



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

NENGYUAN JINGJIXUE

能源经济学

黄素逸 龙妍 编著



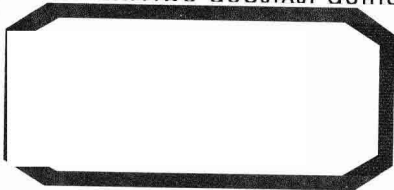
中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Thermal Energy & Power



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI



NENGYUAN JINGJIXUE

能源经济学

编著 黄素逸 龙 妍
主审 郑楚光 刘 伟



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Thermal Energy & Power

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

能源是国民经济的基础，在社会可持续发展中起着举足轻重的作用。本书详细地阐述了能源的基本知识、技术经济基础知识和各种经济效果的评价方法。在此基础上，对能源经济中的重要问题进行了深入讨论，包括能源有效利用的分析方法（热平衡分析法、焓分析法、总能系统分析等），能源建设的不确定性分析，节能的技术经济分析，能源方案的技术经济评价（能源技术方案的技术经济评价、能源建设项目的技术经济分析等）。作为现代能源经济学的重要部分，书中还介绍了能源市场，能源系统中物质流、能量流与信息流的协同及能源与循环经济。

本书取材新颖、内容丰富，既可作为普通高等院校能源动力类专业本科和研究生的教材，也可供有关工程技术人员和管理干部参考。

图书在版编目（CIP）数据

能源经济学 / 黄素逸，龙妍编著. —北京：中国电力出版社，2010.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5123-0208-2

I. ①能… II. ①黄… ②龙… III. ①能源经济—高等学校—教材 IV. ①F407.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 042241 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 8 月第一版 2010 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.25 印张 394 千字
定价 26.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 能量与能源.....	1
第二节 能量转换原理.....	10
第三节 世界能源状况.....	18
第四节 能源与环境保护.....	24
第五节 能源经济学概述.....	32
第二章 技术经济基础	40
第一节 技术经济分析的基本要素.....	40
第二节 资金的时间价值及其等值计算.....	47
第三节 技术经济的可比性.....	52
第四节 可行性研究和价值分析.....	53
第三章 经济评价的基本方法	55
第一节 经济评价指标和方法的分类.....	55
第二节 投资回收期法.....	56
第三节 现值法.....	58
第四节 年值法.....	59
第五节 收益率法.....	60
第六节 经济评价指标和方法的选择.....	62
第四章 能源有效利用的分析方法	64
第一节 综述.....	64
第二节 能源有效利用的评价指标.....	64
第三节 热平衡分析法.....	66
第四节 焓分析法.....	72
第五节 热经济学分析法.....	75
第六节 总能系统分析.....	78
第五章 能源建设的不确定性分析	85
第一节 能源建设项目.....	85
第二节 能源建设项目的评价和分析.....	89
第三节 不确定性分析的方法.....	93
第四节 盈亏平衡分析方法.....	94
第五节 敏感性分析方法.....	98
第六节 概率分析方法.....	102
第七节 某能源利用项目不确定性分析.....	104

第六章 节能的技术经济分析	107
第一节 节能概述.....	107
第二节 节能经济评价的常用方法.....	118
第三节 节能技术改造项目的技术经济评价.....	119
第四节 设备更新项目的技术经济评价.....	120
第七章 能源方案的技术经济评价	124
第一节 能源技术方案的技术经济评价.....	124
第二节 能源建设项目的技术经济分析.....	127
第八章 能源市场	136
第一节 有关市场的知识.....	136
第二节 煤炭市场.....	140
第三节 石油市场.....	156
第四节 天然气市场.....	172
第五节 电力市场.....	184
第九章 能源系统中物质流、能量流与信息流的协同	196
第一节 能源系统.....	196
第二节 物质流、能量流与信息流的基本特性.....	200
第三节 物质流、能量流与信息流的协同机理.....	211
第四节 物质流、能量流与信息流的协同控制.....	219
第十章 能源与循环经济	226
第一节 循环经济概述.....	226
第二节 循环经济发展的国内外实践经验.....	231
第三节 能源的可持续发展.....	241
参考文献	251

第一章 绪 论

第一节 能量与能源

一、能量

物质和能量是构成客观世界的基础。科学史观认为，世界是由物质构成的，没有物质，世界便虚无缥缈。运动是物质存在的形式，是物质固有的属性。没有运动的物质正如没有物质的运动一样是不可思议的，能量则是物质运动的度量。由于物质存在各种不同的运动形态，因此能量也就具有不同形式。众所周知，各种运动形态是可以互相转化的，所以各种形式的能量之间也能够相互转换。各种能量相互转换是人类在实践中的最伟大的发现之一，也正是不同形式的能量利用和转换促进了人类的文明。

