



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

DONGLI GONGCHENG GAILUN

# 动力工程概论

付忠广 主编



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

DONGLI GONGCHENG GAILUN  
**动力工程概论**

主 编 付忠广  
编 写 卞 双 程世庆  
主 审 徐志明 胥建群



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

*Thermal Energy & Power*

## 内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书的内容较全面地反映了我国现代电力工业发展状况，重点介绍了火力发电厂的生产过程，动力设备的作用、原理及运行，同时概括介绍了其他发电方式，如水电、核电及其他新能源发电方式等。通过优化知识结构、精选素材，本书将一些反映新技术发展动态的内容编入了教材，内容丰富，编写过程中力求深入浅出，通俗易懂。通过本教材的学习，既可拓宽专业知识和视野，也能为进一步深入学习不同专业的相关课程打下基础。

本书可作为非能源动力类专业本科教材，也可作为电力行业的培训用书，亦可供相关科技人员参考使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

动力工程概论/付忠广主编. —北京: 中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5857 - 4

I. 动… II. 付… III. 动力工程—高等学校—教材  
IV. TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 104799 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.25 印张 444 千字 1 插图

定价 29.00 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

# 前 言

电力工业是国民经济发展的先行官,电力工业的发展需要大量了解动力工程基本知识的各类人才,因此,很多高校都为不同专业的学生开设电力生产相关知识课程。本教材考虑了教学过程中反映出的教学需求,是精品课程建设的成果之一。

本教材的内容较全面地反映了我国现代电力工业发展状况,重点介绍了火力发电厂的生产过程,动力设备的作用、原理及运行,同时概括介绍了其他发电方式,如水电、核电及其他新能源发电方式等。全书内容既兼顾到了宏观的电力工业的发展,又兼顾到了理论知识和技术的细节。通过优化知识结构、精选素材,本书将一些反映新技术发展动态的内容编入了教材,力求深入浅出,通俗易懂。

本教材针对非能源动力类专业本科教学,介绍了能源动力的基本知识,为相关专业毕业生服务于电力行业奠定知识基础,同时可用于进入电力行业的各类毕业生培训。通过本教材的学习,学生既拓宽了专业知识和视野,又为进一步学习不同专业的相关课程打下了基础。

本教材内容比较丰富,部分内容独立性相对较强,略去不讲不会影响后续内容的学习。因此,各专业教学活动中的课堂讲解可以根据教学需要自行选择教学内容,比如带星号的部分内容可供学生课外阅读学习等。

华北电力大学付忠广编写第一章、第三章、第五章和第六章;华北电力大学卞双编写第二章;山东大学程世庆编写第四章。全书由付忠广统稿。

本书由东北电力大学徐志明教授和东南大学胥建群教授担任主审。

由于水平所限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2007年4月

## 目 录

## 前言

<b>第一章 电力工业和发电厂生产过程概述</b> .....	1
第一节 电能特性和电力工业在国民经济中的作用 .....	1
第二节 热力发电厂的生产过程 .....	10
第三节 其他发电技术概述 .....	27
复习思考题 .....	63
<b>第二章 热工基础理论</b> .....	65
第一节 工质及其状态参数 .....	65
第二节 热力学基本定律 .....	67
第三节 水蒸气及其动力循环 .....	72
第四节 传热学基础 .....	87
复习思考题 .....	91
<b>第三章 热力发电厂</b> .....	94
第一节 热力发电厂概述 .....	94
第二节 发电厂的热力系统 .....	98
第三节 发电厂的燃料输送、除灰和供水系统 .....	126
第四节 热力发电厂的主厂房布置 .....	136
复习思考题 .....	139
<b>第四章 锅炉设备及系统</b> .....	141
第一节 电厂锅炉概述 .....	141
第二节 燃料及燃烧 .....	145
第三节 锅炉受热面 .....	164
第四节 锅炉汽水系统及其设备 .....	173
第五节 锅炉的主要辅助设备及系统 .....	178
第六节 典型锅炉及其安全附件 .....	185
复习思考题 .....	198
<b>第五章 汽轮机设备及系统</b> .....	199
第一节 汽轮机概述 .....	199
第二节 汽轮机的基本做功原理 .....	204
第三节 多级汽轮机 .....	209
第四节 汽轮机本体 .....	212
第五节 汽轮机的供油系统 .....	228
第六节 汽轮机的主要辅助设备 .....	234
复习思考题 .....	239

<b>第六章 热力发电厂及其运行</b> .....	240
第一节 热力发电厂与电网的协调.....	240
第二节 发电厂机组的协调控制与自动保护.....	247
第三节 发电厂机组设备安全运行的基本知识.....	255
复习思考题.....	267
附表 I 饱和水和饱和水蒸气热力性质表（按温度排列）.....	269
附表 II 饱和水和饱和水蒸气热力性质表（按压力排列）.....	272
附表 III 未饱和水与过热水蒸气热力性质表.....	275
附图 1 水蒸气焓-熵 ( $h-s$ ) 图.....	282
附图 2 东方汽轮机厂生产的双缸双排汽 300MW 汽轮机纵剖面.....	283
附图 3 哈尔滨汽轮机厂制造的四缸四排汽 600MW 反动式汽轮机纵剖面.....	284
<b>参考文献</b> .....	285

