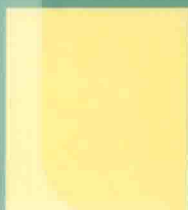
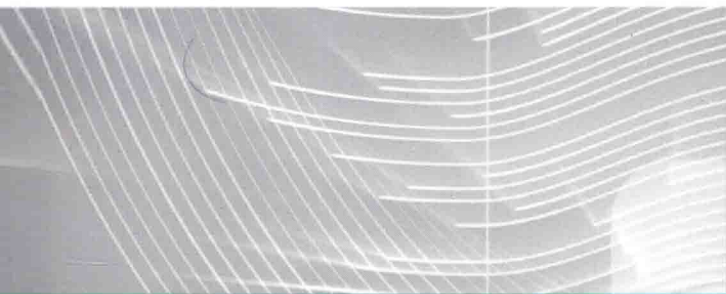


普通高等教育“十二五”规划教材

# 能源工程概论

吴金星 主编 赖艳华 刘泉 副主编



普通高等教育“十二五”规划教材

# 能源工程概论

主 编 吴金星  
副主编 赖艳华 刘 泉  
参 编 詹自力 刘利平 王任远  
主 审 孙晓林

机械工业出版社

随着世界经济的快速发展,能源在经济发展过程中的作用越来越突出。而人类常用的化石能源正在日渐枯竭,使能源成为制约各国经济发展的瓶颈。同时,化石能源的使用导致许多不良后果,如地球变暖、生态环境恶化、局部地区酸雨等,使人类的生存空间受到威胁。为了改善生态环境,更加高效合理地利用常规能源,开发和利用新能源,同时也为了维护国家能源安全,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形势,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,以及能源利用与环境保护的关系,并介绍了能源管理方法和新机制。本书兼顾专业性与通俗性,既适合作为高校教材,也适用于相关行业的技术及管理人员培训等,具有广泛的实用性。

#### 图书在版编目(CIP)数据

能源工程概论/吴金星主编. —北京:机械工业出版社, 2013. 12  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-111-44570-8

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(2013)第253671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 孙阳 冯铤

版式设计:霍永明 责任校对:陈立辉

封面设计:张静 责任印制:刘岚

北京中兴印刷有限公司印刷

2014年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.25印张·446千字

标准书号:ISBN 978-7-111-44570-8

定价:36.00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

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

# 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 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 等有害气体,造成生态环境恶化、地球变暖、局部地区酸雨等环境问题,使农作物减产、生态遭到破坏,人类的身体健康受到严重威胁。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,不但对能源动力类专业技术人员是必需的,而且对所有工科专业技术人员都是必需的,对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,以及能源利用与环境污染的关系,环境污染的防治措施等,阐述了能源管理方法和新机制,如固定资产投资项目节能评估和审查、清洁生产审核、企业能源审计、合同能源管理、节能产品认证、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,同时可供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、工程技术人员作为能源管理实施的参考书。

本书由郑州大学节能技术研究中心主任吴金星教授主编和统稿,由河南省节能监察局孙晓林高级工程师主审。本书具体编写分工为:吴金星负责编写第1、6章,山东大学赖艳华负责编写第2、4章,北京信息科技大学刘泉负责编写第3、5章。郑州大学詹自力参与编写了第1、4章部分内容,郑州大学刘利平参与编写了第3章部分内容,河南机电高等专科学校王任远参与编写了第6章部分内容。另外,郑州大学研究生李娜、朱登亮、乔慧芳、李泽、尹凯杰、潘彦凯、李俊超、郭桂宏、李亚飞、张灿、许克、王力等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。

