



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

RELI FADIANCHANG

# 热力发电厂

(第三版)

叶涛 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

RELI FADIANCHANG

# 热力发电厂

(第三版)

主编 叶涛  
编写 冯慧雯 陈爱萍 冯跃武  
张燕平 邱丽霞  
主审 武学素 胡念苏



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。

本书阐述动力循环的基本原理和热经济性分析的基本方法及其在发电厂中的应用,着重介绍国内600MW及以上大型机组以及热力系统。内容包括:发电厂的热经济性分析方法,给水回热加热系统,热电厂的经济性及供热系统,发电厂的热力系统,火电厂中的泵与风机,火电厂的输煤系统及供水系统,火电厂的除尘、脱硫脱硝及除灰渣系统,火电厂主厂房布置。书中附有典型计算例题及思考题。

本书可作为普通高等学校本科热能动力工程专业“热力发电厂”课程教材,也可供高职高专电力技术类专业“热力发电厂”课程选用,同时还可供有关专业师生和工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

热力发电厂/叶涛主编. —3版. —北京:中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8861 - 8

I. 热… II. 叶… III. 热电厂—高等学校—教材  
IV. TM621

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第080573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

\*

2004年8月第一版

2009年8月第三版 2009年8月北京第七次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 20.25印张 499千字 2插页

定价 32.00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

本教材自 2004 年出版以来,我国的电力工业又有了长足的进步,2005~2008 年连续四年每年的发电装机容量增长都在 1 亿千瓦左右,这样的速度是前所未有的,它对近几年国民经济的快速增长提供了有力的保障。与此同时,我国的电源结构也发生了重大的变化,水电、核电、风电、太阳能、生物质能都已经进入世界前列或实现“零”的突破,火电建设继续向着大容量、高参数、节水环保型方向发展。2008 年,五大发电集团 600MW 及以上机组的台数比成立之初的 2002 年增长了 10~20 倍。2008 年在运行的 1000MW 级超超临界压力机组已达 10 台,世界首台 1000MW 级空冷机组也已在宁夏开工建设。核电更是加快了立项核准和建设速度,2008 年全年核准了 14 台核电机组,在建规模达 15 120MW。2008 年全年关停小火电机组容量为 16 690MW,为节能减排、保护环境和提高经济效益作出了贡献。2008 年,全国 6MW 及以上的电厂供电煤耗为  $349\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,比上年降低  $7\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

为了及时反映我国电力工业的新成就、新技术和新工艺,借本教材再版的机会,根据主审老师的建议,加强了 600MW 超临界压力机组尤其是 1000MW 级超超临界压力机组的介绍,增加了核能发电的内容,并将第五章火电厂中的泵与风机的重点放在具体应用上,为突出火电厂环境保护的重要性,适当介绍了火电厂中脱硫脱硝的主要方法和系统。希望此次再版能为学生提供最新的资讯,对学习和今后的工作有所帮助。

参加本版教材改编工作的有华中科技大学叶涛,改编了绪论、第一、五、七、八章,并对全书进行统稿;华中科技大学张燕平改编了第二、四章;山西大学邱丽霞改编了第三、六章。本书由西安交通大学武学素、武汉大学胡念苏主审,对主审老师提出的意见和建议,编者在此深表谢意。本书配有多媒体课件(请登录 <http://jc.cepp.com.cn>)。

在改编过程中,编者参考了大量的文献、资料、论文及统计报告,在书后参考文献中予以列出,编者对他们的成就表示尊重,对他们提供的资料表示感谢,有不足之处还望祈教。

编 者

2009 年 6 月

## 第三版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

本书注重使学生在学习中对热力发电厂有一个切实的整体概念，在讲述基本动力循环以及理论分析方法的基础上，更注重与实际的发电厂热力系统相联系。本次修订保留了原书的基本构架，结合近年来电力工业的发展和高校教学改革的成果，对部分章节的内容进行了调整和更新。