## 第一章 电力工业和发电厂生产过程概述

### 第一节 电能特性和电力工业在国民经济中的作用

#### 一、能源与人类文明

能源，也就是“能量的源泉”，是指可以给我们提供大量能量的物质和自然过程。回顾人类的历史可以明显地看出能源和人类社会发展的密切关系。古代人类以柴薪、秸秆等生物质燃料来煮食和取暖，以人力、畜力和风力作为动力从事生产。这个以柴薪等生物质为主要能源的时代延续了很长时间，生产力和生活水平极低，社会发展迟缓。

18世纪工业革命开创的工业大发展，煤炭取代了柴薪作为主要能源，蒸汽机成为生产的主要动力，促进了工业的发展，社会劳动生产力有了很大增长。

19世纪末，电力开始进入社会各个领域，电动机代替了蒸汽机，电力成为工矿企业的主要动力和照明的主要能源，社会生产力有了大幅度增长，改变了人类社会的面貌。

石油资源的发现，开始了能源利用的新时代，西方工业发达国家很快从以煤炭为主要能源转换到以石油、天然气为主要能源，这对促进经济繁荣和发展起了巨大的作用，创造了人类历史上空前的物质文明。

在人类发展的历史长河中，除远古时期人类茹毛饮血以外，每一个发展阶段都离不开能源。社会发展每一阶段上的每一个飞跃都与人类对能源利用的广度和深度密切相关。能源是人类文明生活的必需和源泉。

人类生活水平的提高：电视机、音响设备、冰箱、洗衣机、空调等是用电来驱动的。

现代农业的发展：机械化耕作、化肥的生产、人工气候的形成，哪样都需要能源。

各种交通工具的广泛应用：全世界数以亿计的汽车、高速铁路网络、遍布全世界的飞机航线等都以能源为动力。

全世界通信的迅速发展：电话、传真、计算机网络、移动电话网络、电视及各种信息网络等都离不开电力这个能源。

保卫国家安全的军事实力的增强：现代化主战坦克，装甲运兵车，移动火炮，武装直升机，短程、中程、远程导弹，各种各样的航空器及其发射的大功率宇宙火箭等都是能源利用的各种形式。

由此可以充分说明能源与人类文明进步的关系。能源与整个世界，与每一个国家，进而与每一个人休戚相关。能源是现代文明的动力。人类社会的发展，促使人们不断地开发和利用自然界的各种能源，其中以利用热能（主要由燃料中的化学能通过燃烧转变而来）最为广泛。

但是，能源的利用是有代价的，地球资源的日益枯竭，生态环境的破坏和恶化，在某种程度上是能源不适当利用的后果。因此，能源的开发和利用必须坚持可持续发展的原则。

在自然界中，蕴藏着极为丰富的能量，如风力、水力、燃料化学能、太阳能以及原子（核）能等。

能源的开发和利用对国民经济的发展具有重大的意义，世界各国经济发展的历史表明，

一个国家的国民生产总值和这个国家的能耗大体上保持正比关系。现在,生产过程中的能耗已成为衡量一个国家技术和经济发展水平的重要标志之一。

中国是一个人均资源贫乏的国家,即使是资源最丰富的煤炭,人均资源也只有全世界平均人均的 50%,而石油只有 10%。目前,我国人年均能源消耗是 1000kg 标准煤<sup>①</sup>,而美国是 11000kg 标准煤,英、德、法等发达国家是 5000~6000kg 标准煤。各种预测表明,在 2030~2050 年,中国人年均能源消耗量可达 2000~3000kg 标准煤,考虑到中国人口的增加(15~16 亿),能耗总消耗量也将高达 40 亿 t<sup>②</sup> 标准煤以上。从世界范围看,近几十年来,能耗的增长非常迅速。能源愈来愈成为世界经济发展中的重要问题。节约能源消耗、减少能源浪费、开发新型能源,是我们和我们子孙必须面对的一个巨大的、十分严肃的课题。

自然界中能源的种类是形形色色的。对能源进行分类,可以帮助我们了解各种能源的基本性质和它们之间的相互关系。

### 1. 按能源的来源进行分类(表 1-1)

表 1-1 按能源的来源分类

第一类能源 (来自地球以外)	太阳辐射能	煤、石油、天然气、油页岩、草木燃料、沼气和其他由于光合作用而固定的太阳辐射能、风、流水、海流、波浪、海洋热能、直接的太阳辐射
	宇宙射线、流星和其他星际物质带进地球大气中的能量	
第二类能源 (来自地球内部)	地球热能	地震、火山活动 地下热水和地热蒸汽(包括温泉) 热岩层
	原子核能	铀、钍、钚等
第三类能源 (来自地球和其他天体的作用)	潮汐能	