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
1.1.6 能源在国民经济中的 地位和作用	13
1.1.7 能源与经济的可持续发展	16
1.2 我国的能源资源及能源结构	18
1.2.1 我国的能源资源概况	19
1.2.2 我国的能源结构	28
1.3 我国的能源形势与发展战略	31
1.3.1 我国的能源形势	31
1.3.2 我国的能源发展战略	35
1.3.3 我国的能源发展目标	36
思考题	38
第2章 能量的转换与储存	39
2.1 能量的转换原理与效率	39
2.1.1 能量转换的方式	39
2.1.2 能量转换的基本原理	40
2.1.3 能量转换的效率	42
2.2 能量转换的形式与设备	44
2.2.1 化学能转换为热能	44
2.2.2 热能转换为机械能	48
2.2.3 机械能转换为电能	63
2.3 能量的储存技术	64
2.3.1 机械能储存技术	65
2.3.2 热能储存技术及其应用	66
2.3.3 化学能储存技术	71
2.3.4 电能储存技术	71
思考题	73
第3章 常规能源的高效利用	74
3.1 概述	74
3.2 煤炭	75
3.2.1 煤炭高效清洁利用总论	75
3.2.2 煤炭洁净加工技术	80
3.2.3 煤炭清洁转化技术	83
3.2.4 先进煤炭燃烧发电及非传统煤基 发电技术	91
3.2.5 煤炭燃烧中及烟气的 净化处理	99
3.3 石油	99
3.3.1 石油概述	99
3.3.2 炼油工业的发展历程及前景	101
3.3.3 原油的加工方案	103
3.3.4 石油炼制	104
3.3.5 油品结构调整	108
3.4 天然气	109
3.4.1 天然气概述	109
3.4.2 天然气利用技术	110
3.5 水能	114
3.5.1 水能概述	114
3.5.2 水力发电的发展	118
3.5.3 水力发电技术	120
3.6 电能	121
3.6.1 电能概述	121
3.6.2 电能输送	122
3.6.3 电能储存	124
3.6.4 科学管理及计划用电	125
3.6.5 企业合理用电	126
3.6.6 电力工业发展前景	129
思考题	131
第4章 新能源的开发利用	132
4.1 新能源开发利用的意义	132
4.2 太阳能	134
4.2.1 太阳能简介	134
4.2.2 太阳能利用原理	136
4.2.3 太阳能集热器	136
4.2.4 太阳能热水器	139

4.2.5 太阳能制冷和空调	140	5.1.2 环境污染的定义及类型	187
4.2.6 太阳能热发电	141	5.1.3 能源利用造成的环境污染形式	188
4.2.7 太阳能光伏发电	143	5.1.4 我国环境污染现状及危害	191
4.2.8 太阳能的应用前景	144	5.2 环境保护的措施	197
4.3 风能	146	5.2.1 保护环境及防治污染的措施	197
4.3.1 认识风能	146	5.2.2 节约能源与保护环境的关系	199
4.3.2 风能的利用	147	5.3 我国的环境保护现状及发展动向	202
4.3.3 风电技术的发展趋势	149	5.3.1 我国的环境保护现状	202
4.4 生物质能	151	5.3.2 我国当前的环境保护发展动向	206
4.4.1 生物质能概述	151	思考题	207
4.4.2 生物质能利用技术	153	第6章 能源管理方法与新机制	208
4.4.3 我国生物质能开发利用现状	155	6.1 能源管理概述	208
4.4.4 生物质能在车用燃料上的应用	156	6.1.1 能源管理方法和内容	208
4.4.5 国际上生物质能开发利用概况	158	6.1.2 能源管理新机制	212
4.5 核能	158	6.2 节能评估和审查	213
4.5.1 核能概述	158	6.2.1 节能评估和审查的背景及意义	213
4.5.2 核反应堆的类型、结构及运行	160	6.2.2 节能评估的依据与方法	215
4.5.3 核能的和平利用前景	164	6.2.3 节能评估报告的主要内容与编制	216
4.6 地热能	167	6.3 清洁生产审核	221
4.6.1 地热能的来源	167	6.3.1 清洁生产的概念及意义	221
4.6.2 地热资源的分类及特征	168	6.3.2 清洁生产审核的原理	224
4.6.3 地热资源的开发利用	170	6.3.3 清洁生产审核的步骤及特点	226
4.7 海洋能	173	6.4 企业能源审计	228
4.7.1 认识海洋能	173	6.4.1 能源审计的背景及发展概况	228
4.7.2 海洋能的类型及特点	173	6.4.2 能源审计的定义及类型	231
4.7.3 海洋能的开发利用	175	6.4.3 能源审计的依据、内容及方法	234
4.8 氢能	176	6.4.4 能源审计的步骤及审计报告编写	238
4.8.1 氢能的特性	176	6.5 合同能源管理	242
4.8.2 氢的制备方法	177	6.5.1 合同能源管理的产生及概念	242
4.8.3 氢能的储存与输送	180	6.5.2 合同能源管理的运作模式及优势	244
4.8.4 氢能的应用及展望	181	6.5.3 节能服务公司的业务程序	247
4.9 天然气水合物	183	6.5.4 合同能源管理机制的奖励政策	250
4.9.1 天然气水合物的形成与特点	183	6.5.5 合同能源管理机制在我国的推广前景	251
4.9.2 世界上天然气水合物的分布	184		
4.9.3 天然气水合物在中国的状况	184		
思考题	185		
第5章 能源利用与环境保护	186		
5.1 我国环境污染概况	186		
5.1.1 环境问题产生的原因	186		