宇宙间一切运动着的物体都有能量的存在和转化。人类一切活动都与能量及其使用紧密相关。所谓能量，广义地说，就是“产生某种效果（变化）的能力”。反过来说，产生某种效果（变化）的过程必然伴随着能量的消耗或转化。倘若任何效果和变化都没有，那么世界也就不存在了。如果说劳动创造了世界，那么这种创造首先就是从能量的使用开始的。

科学史观还认为，物质是某种既定的东西，既不能被创造也不能被消灭，因此作为物质属性的能量也一样不能创造和消灭。试想，如果我们创造或消灭了任何能量，岂不意味着与之相伴的某种物质也被创造或消灭了吗？能量守恒定律正是反映了物质世界中运动不灭这一事实。这个定律告诉我们“自然界一切物质都具有能量。能量不可能被创造也不可能被消灭，而只能在一定条件下从一种形式转变为另一种形式，在转换中能量总量恒定不变”。

1922年爱因斯坦揭示了能量和物质质量之间的关系，即

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

式中： E 为物质释放的能量，J； m 为转变为能量的物质的质量，kg； c 为光速， $3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

上式表示的是一个可逆过程，其前提是质量和能量的总和在任何能量的转换过程中都必须保持不变。

从式(1-1)可以看出，一个很小的质量消失后，都能够产生巨大的能量。例如一个功率为600MW的燃煤发电厂，不停地工作，每小时耗煤约220t，每年耗煤约2Mt；而一个600MW的核电站，也不停地工作，每年仅耗1t燃料铀。但从能量转换的角度而言，在上述两个不同的发电设备中，实际转变为能量的燃料质量，每年仅为640g左右。因此，无论是化学反应还是核反应，在产生或释放能量的过程中，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，能量的单位，功及热量的单位通常都用焦(J)表示，而单位时间内所做的功或吸收(释放)的热量则称之为功率，单位为瓦(W)。因为在能量的转换和使用中焦和瓦的单位都太小，因此更多的是用千焦(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。有关国际制的词冠见表1-1。

表 1-1 能源中常用的国际制词冠

幂	词冠	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

在工程应用和一些有关能源的文献中，还会见到其他一些单位，如卡、大卡、标准煤当量、标准油当量、百万吨煤当量 (Mtce)、百万吨油当量 (Mtoe) 等。它们与国际单位之间的关系是： $1\text{cal}=4.186\text{J}$ ； 1kg 标准煤当量 (kgce) = 7000kcal ； 1kg 标准油当量 (kgoe) = $10\,000\text{kcal}$ 。据此可对有关数据进行换算。

二、能量的形式

作为一个哲学上的概念，能量是一切物质运动、变化和相互作用的度量。利用能量从实质上讲就是利用自然界的某一自发变化的过程来推动另一人为的过程。例如水力发电就是利用水会自发地从高处流往低处的这一自发过程，使水的势能转化为动能，再推动水轮机转动，水轮机又带动发电机，通过发电机将机械能转换为电能供人类利用。显然，能量利用的优劣、利用效率的高低与具体过程密切相关，而且利用能量的结果必然和能量系统的始末状态相联系。例如水力发电系统通过消耗一部分水能来获得电能，系统的始末状态（如水位、流量等）都发生了变化。

对能量的分类方法没有统一的标准，到目前为止，人类认识的能量有六种形式。

1. 机械能

机械能是与物体宏观机械运动或空间状态相关的能量，前者称之为动能，后者称之为势能。它们都是人类最早认识的能量形式。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。如果质量为 m 的物体的运动速度为 v ，则该物体的动能 E_k 可以用下式计算：