第一类是来自地球以外的天体的能量,其中最主要的是太阳辐射能,此外,还有其他恒星或天体发射到地球上的各种宇宙射线的能量。

第二类是地球本身蕴藏的能量,如海洋和地壳中储存着的原子核能以及地球内部的热能。

第三类是由于地球和其他天体相互作用而产生的能量,如潮汐能等。

### 2. 按“一次能源”和“二次能源”进行分类(表 1-2)

表 1-2 “一次能源”和“二次能源”分类

一次能源	可再生能源	风、流水、海流、海洋热能、潮汐能、草木燃料、直接的太阳辐射、地震、火山活动、地下热水、地热蒸汽(包括温泉)、热岩层
	不可再生能源	化石燃料(煤、石油、天然气、油页岩) 核燃料(铀、钍、钚)
二次能源	电能、氢能、汽油、煤油、柴油、火药、酒精、甲醇、丙烷、苯胺、硝化棉和硝化甘油等	

① 将煤的低位发热量为 29308kJ/kg 的煤定义为标准煤(参见第四章第二节)。

② 1t=1000kg。



以现成的形式存在于自然界中的能源一般称为“一次能源”，需要依靠其他能源来制取或产生的能源则称为“二次能源”。

“一次能源”还可以按照能否“再生”而进一步分类。所谓“可再生能源”就是指不会随着它本身的转化或人类的利用而日益减少的能源，而随着人类的利用逐渐减少的能源称为“不可再生能源”。当然，“可再生”和“不可再生”之间的区别只是相对的。

### 3. 按“含能体能源”和“过程性能源”分类（表 1-3）

表 1-3 “含能体能源”和“过程性能源”分类

含能体能源	草本燃料、化石燃料、核燃料、地下热水和地热蒸汽、高水位水库、氢能
过程性能源	风、流水、海流、潮汐、地震、直接的太阳辐射、电能

能量比较集中的“含能体”是“含能体能源”，能量比较集中的“能量过程”则是“过程性能源”。各种化石燃料（或矿化燃料）和核燃料、地下热水和蒸汽等都是“含能体能源”，风、流水和潮汐等都是“过程性能源”。

人类对能源的利用，已经历了很长的发展过程。利用能源的历史，也就是认识自然的历史。每一次新能源的采用和能源利用范围的扩大，都伴随着生产技术的重大变革，甚至引起整个社会生产方式的革命。

人们过去和现在所说的“新能源”是相对于“旧能源”来说的。拿今天的“旧能源”之一石油来说，虽然早在一千九百多年前中国就已利用它了，但数量极小，也很不普遍，直到内燃机发明后，它才得到广泛的应用。

在 19 世纪末 20 世纪初的人们眼里，石油是一种了不起的“新能源”。由于石油大量被采用，对当时的社会生产和人类生活都产生了巨大的影响。

又如人类开始利用地热、潮汐和太阳能的时间也很早，然而直到最近，这些能源才引起人们较为广泛的注意，作为“新能源”出现在世界能源的舞台上。

现在，海洋热能，波浪能，铀、钍等的裂变原子能，可控核聚变能以及新的“二次能源”——氢、甲醇等也开始受到重视，并加入了当今“新能源”的行列。为了满足生产和生活中迅速增长的能量需要，除了大力发展“旧能源”和改进能源利用技术外，还应当不断地探索和开发“新能源”。

随着科学技术的发展以及能源状况的改变，世界能耗的结构特点也不断地发生变化。今天，石油、煤、天然气、水力和裂变原子能，构成了现代世界“一次能源”的五大支柱。展望未来，石油、煤、天然气相对来说将愈来愈少地用作能源，而愈来愈多地当作宝贵的化工原料来使用，风能、地热能、裂变能、聚变能以及太阳能等将构成未来世界新的能源支柱。

电能是唯一能够大规模利用煤炭、水力、原子能和各种再生能源的二次能源。电能最终能源消费中相对其他能源形式的直接使用具有无可比拟的优越性。因此，电能增长速度始终高于整个能源消费的增长速度。

纵观主要工业发达国家及部分发展中国家在 20 世纪 70 年代及 80 年代发展过程，发电能源占一次能源总消费的比重都呈增加趋势，这一比重越高，能源利用效率越高，单位国民生产总值（Gross Domestic Product, GDP）的能耗（即能源强度）越低。当这一比重达到一定数值后（具体数值随各个国家的具体情况不同而不同），能源消费强度的变化即呈平缓

趋势,发电能源占一次能源总消费的比重也趋于稳定。随着转换成电力的一次能源比例增加,能源强度降低。能源强度越小,表示这个国家各种技术都比较先进,产品结构合理,高、新技术产品占较大的份额。

## 二、电能的特性和电力生产的特点与基本要求

电能是一种极“灵活”的能源,它可以很方便地转变成其他形式的能,如机械能、热能、光能、声能、化学能以及粒子的动能等。

电能作用于一些物质所引起的效应,往往被认为是很奇妙和用其他方法所不能获得的。随着科学技术的发展和对电能本质的深入研究,电能的“奥秘”愈来愈多地被揭示,利用电能的新途径、新方法、新工具也不断地被提出。

到目前为止,电能已在机械加工、化学、生物、农业、医疗和药物、国防等各方面的应用中,有的已显示出独特的优点,产生了巨大的效果,有的则展现出一些苗头,从发展上来看,其中某些方面将对科学研究和生产技术带来某些根本性的变革。因此,电能是人类社会的各个领域中将发挥更大的作用。