6.6 其他能源管理新机制 ..... 252

6.6.1 节能自愿协议 ..... 252

6.6.2 能效标准与能效标识 ..... 258

6.6.3 节能产品认证 ..... 265

6.6.4 电力需求侧管理 ..... 272

6.6.5 清洁发展机制 ..... 277

思考题 ..... 281

参考文献 ..... 283

# 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，如何更高效更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。从 20 世纪 70 年代初中东爆发石油危机以来，节能降耗和开发新能源已成为世界各国经济发展的核心问题。40 多年来虽取得了一定成效，但欠发达国家和地区的能源利用率仍然很低。

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，一个国家人均能耗的多少，可直接反映出国民生活水平的高低。按 20 世纪 90 年代统计，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 6 t 标准煤，而发展中国家约有 28 亿人，人均消耗仅 0.5 t 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、转换而取得有用能的各种资源，是能量的载体。人们能够利用的能源形式很多，例如矿物能源（又称化石能源或化石燃料，包括煤、石油、天然气、油页岩等）、水力能、太阳能、风能、原子核能、地热能、海洋温差能、潮汐能及生物质能等。其中，太阳蕴含的能量最大，它每年投射到地球表面上的能量是人类每年所消耗能量的上万倍，而且它是无污染、可再生的能源。但由于技术原因，人类目前使用的能源仍以矿物能源为主。地球表面能源流动如图 1-1 所示。不论来自何方，能源的最终去向只有一个，那就是散失于宇宙空间。



能源在自然界存在的形式多种多样，也有多种分类方法，概括起来有以下六种：

1) 按照能源的来源可分为：① 来源于太阳。除了直接来自太阳的辐射能以外，煤炭、石油、天然气及生物质能、水能、风能和海洋能等追根溯源也都间接地来源于太阳。② 来源于地球自身。一种是以热能形式储存于地球内部的地热能（如地下蒸汽、热水和干热岩体）；另一种是地球上的铀、钍等放射性核燃料所发出的能量，即原子核能。③ 来源于月球和太阳等天体对地球的引力，以月球引力为主，如海洋的潮汐能。能源的来源如图 1-2 所示。