本书取材以 300、600MW 机组及热力系统为主，同时对国家提倡的环保和节能项目——燃气—蒸汽联合循环、燃煤的联合循环等给予一定的关注。

本书由华中科技大学叶涛主编，并分工编写绪论、第二、四章，华中科技大学冯慧雯分工编写第五、八章，南京工程学院陈爱萍分工编写第一、七章，山西大学冯跃武分工编写第三、六章。全书由西安交通大学武学素教授主审，武教授认真仔细的审阅和中肯的意见，我们获益匪浅，也使本书得以增辉，编者在此深表谢意。在编写过程中借鉴了各兄弟院校、锅炉制造厂、汽轮机制造厂、电力设计院和火力发电厂的宝贵经验和材料，作者谨向他们表示诚挚的谢意。

限于编者水平和编写时间短促，不妥之处在所难免，祈使用本书的教师、同学和其他读者不吝指教，编者将不胜感谢！

编者

2006年6月



## 目 录

前言	
第二版前言	
绪论	1
<b>第一章 热力发电厂动力循环及其热经济性</b>	<b>8</b>
第一节 热力发电厂热经济性的评价方法	8
第二节 凝汽式发电厂的主要热经济性指标	19
第三节 发电厂的动力循环	21
第四节 核能发电	56
思考题	67
<b>第二章 发电厂的回热加热系统</b>	<b>69</b>
第一节 回热加热器的类型	69
第二节 表面式加热器及系统的热经济性	74
第三节 给水除氧及除氧器	83
第四节 除氧器的运行及其热经济性分析	90
第五节 汽轮机组原则性热力系统计算	99
思考题	111
<b>第三章 热电厂的热经济性及其供热系统</b>	<b>113</b>
第一节 热负荷及其载热质	113
第二节 热电联合生产及热电厂总热耗量的分配	120
第三节 热电厂的主要热经济指标与热电联产节约燃料的条件	122
第四节 热电厂的热化系数与供热式机组的选型	133
第五节 热电厂的供热系统	138
思考题	144
<b>第四章 发电厂的热力系统</b>	<b>146</b>
第一节 热力系统及主设备选择原则	146
第二节 发电厂的辅助热力系统	149
第三节 发电厂原则性热力系统举例	156
第四节 发电厂原则性热力系统的计算	165
第五节 发电厂的管道阀门	175
第六节 主蒸汽系统	186
第七节 中间再热机组的旁路系统	191
第八节 给水系统	199
第九节 回热全面性热力系统及运行	206
第十节 发电厂疏放水系统	216

第十一节 发电厂全面性热力系统 .....	219
思考题 .....	220
<b>第五章 电厂中的泵和风机</b> .....	<b>222</b>
第一节 概述 .....	222
第二节 泵与风机的性能曲线 .....	234
第三节 液力耦合器 .....	241
第四节 泵的汽蚀 .....	245
第五节 泵与风机的运行 .....	248
思考题 .....	255
<b>第六章 火电厂输煤系统及供水系统</b> .....	<b>256</b>
第一节 火电厂燃料运输系统 .....	256
第二节 火电厂的供水系统 .....	267
思考题 .....	278
<b>第七章 火电厂的除尘、脱硫脱硝和除灰渣系统</b> .....	<b>280</b>
第一节 电力环境保护概述 .....	280
第二节 火电厂的除尘设备 .....	281
第三节 烟气脱硫与烟气脱硝系统 .....	289
第四节 火电厂的除灰渣系统 .....	294
思考题 .....	302
<b>第八章 火电厂主厂房布置</b> .....	<b>303</b>
第一节 概述 .....	303
第二节 主厂房的布置类型及特点 .....	304
第三节 主厂房内主要设备的布置 .....	308
思考题 .....	316
<b>参考文献</b> .....	<b>317</b>

## 绪 论

### 一、改革开放 30 年的中国电力工业

改革开放 30 年来,作为国民经济重要的基础产业,电力工业走过了一条辉煌的改革之路,实现了历史性的大跨越。

改革开放前的 1978 年,全国电力装机总量只有 5712 万千瓦,年发电量仅 2566 亿千瓦时。截至 2007 年底,我国装机总量已达到 7.18 亿千瓦,发电量达到 3.26 万亿千瓦时,分别为 1978 年的 12.6 倍和 12.7 倍。