18世纪中叶以前,人类对电还没有正确的认识。1752年7月,北美一个普通的印刷工人本杰明·富兰克林(Benjamin Franklin, 1706~1790),在一个雷雨交加的荒野上,冒着生命危险,利用风筝做了一次震动世界的吸取“天电”的实验。他把闪电引到地上,点燃了酒精,破除了对“天火”的迷信,打开了近代电学研究的大门。接着,由于库仑(Coulomb, Charles-Augustin de, 1736~1806)、法拉第(Michael Faraday, 1791~1867)、麦克斯韦尔(maxwell, 1831~1879)、爱迪生(Thomas Alva Edison, 1847~1931)等许许多多科学家的努力,终于使多少年来一直捉摸不定、若神若鬼的电成为人类手中驯服的动力。如果说,火是人类发展史上的一个路标,电则是人类征服自然的又一里程碑。从火到电经历了50万年的时间。然而从利用电能到现在的200年多一点的时间内,则又开发和利用了许多新的能源,这标志着生产水平和科学技术前进的步伐由于电能的利用而大大地加快了。

电能是能源的“高级形式”,是优质的二次能源,它是由一次能源(煤炭、石油、水力、风能、地热能、潮汐能、天然气、太阳能和原子能等)转化而来的。电能的输送、应用十分方便,经过输送,电能可以很方便地供给不同的用户使用。现代设备小到微电子芯片,大到大型综合采矿机械、高级钢材的冶炼,都是用电能来驱动的。

电能应用如此广泛,是因具有以下优点:

(1) 电能可以方便地进行能量转换。一次能源(例如,煤炭、石油、水力、太阳能、地热能、原子能等)通过原动机和发电机可以转换成电能,电能又可以通过电动机或电气设备高效率地转换成机械能、热能、光能和化学能等。如用电动机代替柴油机,用电气机车代替蒸汽机车,用电炉代替其他加热炉,可以提高效率20%~50%。因此,在某些领域电能被称为“节能的能源”。

(2) 大规模集中生产的电能可以灵活地分散使用,是比较理想的动力源。电能集中在发电厂中大规模生产后(即经过一系列的大规模能量转换),在线损很小的情况下,通过高压输电线路远距离输送到1000km以外的地区,灵活方便地通过电网分配给分散的用户使用。

(3) 电能可实现许多特殊工艺加工。例如,电焊工艺、电化学、高频淬火、金属电火花加工等。

(4) 电能能够充分利用地区性动力资源,解决地区条件对工业的限制,使工业布局更趋

于合理。如有的地区蕴藏着极为丰富的风能、水力、潮汐、沼气、地热、天然气或煤炭等一次能源。有的地区日照长，太阳能亦可利用，又如工业集中地区的工业废热等，均可在转变成电能后，再输送到利于工业发展或居民集中地区，使工业布局更为合理，促进经济发展和人民生活水准的提高。

(5) 电能易于实现工业生产的自动化，为自动控制、远距离操纵，提高劳动生产率和改善劳动环境创造有利条件，如工业化自动生产线等。

(6) 电能的应用无气体和噪声污染。如用电瓶车代替汽车、柴油车、蒸汽车等，成为“无公害车”，称为“无污染的能源”。

现在用来发电的能源种类是很多的，如太阳能、海洋能、风能、水能、燃料的化学能、原子（核）能等。其中有的能源易受地域和季节的限制；有的能源尚处于小规模实验阶段；有的能源用来发电，因为设备庞大复杂，价格昂贵，达到商业化尚需时日。目前，煤、水、原子（核）能仍然是最大的发电用能源。我国的动力资源，如煤、石油、天然气、地热、裂变物质等是非常丰富的，水力资源更是名列前茅，居于世界的首位，这为我国大规模、高速度地发展电力工业提供了坚实的基础。

电力的生产不同于其他能源的生产。电力生产具有如下特点和基本要求：

(1) 电能无法储存是电力生产的特点之一。电厂发电机发出的电能与用户电气设备所消耗的电能要时刻保持平衡。发电机的运行情况必须随着系统用户负荷的变化而改变，而且与用户负荷相适应。根据外界用户需要随时调整发电量，在任何时候、任何条件下，都应是总供给满足用户的总需求，多供多发，少供少发，不供停发。这就是对电能在数量上的要求。

(2) 发电厂输出的电能参数（质量）必须严格符合用户要求，即电力系统的频率和电压应保持在容许范围内变动，例如供电频率（ $50 \pm 0.2$ ）Hz、电压符合规定。若供电质量降低，就会造成电气设备不能正常运行，甚至会影响生产或损坏电气设备。电网容量越来越大，在机组容量大、参数高的情况下，保证机组在稳定工况下运行是十分重要的，只有这样才能保证电能的质量。

(3) 发电厂的电力生产必须保证连续不间断地进行，保证安全可靠。电力生产中的任何一个小事故都可能酿成大的灾祸，引起重大设备和人身事故，造成巨大经济损失。事故停电不仅会造成电力设备的损坏，电力部门无收益，而且在电能的利用上产生的间接损失更大。所以电力生产必须做到安全第一。