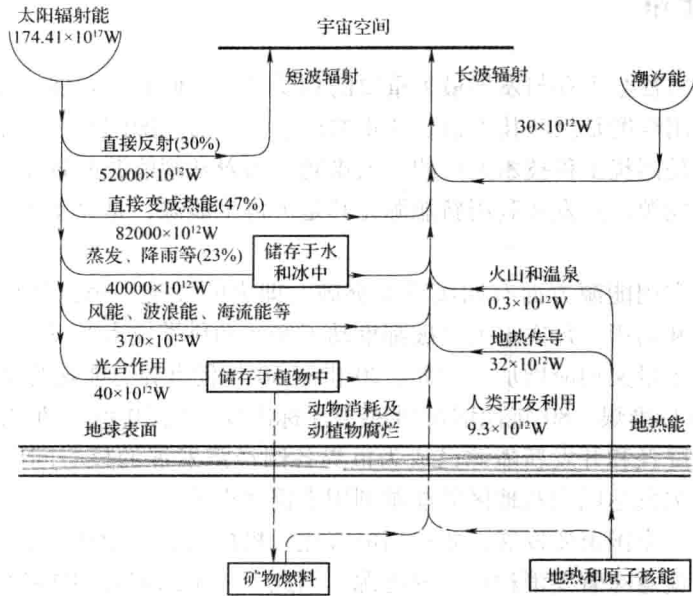


图 1-1 地球表面的能源流动

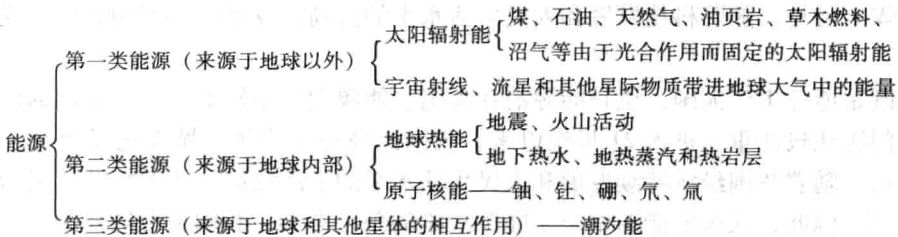


图 1-2 能源的来源

2) 自然界中的能源按照成因或是否经过转换可分为：一次能源和二次能源。以现成的形式存在于自然界，未经加工和转换的能源，如煤炭、石油、天然气、植物燃料、水能、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）的一次能源是很少的。天然气是少数几种可作为终端能源的一次能源之一。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，例如电力和汽油。

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、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；有时则是能源系统的一个环节，即简单的机器，如电动机或风力机等。一次能源转换成二次能源无论如何都会有转换损失，把能源送到用户还会有输送损失。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两类：可再生能源和不可再生能源。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，例如太阳能、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”，从字面上理解说明了生物质的可再生性。不可再生能源，是指随着人类的开发利用而越来越少的能源，例如煤炭、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。

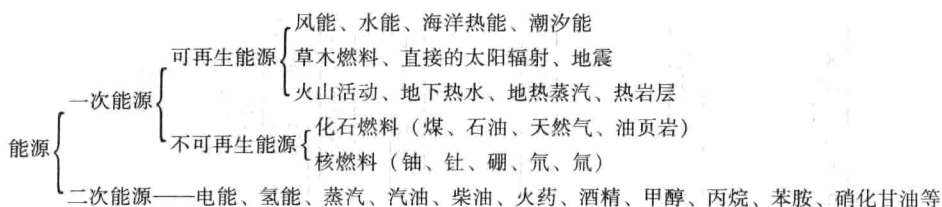


图 1-3 能源的分类

3) 能源按照性质可分为：燃料能源和非燃料能源。燃料能源包括矿物燃料（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) 按照使用的技术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，称之为常规能源。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，人类社会经历了三个能源时期，即柴草时期、煤炭时期和石油时期，正在走向新能源时期。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，因而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：清洁能源，如太阳能、风能、水能、氢能等；非清洁能源，如矿物燃料、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结束而耗散，如电能、风能、水能、海流、潮汐、波浪、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，因而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。