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-2)$$

势能与物体的状态有关，除了受重力作用的物体因其位置高度不同而具有所谓重力势能外，还有弹性势能，即物体由于弹性变形而具有的做功本领；以及所谓表面能，即不同类物质或同类物质在不同相的分界面上，由于表面张力的存在而具有的做功能力。重力势能 E_p 可以用下式计算：

$$E_p = mgH \quad (1-3)$$

式中： m 为物体的质量； g 为重力加速度； H 为高度。

弹性势能 E_r 的计算公式为

$$E_r = \frac{1}{2} kx^2 \quad (1-4)$$

式中： k 为物体的弹性系数； x 为物体的变形量。

表面能 E_s 可用下式计算：

$$E_s = \sigma S \quad (1-5)$$

式中： σ 为表面张力系数； S 为相界面的面积。

2. 热能

热能是能量的一种基本形式，所有其他形式的能量都可以完全转换为热能，而且绝大多数的一次能源都是首先经过热能形式而被利用的，因此热能在能量利用中有重要意义，也是本书讨论的重点。构成物质的微观分子运动的动能和势能总和称之为热能。这种能量的宏观表现是温度的高低，它反映了分子运动的激烈程度。若系统熵的变化为 ds ，则热能 E_q 可表述成如下的形式：

$$E_q = \int T ds \quad (1-6)$$

3. 电能

电能是和电子流动与积累有关的一种能量，通常是由电池中的化学能转换而来，或是通过发电机由机械能转换得到的；反之电能也可以通过电动机转换为机械能，从而显示出电做功的本领。如果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

$$E_e = UI \quad (1-7)$$

4. 辐射能

辐射能是物体以电磁波形式发射的能量。物体会因各种原因发出辐射能，其中从能量利用的角度而言，因热的原因而发出的辐射能（又称热辐射能）是最有意义的，例如地球表面所接受的太阳能就是最重要的热辐射能。物体的辐射能 E_r 可由下式计算：

$$E_r = \varepsilon c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1-8)$$

式中： ε 为物体的发射率； c_0 为黑体辐射系数； T 为物体的绝对温度。

5. 化学能

化学能是物质结构能的一种，即原子核外进行化学变化时放出的能量。按化学热力学定义，物质或物体在化学反应过程中以热能形式释放的内能成为化学能。人类利用最普遍的化学能是燃烧碳和氢，而这两种元素正是煤、石油、天然气、薪柴等燃料中最主要的可燃元素。燃料燃烧时的化学能通常用燃料的发热值表示。

单位重量（对固体、液体燃料）或体积（气体燃料）在完全燃烧，且燃烧产物冷却到燃烧前的温度时所放出的热量称为燃料的发热量（发热值或热值），单位为 kJ/kg 或 kJ/m^3 。应用上又将发热量分为高位发热量和低位发热量。高位发热量是指燃料完全燃烧，且燃烧产物中的水蒸气全部凝结成水时所放出的热量；低位发热量是燃料完全燃烧，而燃烧产物中的水蒸气仍以汽态存在时所放出的热量。显然，低位发热量在数值上等于高位发热量减去水的汽化潜热。由于燃料在燃烧设备（如锅炉）中燃烧时，燃料中原有的水分及氢燃烧后生成的水均呈蒸汽状态随烟气排出，因此，低位发热量接近实际可利用的燃料发热量，所以在热力计

算中均以低位发热量作为计算依据。表 1-2 为各种不同燃料低位发热量的大概值。

表 1-2 各种不同燃料低位发热量的大概值

固体燃料	天然固体燃料 (MJ/kg)	木材	13.8
		泥煤	15.89
		褐煤	18.82
		烟煤	27.18
	加工的固体燃料 (MJ/kg)	木炭	29.27
		焦炭	28.43
焦炭		26.34	
液体燃料	天然液体燃料 (MJ/kg)	石油 (原油)	41.82
	加工成的液体燃料 (MJ/kg)	汽油	45.99
		液化石油气	50.18
		煤油	45.15
		重油	43.91
		焦油	37.22
		甲苯	40.56
		苯	40.14
酒精	26.76		
气体燃料	天然气燃料 (MJ/m ³)	天然气	37.63
	加工成的气体燃料 (MJ/m ³)	焦炉煤气	18.82
		高炉煤气	3.76
		发生炉煤气	5.85
		水煤气	10.45
		油气	37.65
丁烷气	125.45		

6. 核能

核能是蕴藏在原子核内部的物质结构能。轻质量的原子核 (氘、氚等) 和重质量的原子核 (铀等) 其核子之间的结合力比中等质量原子核的结合力小, 这两类原子核在一定的条件下可以通过核聚变和核裂变转变为在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, 这种结合能就是核能。由于原子核内部的运动非常复杂, 目前还不能给出核力的完全描述。但在核裂变和核聚变反应中都有所谓的“质量亏损”, 这种质量和能量之间的转换完全可以用式 (1-1) 来描述。