(4) 电力生产要求运行经济，厉行节约。电力生产是一个多环节的复杂的生产过程。一次能源的消耗量大，利用率又低，节约的潜力很大。例如：一个容量为 1000 兆瓦（MW）的大型电站 [发电煤耗按  $382\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ <sup>①</sup>] 计，24h（一天）要消耗近 1 万 t 煤。若发电煤耗降低  $1\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，按 2005 年中国火电发电量（24975 亿度）计算，全国一年就可以节约发电用煤 249.8 万 t。如果全国送电线路损失和厂用电能降低 1%，则全国一年就可节省近 249.8 亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$  的电能，相当一个 5000MW 容量的大电厂一年的发电量（设备年利用小时数按 5000h/年计）。所以，电力生产必须做到经济运行节约一次能源。

电力是国民经济发展的原动力，是实现工业、农业、交通运输业、国防的现代化和实现科学技术现代化的重要条件，也是提高与改善人民物质文化生活的重要保证。由于电能具备

①  $1 \text{ 千瓦} \cdot \text{小时} (\text{kW} \cdot \text{h}) = 1 \text{ 度电}$ 。

输送、使用方便，又易于转变成其他形式的能量等一系列优点，故它已成为发展现代社会物质文明的重要条件，应用非常广泛。

从工业到农业，从城市到农村，从生产到生活，各行各业都离不开电。电对现代化工业生产的发展速度和人类物质生活水平的日益提高，起到了难以估量的巨大作用。由于电力和电子技术的发展，人类从先进的工业化时代进入到高科技、电气化的新时代。

与 200 年前相比，今日的世界在生产水平、建设规模和科研成就上，在社会的物质文化生活的各个方面，都发生了极大的变化，这是与电能日益广泛的被应用分不开的，电气化的程度已成为国民经济现代化的一个重要标志。

### 三、电力工业在国民经济中的先导作用

工农业生产和日常生活所需要的电能，大多都是由发电厂集中进行生产和供应的。电力工业是为国民经济各个领域提供电能的部门，它能否高速发展，对整个国民经济的发展有着直接的影响。电力工业的发展水平在一定程度上标志着一个国家的工业化程度、国民经济发展的水平和科学技术的进步。能源转换成电力的比例越大，表示一个国家的先进“度”越大。

电力工业是国民经济各个部门的先行工业，是国民经济的基础。从世界发达国家的经济来看，电力工业发展速度应高于国民经济的发展速度。通常用电力弹性系数来表明电力工业与国民经济发展之间的关系，即

$$\text{电力弹性系数} = \frac{\text{发电量的年增长率}}{\text{国民经济总产值的年增长率}}$$

我国各个时期的电力弹性系数见表 1-4。1950~1980 年期间，世界各主要工业国的平均电力弹性系数列于表 1-5 中。由表 1-5 可知，平均电力弹性系数一般保持在 1.25~1.30 左右是恰当的。如果电力弹性系数过大，超过 2 以上，表明这个国家电力装机容量太大，发电设备利用率较低；若电力弹性系数过小，如小于 1，则会出现电力供应紧张的状况。

表 1-4 我国各个时期的电力弹性系数

时 期	平均电力弹性系数	时 期	电力弹性系数
1953~1957	2.41	1994	0.85
1958~1962	—	1995	0.82
1963~1965	0.94	1996	0.75
1966~1970	1.37	1997	0.57
1971~1975	2.01	1998	0.37
1976~1980	1.75	1999	0.89
1981~1985	0.64	2000	1.37
1986~1990	1.12	2001	1.15
1991~1993	0.85	2002	1.46

注 1975 年以前国民生产总值采用国民收入数。

表 1-5 1950~1980 年世界主要工业国的平均电力弹性系数

国 家	平均电力弹性系数	国 家	平均电力弹性系数
美 国	1.84	西 德	1.55
前苏联	1.28	英 国	1.97
日 本	1.10	法 国	1.49

世界各国发展国民经济正、反两方面的经验都证明了：只有电力弹性系数大于1，才能保证国民经济的发展。也就是说电力工业必须以更快的速度向前发展，国民经济才有可能迅速的发展。综上所述，电能占能源的比重及电力弹性系数的大小，已成为衡量一个国家电气化、现代化水平的两个重要标志。

#### 四、电力工业的发展状况

电力工业起源于19世纪后期。世界上第一台火力发电机组是1875年建于巴黎北火车站的直流发电机，用于照明供电。1879年，美国旧金山实验电厂开始发电，这是世界上最早出售电力的电厂。1882年，美国纽约珍珠街电厂建成发电，装有6台直流发电机，总容量是0.67MW，以110伏直流为电灯照明供电。经过约100年的发展，到1980年，全世界发电装机总容量达到 $2.024 \times 10^6$  MW，年发电量达到8.2473万亿kW·h；2003年，全世界发电装机容量超过 $3.71 \times 10^6$  MW，年发电量达到14.7810万亿kW·h。

自20世纪70年代以来，世界各国的电力工业从电力生产、建设规模、能源构成到电源和电网的技术都发生了较大变化。进入20世纪90年代后，其发展逐渐形成了以下三个突出的动向：

