨计算; 天然气、煤气等气体能源按立方米计算; 电力按千瓦时