三、能量的性质

能量的性质主要有状态性、可加性、传递性、转换性、做功性和贬值性。

1. 状态性

能量取决于物质所处的状态, 物质的状态不同, 所具有的能量也不同 (包括数量和质量)。

对于热力系统而言，其基本状态参数可以分为两类，一类与物质的量无关，不具有可加性，称之为强度量，例如温度、压力、速度、电势和化学势等；另一类与物质的量相关，具有可加性，称为广延量，例如体积、动量、电荷量和物质的量等。对能量利用中常用的工质，其状态参数为温度 T 、压力 p 和体积 V ，因此它的能量 E 的状态可表示为

$$E=f(p, T) \text{ 或 } E=f(p, v)$$

2. 可加性

物质的量不同，所具有的能量也不同，即可相加；不同物质所具有的能量亦可相加，即一个体系所获得的总能量为输入该体系多种能量之和，故能量的可加性可表示为

$$E=E_1+E_2+\dots+E_n=\sum E_i \quad (1-9)$$

3. 传递性

能量可以从一个地方传递到另一个地方，也可以从一种物质传递到另一种物质。例如对传热来讲，能的传递性可表示为

$$Q=KA\Delta t \quad (1-10)$$

式中： Q 为传递的热量； K 为传热系数； A 为传热面积； Δt 为传热的平均温差。

4. 转换性

各种形式的能可以互相转换，其转换方式、转换数量、难易程度均不相同，即它们之间的转换效率是不一样的。研究能量转换方式和规律的科学是热力学，其核心的任务就是如何提高能量转换的效率。

5. 做功性

利用能量来做功，是利用能量的基本手段和主要目的。这里所说的功是广义功，但通常是针对机械功而言的。各种能量转换为机械功的本领是不一样的，转换程度也不相同。通常按其转换程度可以把能分为无限制转换（全部转换）能、有限制转换（部分转换）能和不转换（废）能，又分别称为高能、低能和废能，显然这一分类也是以转换为功的程度来衡量的。能的做功性，通常也以能级 ε 来表示，即

$$\varepsilon=\frac{E_x}{E} \quad (1-11)$$

式中： E_x 为焓。

6. 贬值性

根据热力学第二定律，能量不仅有“量的多少”，还有“质的高低”之分。能量在传递与转换等过程中，由于多种不可逆因素的存在，总伴随着能量的损失，表现为能量质量和品位的降低，即做功能力的下降，直至达到与环境状态平衡而失去做功本领，成为废能，这就是能的质量贬值。例如，最常见的有温差的传热与有摩擦的做功，就是两个典型的不可逆的过程，在这两个不可逆过程中，能量都会贬值。能的贬值性，即能的质量损失（或称内部损失、不可逆损失），其贬值程度可用参与能量交换的所有物体熵的变化（熵增）来反映。即能的贬值 E_0 可表示为

$$E_0=T_0\Delta S \quad (1-12)$$

式中： T_0 为环境温度； ΔS 为系统的熵增。

四、能源的分类

能源可简单地理解为含有能量的资源。对于能源常常有不同的表述。例如,《大英百科全书》对能源一词的解释为“能源是一个包括所有燃料、流水、阳光和风的术语,人类采用适当的转换手段,给人类自己提供所需的能量”。在现代汉语词典中,对能源的注解是“能产生能量的物质,如燃料、水力、风力等”。总之不论何种表述其内涵都是基本相同的,即能源就是能量的来源,是提供能量的资源,这些来源或资源,要么来自物质,要么是来自物质的运动,前者如煤炭、石油、天然气等矿物燃料(又称化石燃料);后者如水流、风流、海浪、潮汐等。

从广义上讲,在自然界里有一些自然资源本身就拥有某种形式的能量,它们在一定条件下能够转换成人们所需要的能量形式,这种自然资源显然就是能源。如煤、石油、天然气、太阳能、风能、水能、地热能、核能等。但生产和生活过程中由于需要或为便于运输和使用,常将上述能源经过一定的加工、转换使之成为更符合使用要求的能量来源,如煤气、电力、焦炭、蒸汽、沼气、氢能等,它们也称之为能源,因为它们同样能为人们提供所需的能量。

由于能源形式多样,因此通常有多种不同的分类方法,它们或按能源的来源、形成、使用分类,或从技术、环保角度进行分类。不同的分类方法都是从不同的侧重面来反映各种能源的特征。