30 年来中国电力工业发展之快,创造了世界电力发展史上的奇迹:我国电力装机容量 1987 年突破 1 亿千瓦,1995 年达到 2 亿千瓦,2000 年突破 3 亿千瓦,自 2004 年突破 4 亿千瓦以来,我国发电装机容量连续保持每年新增 1 亿千瓦的迅猛势头,2008 年底已达到 7.925 3 亿千瓦。1990 年底,我国发电装机容量仅为美国的 20.3%;至 2007 年底,我国发电装机容量已达到美国的 68%左右,差距大大缩小。2007 年底,我国发电装机容量已大致相当于世界前 10 位电力大国中日本、德国、加拿大、法国和英国 5 个国家发电装机容量的总和。我国仅 2006 年一年投产的发电装机容量,就已相当于加拿大、法国、德国和英国这几个国家的发电装机容量之和。

1978 年,我国发电装机容量和发电量仅仅分别居世界第八位和第七位,30 年后的今天,我国发电装机容量和发电量分别以年均 9.1%和 9.2%的速度增长,我国已成为发电装机容量和发电量连续 13 年位居世界第二位的电力生产和消费大国。30 年来,我国电力工业实现了跨越式的发展,创造了世界电力发展史上难以逾越的纪录。

据统计,全世界只有美国在 20 世纪 70 年代曾经达到过年投产装机容量 5000 万千瓦,而我国 2007 年新投产的发电装机容量就超过 1 亿千瓦。

在电力总量快速增长的同时,电能质量也明显提高。一方面是电力结构不断优化,电力工业装备和技术水平已跻身世界大国行列。改革开放初期,中国只有为数不多的 200MW 火电机组。目前,300MW 及以上大型火电机组比重达到 59%,600MW 及以上清洁高效机组已成为新建项目的主力机型,并逐步向世界最先进水平的百万千瓦级超超临界压力机组发展。截至 2008 年 9 月底,全国已有 10 台百万千瓦超超临界压力机组投运。大机组的广泛应用使我国火电的发电效率大大提高。水电、核电、风电占能源生产总量的比例由 1978 年的 3.1%提高到 2007 年的 8.2%。到 2007 年末,我国水电装机容量达到 1.5 亿千瓦,位居世界第一,比 2002 年增加了 72%;核电装机容量达 906 万千瓦,比 2002 年增加了一倍,风电装机容量为 605 万千瓦,跃居世界第 5 位,2007 年一年的发展规模相当于历年风电装机容量总和,且在近几年呈倍增式发展态势。

另一方面是电力在节能环保方面取得的进展:2007 年,全国共关停小火电机组 553 台,容量达 1438 万千瓦,比当年关停 1000 万千瓦的目标超额了 43.8%。2007 年,全国 6000 千瓦及以上电厂供电煤耗比 2006 年降低  $11\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,达到  $356\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,比 1978 年降低  $115\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,是近年来下降幅度最大的一年,全年节约标准煤 2800 万 t 左右。2008



年1~10月份该值达到 $347\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,当年美国是 $360\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 左右。2006年建成并投入运行的燃煤电厂脱硫装机容量为1.04亿千瓦,首次实现当年新增脱硫装机容量超过新增发电装机容量;装备脱硫设施的火电机组占全部火电机组的比重逐年增加,2005~2007年的三年中分别为12.0%、30.0%和50%,2008年超过60%。2007年,全国电力二氧化硫排放量比2006年减少9.1%,为近年来全国二氧化硫年排放总量首次下降作出了贡献。美国火电机组安装脱硫装置的比例约为32%,我国每千瓦时的二氧化硫的排放量已经低于美国。我国烟尘排放在1978年的时候是400万t,2007年为300万t左右。也就是说电力工业大力发展,但是烟尘的排放量是下降的,应该和世界发达国家基本上持平了。