(1) 世界发电量的年增长率趋缓，而一些发展中国家，特别是亚洲国家仍维持较高的电力增长速度。

(2) 电力技术的发展向高效率、环保的更高目标迈进。

(3) 电业管理体制和经营方式发生变革，由垄断经营逐步转向市场开放。

中国电力工业始于1882年，至2006年已有124年的历史。1949年新中国成立以前的67年中，中国电力工业发展极其缓慢，到1949年底，全国发电装机容量仅有1850MW，发电量43亿kW·h，分别居世界第21位和第25位。新中国成立后，电力工业得到了迅速发展，至2006年底发电设备装机容量达 $6.22 \times 10^5$  MW，年发电量突破2.8万亿kW·h，分别比1949年增长了336倍和651倍，电力增长速度居世界第1位，发电设备装机容量和年发电量均居世界第2位。近五十余年来我国发电设备装机容量和年发电量的发展情况见表1-6。年发电量居世界的位次变化情况见表1-7。美国能源部信息管理局发布的《国际能源展望2006》预测，至2020年，中国用电量将达5.6万亿kW·h，发电总装机容量预计达到 $1.186 \times 10^6$  MW，届时中国的用电量和发电总装机容量将超过美国跃居世界第1位。

表 1-6 我国发电设备装机容量和年发电量发展情况

时间 (年)	装机容量 (MW)	年发电量 (亿度)	时间 (年)	装机容量 (MW)	年发电量 (亿度)
1949	1849	43.1	1990	137890	6213.2
1960	11918	594.2	1998	270000	11600
1970	23770	1158.6	2002	353000	16400
1980	65869	3006.3	2006	622000	28248

表 1-7 我国年发电量居世界的位次

时间	1950	1957	1965	1978	1980	1985	1990	1995	2006
位次	25	13	9	7	6	5	4	2	2

新中国电力工业的发展可以分为1950~1978年和1978年以后两个阶段。在1950~1978年期间,新中国的建立为电力工业的发展创造了有利条件,电力生产和建设发展迅速。在此期间,国产100、125、200、300MW汽轮发电机组和国产150、225、300MW水轮发电机组相继制成并投产;东北、京津唐、华东、华中电网形成了220kV主干电力网架,而中国第一条330kV刘天关线路的建成,将陕、甘、青电网互联,初步形成了西北电网。1978年后,中国开始实行改革开放政策,电力工业更是以前所未有的速度向前发展。目前,比较完备的电力工业体系已经初步建立,技术装备水平正在逐步提高。中国电力工业已经从大机组、大电厂、大电网、超高压、自动化发展时期进入跨大区联网和推进全国联网的新阶段,这是我国现代化的主要标志。

### 五、发电厂的任务、分类和容量

将其他形式的能量转换成电能供给用户合格(电压、频率)的电力就是发电厂的任务。利用天然能源(一般是一次能源,如煤炭、水能、风能、原子能等)转变为电能的工厂称为发电厂。

#### (一) 发电厂的分类

发电厂的类型很多,分类方式不尽相同,现将常见的几种分类方法叙述如下。

##### 1. 按所利用的一次能源分类

(1) 火力发电厂。主要是利用煤炭、石油、天然气等燃料,将燃料的化学能先转换为热能,再转换成机械能,最后变成电能的电厂称为火力发电厂(或称为火电站)。

(2) 水力发电厂。利用水位的高低落差释放出的巨大能量,推动水轮机转动来带动发电机发出电能的电厂称为水力发电厂(或称为水电站)。

(3) 核电厂(站)。利用原子核反应堆产生的巨大热能,将水加热成蒸汽推动汽轮机带动发电机发电,这类电厂称为核电厂(或称为核电站)。

(4) 太阳能发电厂。有两种方式:一是将太阳光聚集后的热能传递给水或空气,推动汽轮发电机发电的电厂称为太阳能发电厂;二是利用太阳能电池,直接把太阳光转换为电能(详见本章第三节第七部分)。

(5) 地热发电厂。利用地下的热水经扩容后,变成蒸汽推动汽轮发电机发电的电厂。

(6) 风力发电厂。利用风力推动原动机旋转,带动发电机发电的电厂。

##### 2. 按产品性质分类

(1) 凝汽式发电厂。只供给用户质量合格电力的电厂。

(2) 热电厂。除了供给用户合格的电力,还供给用户所需参数的蒸汽或热水的电厂。

(3) 综合利用发电厂。除热电联合供应用户外,还将电厂排出的废料灰渣等作为原料加以利用,如利用灰渣制造建筑材料等。

##### 3. 按发电服务范围分类

(1) 系统中发电厂。这种发电厂发出的电能直接向电网供电,然后用户再从电网引下来使用。

(2) 孤立电厂。这类电厂建在用户附近,向用户直接供电,与电网没有关联。电厂停电会影响该地区用电。

(3) 自备电厂。某企业、矿山或重要部门为保证本部门安全生产和工作建造的电厂。在外界电源中断、停电或供电不足时,自备电厂将发电、供电,保证本企业不受外界供电的影

响，使本部门用电不会中断，安全可靠。

(4) 列车电站和船舶电站。这是将发电厂整套设备安装在列车或船舶上，利用这种交通工具运送发电设备到所需要的地方去发电。列车电站、船舶电站是一座活动的发电厂，它可以到边远地区或遥远的岛屿，也可到第一次开发建设还没有动力电源的地方去供电。