1. 按地球上的能量来源分

地球上能源的成因不外乎以下三方面,即

- (1) 地球本身蕴藏的能源,如核能、地热能等;
- (2) 来自地球外天体的能源,如宇宙射线及太阳能,以及由太阳能引起的水能、风能、波浪能、海洋温差能、生物质能、光合作用、化石燃料(如煤、石油、天然气)等,它们是一亿年前由积存下来的有机物质转化而来的;
- (3) 地球与其他天体相互作用的能源,如潮汐能。

2. 按被利用的程度分

从被开发利用的程度,生产技术水平和经济效益等方面对能源进行分类。

(1) 常规能源。其开发利用时间长、技术成熟、能大量生产并广泛使用,如煤炭、石油、天然气、薪柴燃料,水能等,常规能源有时又称之为传统能源。

(2) 新能源。其开发利用较少或正在研究开发之中,如太阳能、地热能、潮汐能、生物质能等,核能通常也被看成新能源,尽管核燃料提供的核能在世界一次能源的消费中已占15%,但从被利用的程度看还远不能和已有的常规能源比;另外,核能利用的技术非常复杂,可控核聚变反应至今未能实现,这也是将核能仍视为新能源的主要原因之一。不过也有不少学者认为应将核裂变作为常规能源,核聚变作为新能源。新能源有时又称为非常规能源或替代能源。

3. 按获得的方法分

(1) 一次能源。自然界现今存在,可供直接利用的能源,如煤、石油、天然气、风能、水能等。

(2) 二次能源。由一次能源直接或间接加工,转换而来的能源,如电、蒸汽、焦炭、煤气、氢等,它们使用方便,易于利用,是高品质的能源。

4. 按能否再生分

(1) 可再生能源。它不会随其本身的转化或人类的利用而日益减少,如水能、风能、潮汐能、太阳能等。

(2) 非再生能源。它随人类的利用而越来越少,如石油、煤、天然气、核燃料等。

5. 按能源本身的性质分

(1) 含能体能源。其本身就是可提供能量的物质,如石油、煤、天然气、氢等,它们可以直接储存,因此便于运输和传输,含能体能源又称之为载体能源。

(2) 过程性能源是指由可提供能量的物质的运动所产生的能源,如水能、风能、潮汐能、电能等,其特点是无法直接储存。

6. 按是否能作为燃料分

(1) 燃料能源。它们可以作为燃料使用,如各种矿物燃料,生物质燃料以及二次能源中的汽油、柴油、煤气等。

(2) 非燃料能源。它们是不可作为燃料使用的能源,其含义仅指其不能燃烧,而非不能起燃料的某些作用,如加热等。

7. 按对环境的污染情况分

(1) 清洁能源。对环境无污染或污染很小的能源,如太阳能、水能、海洋能等。

(2) 非清洁能源。对环境污染较大的能源,如煤、石油等。

此外在书籍和报章中还常常看到另外一些有关能源的术语或名词,如商品能源,非商品能源,农村能源,绿色能源,终端能源等。它们也都是从某一方面来反映能源的特征。例如商品能源是指流通环节大量消费的能源,如煤炭、石油、天然气、电力等。而非商品能源则指不经流通环节而自产自用的能源,如农户自产自用的薪柴、秸秆,牧民自用的牲畜粪便等。

表 1-3 给出了能源分类的情况。

表 1-3 能源的分类

按使用状况分	按性质分	按一、二次能源分	
		一次能源	二次能源
常规能源	燃料能源	泥煤(化学能)	煤气(化学能) 余热(化学能)
		褐煤(化学能)	焦炭(化学能)
		烟煤(化学能)	汽油(化学能)
		无烟煤(化学能)	煤油(化学能)
		石煤(化学能)	柴油(化学能)
		油页岩(化学能)	重油(化学能)
		油砂(化学能)	液化石油气(化学能)
		原油(化学能、机械能)	丙烷(化学能)
		天然气(化学能、机械能)	甲醇(化学能)
		生物燃料(化学能)	酒精(化学能)
		天然气水合物(化学能)	苯胺(化学能)
	火药(化学能)		

续表

按使用状况分	按性质分	按一、二次能源分	
		一次能源	二次能源
常规能源	非燃料能源	水能（机械能）	电（电能）
			蒸汽（热能、机械能）
			热水（热能）
			余热（热能、机械能）
新能源	燃料能源	核燃料（核能）	沼气（化学能）
			氢（化学能）
	非燃料能源	太阳能（辐射能）	激光（光能）
		风能（机械能）	
		地热能（热能）	
		潮汐能（机械能）	
		海水热能（热能、机械能） 海流、波浪动能（机械能）	