2007年,全国发电厂平均厂用电率5.83%,比2006年降低0.1%,其中火电厂平均厂用电率6.62%,比2006年降低0.15%。

中国电网的发展也创造了世界电力史上的奇迹,总规模已居世界首位。1978年,我国35kV及以上输电线路维护长度仅为23万km,变电设备容量为1.26亿 $\text{kV}\cdot\text{A}$ ,到2007年底,我国35kV及以上输电线路维护长度已达到110万km,变电设备容量已达到24亿 $\text{kV}\cdot\text{A}$ ,分别是1978年的4.8倍和19.3倍,绝大多数省、区、市行政村通电率都已达到99%以上,农网供电可靠率达到99.38%。目前全国部分地区已形成了500kV为主(西北地区为330kV)的电网主网架。除西藏、新疆、海南及台湾外,全国六大区域电网已实现了互联,全国电网基本形成,跨区跨省送电稳步增长。750kV输变电线路投入运行、 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程和1000kV特高压试验示范工程开工建设,我国已进入更高等级输电发展阶段。2007年新增220kV及以上变电设备就达1.8848亿 $\text{kV}\cdot\text{A}$ 。2007年,全国电网输配电线损率6.97%,比2006年降低0.07%,全年节约标准煤约60万t。2007年,全国共有23个省份开展了发电权交易,累计完成交易电量约540亿千瓦时,相当于节约标准煤620万t,减少二氧化硫排放14万t。

30年来,我国电力装备制造业也取得长足进步:①超超临界压力机组技术应用达到国际先进水平。②大型空冷发电机组的开发应用居国际领先地位,2007年,铜川电厂首台国产600MW空冷燃煤机组顺利投产发电,标志着我国已成功掌握了世界先进的大型空冷火力发电技术,为同类型机组的设计和运行起到示范作用,为富煤缺水地区建设火电厂探索出一条可行的道路。机组主机采用直接空冷技术,同步安装烟气脱硫装置,比常规湿冷机组节水85%以上。该厂一期工程是国家空冷机组国产化依托项目。③我国已成为世界上大型循环流化床锅炉应用最多的国家。④以三峡工程为代表的大型水电机组的制造能力和水平迅速崛起,水电站控制自动化水平、大坝建设等重大技术取得重要突破,已达到世界先进水平。⑤在核电等其他领域也同样取得突破,核电已经从最初的完全靠技术引进,到目前已经掌握了300MW、初步掌握了1000MW压水堆核电机组的设计和建造技术,世界上首台使用AP1000技术的核电站——三门核电1号机将于2013年11月投入商业运行。两年内中国计划新建的核电站将多达9座。根据我国核电产业发展规划,到2020年核电总装机容量要达到4000万~6000万千瓦,占全国电力总装机容量的4%~6%。⑥可再生能源发电技术也发展迅速,技术开发取得实质进展,产业建设初现规模。

电力工业实现大跨越,改革开放无疑是最重要的推动力。30年来,电力行业以改革促发展,不断加快电力建设步伐,加大结构调整力度,加强企业经营管理,转变电力发展方式,实现了电力供应的历史性跨越。可以说,每一步改革都是一次生产力的解放,都激发了

行业的活力。

改革开放之初，为了消除长期制约国民经济发展的全国大面积缺电的状况，开始了体制上的改革，同时利用外资，开展国际合作，打破了独家投资办电的格局，调动了中央、地区以及外资等多方面的积极性，促进了电力投资主体多元化，有力地推动了电力工业的快速发展，很快在全国范围内实现了电力供需的基本平衡。

随着社会主义市场经济体制的不断建立发展和改革开放的不断深入，按照公司化原则、商业化运营、法制化管理的改革思路，电力行业逐步实现了政企分开，颁布实施了《电力法》，确立了电力企业的法人主体地位。2002年，按照国务院5号文件，电力行业实施厂网分开，组建了两家电网公司、五家发电集团公司和四家辅业集团公司，出台了电价改革方案和相应的改革措施，改进了电力项目投资审批制度，设立了电力监管机构，出台了《电力监管条例》和相关配套政策，进一步强调了行业协会的自律、协调、监督、服务职能，初步形成了政府宏观调控，监管机构依法监管，企业依法自主经营，行业协会自律管理和服务的电力体制格局，电力行业迎来了又一次快速发展的新机遇。