利用热能转换成机械能，最后变成电能的电厂，也可叫热力发电厂。热力发电厂的发动机可采用蒸汽机、汽轮机、内燃机或燃气轮机等。蒸汽机的功率太小，热效率甚低；内燃机和燃气轮机都不能直接应用廉价的固体燃料；而现代结构的汽轮机机组单机容量可高达1000MW以上，热效率较高，运行稳定，工作可靠。

我国的热力发电厂根据我国实际情况，以燃煤为主。所以，现代中、大型热力发电厂大都是以汽轮机作为发动机的发电厂。今后，本书所提及的“热力发电厂”或“火力发电厂”一概是指汽轮机发电厂而言。热力发电厂又可分成很多类型（参见表1-8）。

表1-8 热力发电厂的分类

分类方法	热力发电厂类型
一次能源	化石燃料电厂、原子能发电厂、风力发电厂、地热发电厂、太阳能发电厂、磁流体发电厂
能量供应	供应电能的凝汽式电厂，供应电能、热能的热电站
原动机类型	汽轮机发电厂、燃气轮机发电厂、内燃机发电厂、蒸汽-燃气轮机发电厂
电厂总容量	小容量发电厂、中容量发电厂、大容量发电厂
蒸汽初参数	中、低压发电厂，高压发电厂，超高压发电厂，亚临界发电厂，超临界、超超临界发电厂
电厂位置	坑口、港口、路口电厂，负荷中心电厂，位于煤源与负荷中心间电厂
承担负荷	带基本负荷、带中间负荷、带尖峰负荷电厂
机炉配合	非单元机组、单元机组电厂
服务范围	系统中发电厂、区域性电厂、自备电厂、列车电站、孤立电厂

原子能是巨大的能源，但由于原子能用于发电起步较晚，以致现阶段原子能发电量在全世界总发电量中所占的比重仍然不大；风力发电受到地理环境的很大限制；至于太阳能发电、地热发电和潮汐发电等，目前它们的规模都还很小，其应用场所亦受客观特定条件的限制。因此，就我国的情况而言，在今后相当长的时期内电能主要还是依靠热力发电厂和水力发电厂来生产与供应。

热力发电和水力发电各有其特点，在电力工业中它们均占有重要的地位。水力发电不需消耗燃料，发电成本较低，运行操作比较简单，但水电站工程浩大、投资多、建期长，布局和规模受自然条件的限制，其发电能力在枯水季节将大幅度减小；热力发电要耗用大量燃料，发电成本较高，技术管理较为复杂，但却具有投资较少、建设周期较短、布局和规模灵活、可以既供电又供热等许多优点。这就决定了热力发电在绝大多数国家的电力工业中均占有很大的比重。

据联合国能源统计资料，2000年全世界发电装机容量已超过32亿kW，年发电量超过148387.5亿kW·h，其中火电占63.40%，水电占17.92%，核电占17.10%，地热及其他能源发电占1.58%。表1-9为我国2005年及规划中2020年各类发电容量所占的比例。

表 1-9 我国 2005 年及规划中 2020 年各类发电容量所占的比例

发电方式	2005 年	2020 年
燃煤电站	72.28%	63.3%
水电站	22.70%	23.7%
天然气电站	3.5%	7.3%
核电站	1.32%	4.2%
可再生能源	0.2%	1.5%

## (二) 发电厂容量

发电厂容量用该发电厂所有发电机组的总功率来表示。电功率的单位是瓦 [特] (W)，所以发电机的功率也采用瓦 [特]。实用时，瓦 [特] 这个单位太小，就用千瓦 (kW) 或兆瓦 (MW) 为单位。例如，某发电厂最终装有 4 台功率为 600MW 的汽轮发电机组，就说该发电厂的容量为 2400MW。发电厂的容量代表了该电厂的规模和等级。

## 第二节 热力发电厂的生产过程

### 一、热力发电厂的能量转换过程和能量转换方式

从燃料化学能向电能的转化过程，目前只有下列转换链得到大工业性应用（如图 1-1 所示）。

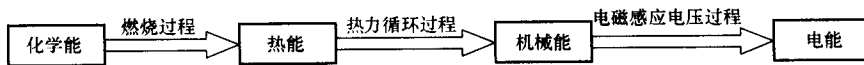


图 1-1 能量转换链

下面以燃煤火力发电厂为例，介绍电力生产过程。图 1-2 为一座燃用煤粉的小型汽轮机发电厂的生产过程示意图。燃煤利用运输工具（陆路用火车、汽车、燃煤管道等，水路用船舶等）先运至厂区的储煤场进行储存。燃煤火力发电厂的生产过程包括以下几部分。

#### 1. 燃料系统

燃料系统属于发电厂辅助生产系统，利用扒煤机或圆盘式给煤机等煤场设备把煤送上输煤皮带，经转运、碎煤到原煤斗。

#### 2. 制粉系统

制粉系统的任务是将原煤经过磁性金属分离、初步破碎、筛分后进行干燥和磨细，磨成一定细度的煤粉，送入炉膛进行燃烧。制粉系统包括原煤斗、给煤机、磨煤机、排粉机等设备及其管道。