五、能源的评价

能源多种多样，各有优缺点。为了正确地选择和使用能源，必须对各种能源进行正确的评价。通常能源评价包括以下几方面。

1. 储量

储量是能源评价中的一个非常重要的指标，作为能源的一个必要条件是储量要足够丰富。人们对储量常有不同的理解。一种理解认为，对煤和石油等化石燃料而言，储量是指地质资源量；对太阳能、风能、地热能等新能源而言则是指资源总量。而另一种理解是，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。在有经济价值的可开采的资源量中又分为普查量、详查量和精查量等几种情况。在油气开采中，通常又将累计探明的可采储量与可采资源量之比称之为可采储资比，用以说明资源的探明程度。储量丰富且探明程度高的能源才有可能被广泛的应用。

2. 能量密度

能量密度是指在一定的质量、空间或面积内，从某种能源中所能得到的能量。显然，如果能量密度很小，就很难用作主要能源。太阳能和风能的能量密度就很小，各种常规能源的能量密度都比较大，核燃料的能量密度最大。表 1-4 为几种能源的能量密度。

表 1-4 几种能源的能量密度

能源类别	能量密度	能源类别	能量密度
风能（风速 3m/s）	0.02 (kW/m ²)	天然铀	5.0×10^8 (kJ/kg)
水能（流速 3m/s）	20 (kW/m ²)	²³⁵ U（核裂变）	7.0×10^{10} (kJ/kg)
波浪能（波高 2m）	30 (kW/m ²)	氘（核聚变）	3.5×10^{11} (kJ/kg)
潮汐能（潮差 10m）	100 (kW/m ²)	氢	1.2×10^5 (kJ/kg)
太阳能（晴天平均）	1 (kW/m ²)	甲烷	5.0×10^4 (kJ/kg)
太阳能（昼夜平均）	0.16 (kW/m ²)	汽油	4.4×10^4 (kJ/kg)

3. 储能的可能性

储能的可能性是指能源不用时是否可以储存起来，需要时是否又能立即供应。在这方面化石燃料容易做到，而太阳能、风能则比较困难。由于大多数情况下，所需能量是不均衡的，比如白天用电多，深夜用电少；冬天需要热，夏天却需要冷，因此在能量的利用中，储能是很重要的一个环节。

4. 供能的连续性

供能的连续性是指能否按需要和所需的速度连续不断地供给能量。显然太阳能和风能就很难做到供能的连续性。太阳能白天有，夜晚无；风力则时大时小，且随季节变化大。因此常常需要有储能装置来保证供能的连续性。

5. 能源的地理分布

能源的地理分布和能源的使用关系密切。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的增加。例如我国煤炭资源多在西北，水能资源多在西南，工业区却在东部沿海，因此能源的地理分布对使用很不利。带来“北煤南运”，“西电东送”等诸多问题。

6. 开发费用和利用能源的设备费用

各种能源的开发费用以及利用该种能源的设备费用相差悬殊。例如太阳能、风能不需要任何成本即可得到。各种化石燃料从勘探、开采到加工却需要大量投资。但利用能源的设备费用则正好相反，太阳能、风能、海洋能的利用设备费按每千瓦计算远高于利用化石燃料的设备费。核电站的核燃料费远低于燃油电站，但其设备费却高得多。因此在对能源进行评价时，开发费用和利用能源的设备费用是必须考虑的重要因素，并需进行经济分析和评估。

7. 运输费用与损耗

运输费用与损耗是能源利用中必须考虑的一个问题。例如太阳能、风能和地热能都很难输送出去，但煤、油等化石燃料却很容易从产地输送至用户。核电站的核燃料运输费用极少，因为核燃料的能量密度是煤的几百万倍，而燃煤电站的输煤就是一笔很大的费用。此外运输中的损耗也不可忽视。

8. 能源的可再生性

在能源日益匮乏的今天，评价能源时不能不考虑能源的可再生性。比如太阳能、风能、水能等都可再生，而煤、石油、天然气则不能再生。在条件许可和经济上基本可行的情况下应尽可能地采用可再生能源。

9. 能源的品位

能源的品位有高低之分，例如水能够直接转变为机械能和电能，它的品位要比先由化学能转变为热能，再由热能转换为机械能的化石燃料必然要高些。另外，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高。在使用能源时，特别要防止高品位能源降级使用，并根据需要使用需要适当安排不同品位能源。