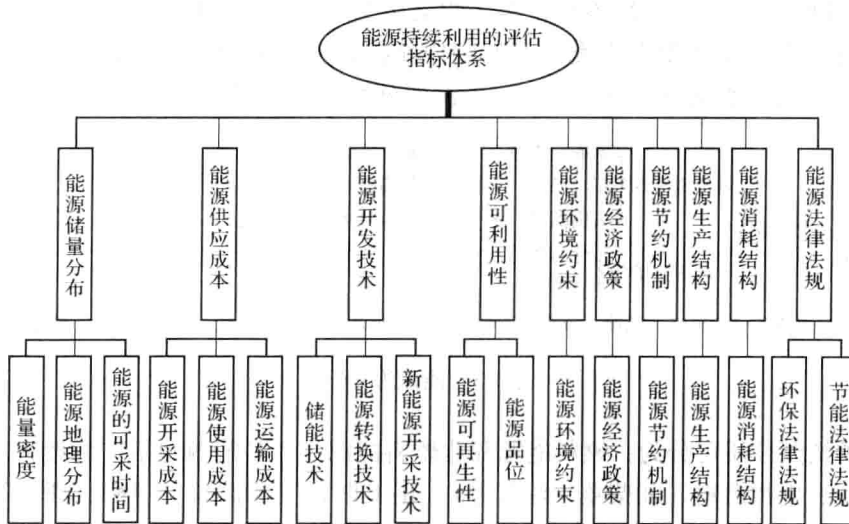


图 1-4 能源可持续利用的评估指标体系

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，以此为依据来制订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 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，而各种矿物能源的能量密度都比较大，核燃料的能量密度最大，达到煤炭的几百万倍。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 1 000 m 以上，主要大河流的总落差达 2 000 ~ 3 000 m，有的甚至达 4 000 ~ 5 000 m，例如长江、黄河、雅鲁藏布江、澜沧江、怒江等，天然落差高达 5 000 m 左右，形成了一系列世界上落差很大的河流，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 <sup>2</sup> )	能源类别	能量密度/ (kJ/kg)
风能 (风速 3m/s)	0.02	天然铀	$5.0 \times 10^8$
水能 (流速 3m/s)	20	铀 235 (核裂变)	$7.0 \times 10^{10}$
波浪能 (波高 2m)	30	氘 (核聚变)	$3.5 \times 10^{11}$
潮汐能 (潮差 10m)	100	氢	$1.2 \times 10^5$
太阳能 (晴天平均)	1.0	甲烷	$5.0 \times 10^4$
太阳能 (昼夜平均)	0.16	汽油	$4.4 \times 10^4$

(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。能源的地理分布不合理, 则开发、运输、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、陕北-内蒙古西部地区、新疆北部及川、黔、滇交界地区这 4 个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。我国西北、华北和东北的草原或戈壁地区可以找到许多风功率密度大、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; 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, 也将在远期开发。

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。我国是世界上第二大拥有煤层气资源的国家, 目前已探明储量 31 万亿 m<sup>3</sup>, 约占世界总量 (240 万亿 m<sup>3</sup>) 的 1/8, 与天然气资源量大体相当; 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 据 2006 年理论推测, 我国煤炭的剩余可采储量约为 1 100 亿 t, 石油的剩余可采储量约为 24 亿 t, 天然气的剩余可采储量约为 2 万亿 m<sup>3</sup>。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 60 年, 石油还可以开采 18 年, 天然气还可以开采 40 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, 但各种化石能源需要勘探、开采等各种复杂的过程, 因而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有效地利用，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 新能源的开发除了太阳能、风能、地热能、生物质能、海洋能等以外，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 300 m 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，但目前开发利用技术还很不成熟。氢燃料作为一种优质、清洁的能源，将和电能一起并列成为二次能源的两大支柱。目前，利用太阳能和风能等制造氢燃料技术已获得较大进展，氢燃料的利用技术正在走向实用阶段。