30年的改革开放使中国电力工业在规模上、技术上均跨入世界电力的先进行列，但中国电力工业的发展同样面临资源和环境两个瓶颈。目前，中国人均装机仅0.54kW，与工业化国家相比还存在较大差距。随着经济发展和社会进步，中国的电力需求还将进一步增加。中国电力工业可持续发展，仍然需克服很多困难，解决很多问题，比如能源消费过度依赖煤炭，电源结构不尽合理；中国发电量的80%以上来自煤电，大量消耗煤炭造成了较大的环境和运输压力；电网建设相对滞后，电网与电源的结构性矛盾在一定范围内仍然存在，局部地区“窝电”和缺电并存。电力市场化改革任务还未完成，电价机制需要进一步理顺，电网调度监管体系尚不健全。此外，受当前国际金融危机影响，中国电力市场供需关系也面临很多不确定性因素，无疑为电力工业的结构优化增加了困难。

## 二、火力发电技术发展的主要方向

继续实行大电站、大机组、高参数、环保节水的技术路线，采用超临界、超超临界压力机组及循环流化床技术，整体煤气化发电技术，增大热电联产（包括热、电、冷、气多联产）、燃气—蒸汽联合循环及分布式能源系统在电源中的比例等，以提高火力发电厂效率、降低发电成本、减少环境污染为目标。

(1) 火电机组的建设主要是以600、1000MW超临界和超超临界压力机组为主，它们具有效率高、煤耗低、自动化程度高、运行人员少的特点，而且还有建设周期短、单位容量占地面积小等适合我国国情的优势。改革开放30年的成就已经说明了这一点，今后还会坚持走下去。

在北方缺水地区发展大型空冷机组，进一步完善600MW等级空冷机组，着重在直接空冷技术上。

截至2007年底，全国发电装机容量超过200万千瓦的发电企业共有30家，装机总容量48683万千瓦，占全国总装机容量的67.8%；其中，中央企业12家，总容量37998万千瓦，占全国装机总容量的52.9%。

30家发电企业的火电（含天然气）和清洁能源（含天然气）发电装机容量分别为40809万千瓦和8891万千瓦，分别占其全部容量的83.8%和18.3%。

2007年1月20日，国务院批转发展改革委、能源办国发〔2007〕2号《关于加快关停

小火电机组若干意见的通知》明确了“十一五”期间关停机组的范围，将全国小火电机组关停目标分解到各省（区、市）。同时，在新建电源项目安排上，结合小火电机组关停因素，对关停工作成效显著的省份和电力企业优先给予支持。

2007年1月29日，国家发改委召开全国电力工业“上大压小”节能减排工作会议，落实“十一五”期间全国关停小火电机组5000万千瓦任务。除西藏自治区外，国家发改委与30个省（区、市）签订《关停目标责任书》。根据我国目前经济增长减缓的现状，正在考虑将“压小”扩大到100MW机组。欧洲也在实施“上大压小”的计划，他们的“压小”已经扩大到150~210MW的凝汽机组，如德国Boxberg电厂停役12台210MW机组，新建1×910MW超临界压力机组。在“上大”方面，欧洲普遍采用800~1100MW的超临界、超超临界压力机组。

(2) 坚持烟气脱硫（Flue Gas Desulfurization, FGD）、脱硝（Selective Catalytic Reduction, SCR）、高效除尘成套技术的推广。环保的要求越来越严，很多地方已出台了电站必须加装脱硫装置和采用低 $\text{NO}_x$ 燃烧器，以减少 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 排放的地方性法规。推广高效、节能、价格适宜的静电除尘器和布袋除尘器。

目前世界上技术比较成熟的有常压循环流化床锅炉（CFBC）、增压流化床锅炉联合循环（PFBC-CC）以及整体煤气化联合循环（IGCC）三种。燃煤联合循环发电机组与常规机组加脱硫脱硝装置相比，效率更高，至少可提高3%~6%；环保性能更好，只是常规机组排放量的1/10~1/5。

目前，国内已具备设计制造100MW等级CFBC锅炉的能力，现正向300MW等级锅炉发展。波兰的Lagisza电厂已在建460MW超临界压力CFB项目，设计参数为27.5MPa/560℃/580℃，该项目由芬兰设计和供货，同时计划开发超超临界压力800MW参数为30MPa/600℃/600℃的CFB锅炉。