10. 对环境的影响

使用能源一定要考虑对环境的影响。化石燃料对环境的污染大，太阳能、氢能、风能对环境基本上没有污染。因此，在使用能源时应尽可能的采取各种措施防止对环境的污染。

第二节 能量转换原理

一、能量的转换

能量转换是能量最重要的属性，也是能量利用的最重要环节。人们通常所说的能量转换是指能量形态上的转换，如燃料的化学能通过燃烧转换成热能，热能通过热机再转换成机械能等。然而广义地说，能量转换还应当包括以下两项内容。

1) 能量在空间上的转移，即能量的传输。

2) 能量在时间上的转移，即能量的储存。

任何能量转换过程都必须遵守自然界的普遍规律——能量转换和守恒定律，即

$$\text{输入能量} - \text{输出能量} = \text{储存能量的变化}$$

在国民经济和日常生活中用得最多、最普遍的能量形式是热能、机械能和电能。它们都可以由其他形态的能量转换而来；它们之间也可以互相转换。显然，任何能量转换过程都需要一定的转换条件，并在一定的设备或系统中实现。表 1-5 给出了能量转换过程及实现转换所需的设备或系统。对不同能源与热能的转换及利用情况如图 1-1 所示。

表 1-5 能量转换过程及实现转换所需的设备或系统

能源	能量形态转换过程	转换设备或系统
石油、煤炭、天然气等化石燃料	化学能→热能 化学能→热能→机械能 化学能→热能→机械能→电能	炉子、燃烧器 各种热力发动机 热机、发电机、磁流体发电、压电效应
氢和酒精等二次能源	化学能→热能→电能 化学能→电能	热力发电、热电子发电 燃料电池
水能、风能 潮汐能、海流能 波浪能	机械能→机械能 机械能→机械能→电能	水车、水轮机、风力机 水轮发电机组、风力发电机组、潮汐发电装置、海流能发电装置、波浪能发电装置
太阳能	辐射能→热能 辐射能→热能→机械能 辐射能→热能→机械能→电能 辐射能→热能→电能 辐射能→电能 辐射能→化学能 辐射能→生物能	热水器、采暖、制冷、太阳灶、光化学反应 太阳热发动机 太阳热发电 热力发电、热电子发电 太阳电池、光化学电池 光化学反应（水分解） 光合成
海洋温差能	热能→机械能→电能	海洋温度差发电（热力发动机）
海洋盐分（能）	化学能→电能 化学能→机械能→电能 化学能→热能→机械能→电能	浓度发电 渗透压发电 浓度差发电
地热能	热能→机械能→电能 热能→电能	热力发电机—发电机 热电子发电
核能	核分裂→热能→机械能→电能 核分裂→热能 核分裂→热能→电能 核分裂→电磁能→电能 核聚变→热能→机械能→电能	核发电、磁流体发电 核能炼钢 热力发电、热电子发电 光电池 核聚变发电