### 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。预计到 2050 年，太阳能和生物质能等可再生新能源将占世界能源构成的 30% 左右；到 2100 年，可再生新能源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，则循环的热效率就越高，因此，温度高的热源品位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，对环境产生污染主要是化石能源，而太阳能、风能、氢能等新能源基本对环境无污染。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，目前已引起了政府和社会的高度重视。我国“十二五”期间的节能减排目标是，到 2015 年，全国万元国内生产总值能耗下降 16%；化学需氧量和二氧化硫排放总量分别比 2010 年下降 8%；氨氮（ $\text{NH}_3\text{-N}$ ）和氮氧化物排放总量分别比 2010 年下降 10%。

### 6. 能源节约机制

我国已经实施了《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“十一五”期间淘汰了高耗能机组，包括大电网覆盖范围内服役期满的单机容量在10万kW以下的常规燃煤凝汽火电机组，单机容量5万kW及以下的常规小火电机组，以发电为主的燃油锅炉及发电机组（5万kW及以下）。国家能源局权威人士表示，“十一五”期间，我国累计关停了总量达7200万kW的小火电机组，2010年与2005年相比，火电供电煤耗（标准煤）由370g/(kW·h)降到333g/(kW·h)，下降10.0%。在“十二五”期间，电力行业的节能降耗行动还将继续，关停小火电机组无疑也将继续推行。

### 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例较小。据统计，2005年我国能源生产结构为：煤炭77.13%、原油12.59%、水电6.32%、天然气3.13%、核电0.83%。从2005年的电能生产情况看，其结构也很不合理，燃煤火力发电所占比例过高，水电、核电、生物质等发电的比例过低。在总装机容量中，火电占75.6%，水电占22.7%，核电占1.32%，生物质等发电占0.38%。事实上，我国水电资源蕴藏量居世界第一，理论蕴藏量的总规模为6.89亿kW，技术可开发量为4.93亿kW，经济可开发量为3.95亿kW。按照2005年年底我国水电装机容量计算，只占技术可开发量的24%。可见，我国需要加快发展新能源与可再生能源。

### 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炭为主体。据统计，2005年我国能源消费结构为：煤炭69.62%、原油21.06%、水电5.84%，天然气2.72%，核电0.76%。然而，有数据显示，2005年全世界能源的消费结构为：原油36.4%、煤炭27.8%、天然气23.5%、水电6.3%、核能6%。可见，我国能源消费对于煤炭的依赖性过高，需要改进。2006至今，我国煤炭消费总体呈下降趋势，但其占比仍然维持在65%以上；石油消费总体呈缓慢上升的趋势，但其上升幅度不是太大，近年来都在25%上下浮动；天然气占比没有明显的上升或下降趋势，长时间内在2%左右徘徊；水电、核电及其他能源所占比例总体上呈现出缓慢上升的趋势。由此可见，我国能源消费严重依赖煤炭，石油消费虽有所增长，但与发达国家的石油所占比例相比差距很大。表1-2是根据《BP世界能源统计2006》计算得出的我国1996~2005年能源的生产结构和消费结构。

表1-2 我国1996~2005年能源的生产结构和消费结构

年份	生产总量/ 百万吨标准油	构成比例(%)					生产总量/ 百万吨标准油	构成比例(%)				
		煤炭	石油	天然气	水电	核电		煤炭	石油	天然气	水电	核电
1996年	925.5	75.98	17.13	1.96	4.59	0.35	965.1	75.59	18.01	1.67	4.40	0.33
1997年	918.2	75.15	17.44	2.22	4.84	0.36	960.5	72.86	20.40	1.78	4.6	0.34
1998年	860.2	73.09	18.62	2.44	5.48	0.37	916.9	71.70	21.49	1.93	5.1	0.35
1999年	878.3	73.54	18.24	2.58	5.25	0.39	934.1	70.25	22.44	2.01	4.9	0.36
2000年	897.9	73.14	18.11	2.73	5.6	0.42	966.7	69.05	23.13	2.21	5.2	0.39
2001年	956.5	72.93	17.23	2.85	6.57	0.42	1000.0	68.12	22.79	2.41	6.2	0.40
2002年	1000.9	73.30	16.67	2.94	6.51	0.57	1057.8	67.48	23.39	2.43	6.1	0.54
2003年	1143.5	75.94	14.83	2.75	5.61	0.86	1228.7	69.43	22.11	2.43	5.2	0.80
2004年	1309.7	76.91	13.29	2.82	6.11	0.87	1432.5	68.71	22.40	2.47	5.6	0.80
2005年	1436.1	77.13	12.59	3.13	6.32	0.83	1554.0	69.62	21.06	2.72	5.8	0.76