#### 3. 燃烧系统

燃烧系统的任务是供给锅炉所需的燃料及空气在炉膛内进行良好的燃烧，同时将燃料燃烧时放出的热量传递给锅炉各受热面，使受热面内部的水、汽温度提高，成为高热能蒸汽。

#### 4. 汽水系统

热力发电厂电力生产过程中，汽水系统包括主蒸汽管道系统、主给水管道系统、回热抽汽管道系统、主凝结水管道系统、疏放水系统和补水系统等，其主要设备包括锅炉、汽轮



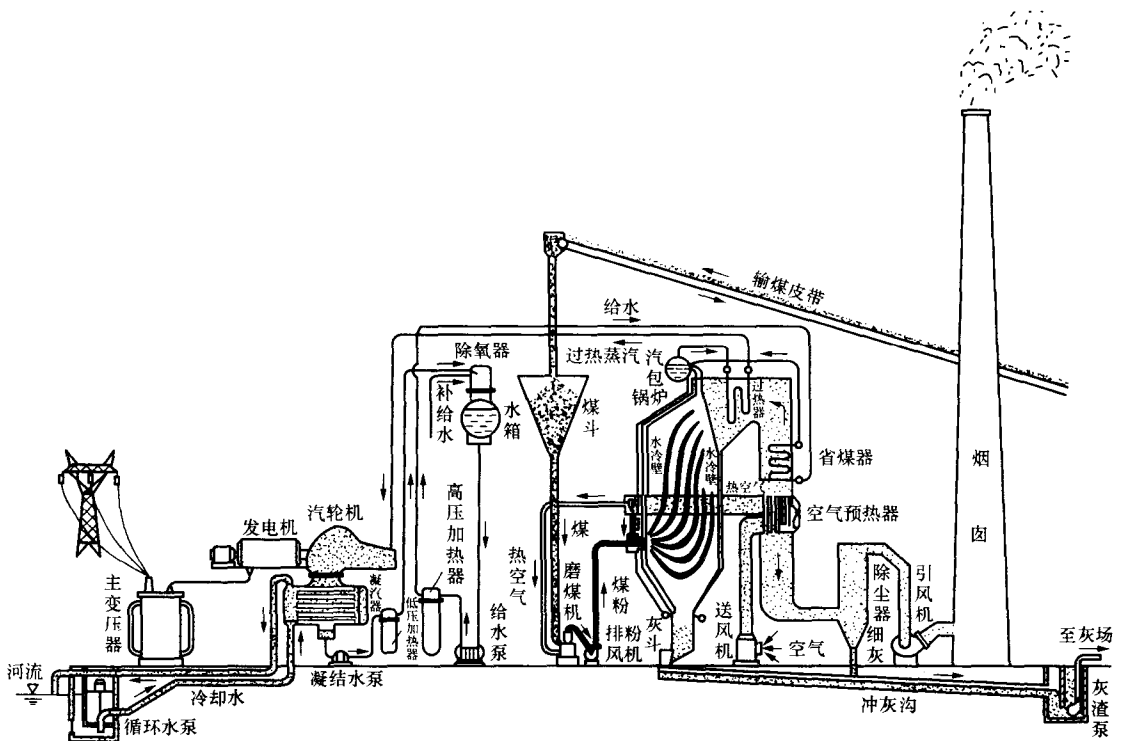


图 1-2 发电厂电力生产过程和主要设备示意图

机、凝汽器、给水泵、除氧器、加热器、凝结水泵等。

锅炉的给水先进入锅炉尾部的省煤器，利用烟气的余热加热后进入汽包，再从下降管经炉墙外侧流入锅炉下联箱，而后进入由许多水管组成的水冷壁。水在水冷壁内吸收炉膛的热量，被加热直到汽化，汽水混合物沿水冷壁再次进入汽包，经汽水分离器使汽和水分离。分离后的水又通过下降管进入水冷壁继续吸热汽化；而分离出的饱和蒸汽通过饱和蒸汽管进入过热器，在过热器内继续吸热成为过热蒸汽。高压过热蒸汽经主蒸汽管道引到汽轮机，推动汽轮机转子，使汽轮机高速旋转并带动发电机发出电能。

在汽轮机内做功后的乏汽排入凝汽器，并在其中冷却凝结成水（称为主凝结水）。汇集在凝汽器下部热水井中的主凝结水，用凝结水泵打入低压加热器，预热后再进入除氧器。除氧器也是一种回热加热器，但它还有另外一种功用，就是除去溶解于水中的氧气和其他气体。气体的存在会使传热效果恶化，而氧气还会腐蚀金属，故危害性更大。除氧的机理将在第三章第二节介绍。

在除氧器内除过氧的主凝结水和补充水汇集于除氧器水箱内，成为锅炉的给水，借助给水泵升压后，经过高压加热器加热送入锅炉的省煤器，如此又重复上述过程。低压加热器、除氧器和高压加热器的加热汽来自于汽轮机的抽汽。汽轮机的抽汽用于加热锅炉的给水，可以减少乏汽在凝汽器中的放热，提高装置的循环热效率。至于加热器的高、低压之别，是根据水侧的压力划分的。

由于锅炉和汽轮机对给水品质的要求都很高，而汽水循环过程中总是难免有一部分水和蒸汽的正常消耗和泄漏损失，故一般中、小型锅炉都要求使用经化学水处理设备处理过的高