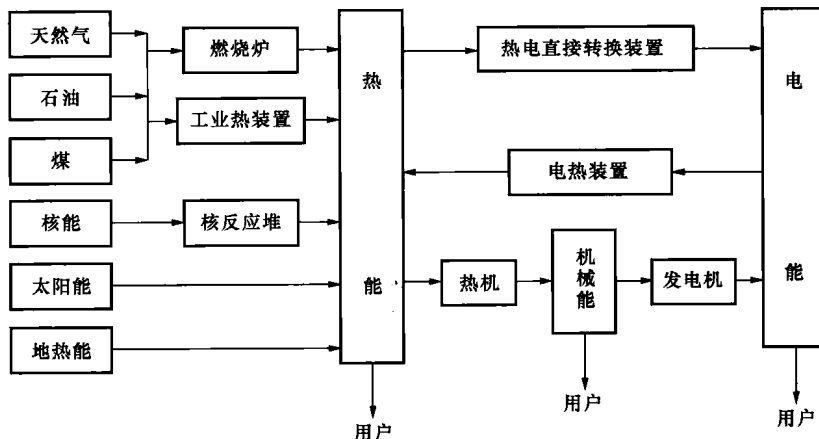


图 1-1 不同能源与热能的转换及利用情况

二、能量的传递

能量的利用是通过能量传递来实现的，故能量的利用过程通常也是一个能量的传递过程。能量传递过程的特点如下所述。

1. 能量的传递条件

能量传递是有条件的，其传递的推动力是所谓“势差”。如传热要有温差、导电要有电位差、流动要有压差或势差、扩散要有浓度差、化学反应要有化学势差等。

2. 能量传递的规律

能量传递遵循一定的规律，即能量传递的速率正比于传递的动力而反比于传递的阻力。由此有

$$\text{传递速率} = \frac{\text{传递动力}}{\text{传递阻力}} \quad (1-13)$$

例如，对导电有

$$I = \frac{U}{R}$$

对于传热则有

$$Q = \frac{\Delta t}{R_t}$$

上两式中： I 为电流强度； R 为电阻； R_t 为热阻； U 为电压； Δt 为温差。

3. 能量传递的形式

能量的传递，包括转移与转换两种形式。转移是某种形态的能，从一地到另一地，从一物到另一物；转换则是由一种形态变为另一形态。这两种形式往往是一起或交替存在共同完成能量的传递。

4. 能量传递的途径

能量传递的途径基本有两条：由物质交换和质量迁移而携带的能量称为携带能；在体系边界面上的能量交换称为交换能。对开口系这两种途径同时存在，对封闭系则主要靠交换。

5. 能量传递的方法

在体系边界面上的能量交换，通常主要以两种方法进行：传热——由温差引起的能量交

换，这是能量传递的微观形式；做功——由非温差引起的能量交换，这是能量传递的宏观形式。这里的功是指广义功。

6. 能量传递的方式

通过能量交换而实现的能量传递，即传热和做功。传热的三种基本方式是热传导、热对流和热辐射；做功（这里指机械功）的三种基本方式是容积功、转动轴功和流动功（推动功）。

7. 能量传递的结果

能量传递的结果主要体现在两方面，即能量使用过程中所起的作用以及能量传递的最终去向。例如，以生产为例，能量在使用过程中的作用主要是用于物料并最终称为产品的一部分，或用于某一过程，包括工艺过程、运输过程和动力过程，并成为过程的推动力，使过程能够进行，生产得以实现。能量传递的最终去向通常只有两条：或转移到产品，或散失于环境，包括直接损失和用于过程后再进入环境的两种情况。

8. 能量传递的实质

能量传递的实质实际上就是能量利用的实质。如果把产品的使用也包括在内，能量的最终去向只能是唯一的，即最终进入环境。即能量的利用是通过能量的传递，使能量由能源最终进入环境。其结果是能量被利用了，能源被消耗了。而作为能量而言，它是守恒的，不会消失；故就能量利用的本质而言，人类利用的不是能量的数量而是能量的质量（品质、品位），即能的质量急剧降低，直至进入环境，最终成为废能。

三、能量守恒与转换定律

研究能量属性及转换规律的科学是热力学。从热力学的角度看，能量是物质运动的度量，运动是物质的存在形式，因此一切物质都有能量。物质的运动可以分为宏观运动和微观运动。度量物质宏观运动能量的是宏观动能和位能。度量物质微观运动能量的是所谓“热力学能”。热力学能广义上讲包括分子热运动形成的内动能、分子间相互作用所形成的内位能、维持一定分子结构的化学能和原子核内部的核能。温度越高，分子的内动能越大。内位能取决于分子之间的距离，距离越小，内位能越大。在没有化学反应和核反应的物理过程中，化学能和核能都不变，所以热力学能的变化只包括内动能和内位能的变化。只要物质运动状态一定，物质拥有的能量就一定。所以物质的能量仅仅取决于物质的状态，是状态参数。

尽管物质的运动多种多样，但就其形态而论只有有序（有规则）运动和无序（无规则）运动两类。人们常将量度有序运动的能量称为有序能，量度无序运动的能量称为无序能。显然，一切宏观整体运动的能量和大量电子定向运动的电能都是有序能；而物质内部分子杂乱无章的热运动则是无序能。大量事实证明，有序能可以完全、无条件地转换为无序能；相反，转换却是有条件的、不完全的。能量和能量转换这一特性，导致能量不仅有“量”的多少，而且有“质”的高低，而这正是能量转换中最重要的两个方面。

众所周知，能量在量方面的变化，遵循自然界最普遍、最基本的规律，即能量守恒与转换定律。这一定律和细胞学说以及进化论，被称为19世纪自然科学的三大发现。能量守恒和转换定律指出：“自然界的一切物质都具有能量；能量既不能创造，也不能消灭，而只能从一种形式转换成另一种形式，从一个物体传递到另一个物体；在能量转换与传递过程中能量的总量恒定不变。”

热能是自然界广泛存在的一种能量，其他形式的能量（机械能、电能、化学能）都很容易转换成热能。热能与其他形式能量之间的转换也必然遵循能量守恒和转换定律——热力学