## 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，电价标准由各省（自治区、直辖市）2005年脱硫燃煤机组标杆上网电价加补贴电价组成，标准为0.25元/（kW·h）；太阳能、海洋能、地热能发电项目上网电价按照合理成本加合理利润的原则分项目制定。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 国家需要制订环保法律法规，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，要求在“两控区”内2015年SO<sub>2</sub>排放基数相对于2010年削减7%。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<sub>2</sub>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。2006年8月31日发布的《国务院关于加强节能工作的决定》指出，到“十一五”期末，万元国内生产总值（按2005年价格计算）能耗下降到0.98吨标准煤，比“十五”期末降低20%左右，平均年节能率为4.4%。重点行业主要产品单位能耗总体达到或接近本世纪初国际先进水平。建立固定资产投资项目节能评估和审查制度。对未进行节能审查或未能通过节能审查的项目一律不予审批、核准，从源头杜绝能源的浪费。

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性因素，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，

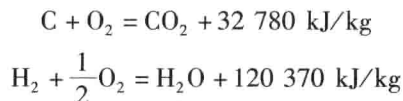
任何物质都可以转化为能量，但转化的难易程度差别很大。利用能量实质上是利用自然界的某一自发变化的过程来推动另一人为变化的过程。例如，水力发电，就是利用水从高处流向低处这一自发过程，把水的势能转换为动能推动水轮机转动，水轮机又带动发电机，通过发电机将机械能转换为电能，电能可转换为人们需要的其他能量形式。显然能量的利用效率与转换过程和采用的设备技术等密切相关。

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，又分别可称为宏观的动能和势能。如空气的流动形成风能，水的自然落差所形成的水能等，都是人类认识和利用最早的机械能形式。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。从表面上我们并不能感受到一个物体所含热能的多少，但我们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。地热能是地球上最为庞大的热能资源。

(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，矿物燃料如煤炭、石油、天然气的燃烧是化学能转化热能的典型过程，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：



矿物燃料中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约为碳的 4 倍，所以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为方便的二次能源。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。如驱动电子流动的电动势为  $U$ ，电流强度为  $I$ ，则其电能  $E_e$  可表述为

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

(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。辐射能是我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  $-273.15^\circ\text{C}$ ），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的最典型的辐射能。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

$$E = \sigma \varepsilon T^4 \quad (1-2)$$

式中,  $\sigma$  为斯忒藩—波耳兹曼常数 [ $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ];  $\varepsilon$  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  $\text{U}^{235}$  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 2 400 t 标准煤的发热量。利用核反应释放的热能是一条重要的新能源利用新途径, 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

$$E = mc^2 \quad (1-3)$$

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, 有关的国际制词冠见表 1-3。

表 1-3 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	艾
$10^{15}$	拍它 (peta)	P	拍
$10^{12}$	太拉 (tera)	T	太
$10^9$	吉伽 (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, 还会见到一些其他单位, 如卡 (cal)、千卡 (kcal)、吨标准煤 (tec)、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

$$1 \text{ kcal} = 4.186 \text{ kJ} \quad (1-4)$$

$$1 \text{ kg 标准煤 (kgce)} = 7\,000 \text{ kcal (千卡)} = 29\,300 \text{ kJ} \quad (1-5)$$