PFBC-CC的发展方向是提高汽轮机进口的蒸汽参数和燃气轮机进口的燃气温度，开发大容量（300MW以上）、第二代（燃气轮机进口带补燃）的PFBC-CC机组。

IGCC是一项面向21世纪、高效清洁的燃煤联合循环发电技术，目前世界上有4台250~300MW级的IGCC机组投入运行，最高效率达45%， $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 及粉尘排放都非常低，技术已基本成熟。我国正在准备引进一套设备，建立示范电厂的同时引进部分技术，逐步实现国产化。

推动洁净煤发电的示范工程，预留碳捕获系统（Carbon Capture System, CCS）场地，在消化吸收国外技术的基础上，加快国产化的研制步伐，为逐步开发低碳经济作技术准备。英国E.ON UK公司计划2012年前建成2×800MW（29MPa/600℃/620℃）超超临界压力机组，并预留了CCS场地，以达到完成减排10% $\text{CO}_2$ 的目标。与此同时还积极推进450MW的IGCC项目，配套建设脱 $\text{CO}_2$ 率达85%的CCS系统。

2007年12月11日，中国华电集团公司与英国益可环境金融集团公司、德意志银行在京签署“CDM全面战略合作框架协议暨超超临界项目碳减排条款书”。这是我国电力行业二氧化碳减排第一笔超超临界购碳协议，也是二氧化碳减排出售单笔之最。

(3) 坚决执行国家《2010年热电联产发展规划及2020年远景发展目标》。在有条件的地方，都要积极发展热电联产，热、电、冷、气多联产。该规划提出：到2020年，全国热电联产总装机容量将达到2亿千瓦，其中城市集中供热和工业生产用热的热电联产装机容量



都约为 1 亿千瓦。预计到 2020 年, 热电联产将占全国发电总装机容量的 22%, 在火电机组中的比例为 37% 左右。热电联产要以热定电, 这是电厂规模和机型选择的基本原则, 根据热负荷大小和供热量的多少, 热电联产机组应当实行大、中、小并举, 在大城市热负荷量大且集中的地方, 支持 200、300MW 和 600MW 的大型供热机组, 在城市供热方面发挥主力军作用; 对于热负荷小和以生物质能、太阳能、垃圾等为燃料的热电联产, 就可以是几万千瓦到几百千瓦的小机组, 这些机组虽小, 但由于是热电联产, 其效率往往比 300、600MW 的凝汽式机组的效率还高。另外, 还要积极推进供热体制的改革, 引入市场机制, 实行用热商品化、货币化, 谁采暖、谁交钱, 用多少热, 交多少钱, 这也有利于树立节能意识。与此同时要提供调节手段, 使热力系统设计便于使用者根据其需求进行温度控制调节和计量核算。

(4) 开展以大型燃气轮机为核心的联合循环发电技术, 联合循环机组具有提高能源利用效率, 保护环境和改善电网调峰性能等多重效益。

天然气产量的增加和减轻环保压力, 使燃气轮机发展非常迅速, 燃气轮机进口前的初温有了较大提高, 当初温为 1260~1300℃ 时, 简单循环效率达 36%~40%, 联合循环效率达 55%~58%; 当初温提高到 1430℃ 时, 简单循环效率大于或等于 40%, 联合循环效率可大于或等于 60%。有资料表明, 目前全世界新增火电容量中, 燃气轮机及其联合循环机组占到了 50% 以上, 美国在最近 10 年新增容量为 113GW, 其中燃机电站就占 44%; 德国更是占到了 2/3 左右。

我国燃机发电的总装机容量仅占全国总装机容量的 2%~8%, 且单机容量偏小。今后需发展单机容量 300MW 级的燃气发电机组, 提高其在总装机容量中的比重, 对于改善电网运行状况, 为电网提供更加灵活的备用电源, 增大调峰的灵活性, 减少 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 的排放都具有重大的意义。

(5) 推广分布式能源系统的建设。目前, 分布式能源发电已成为世界电力发展的新方向, 它的大规模应用将对能源, 尤其是电力系统的产业结构调整和技术进步产生深刻的影响, 改变能源的生产方式、供给方式和消费方式, 给能源产业注入新的活力。中国的电力工业正处在快速发展阶段, 具备实现跨越式发展的有利条件, 在大力发展集中供电的同时, 如果能抓住机遇, 加快发展分布式发电, 可以建立一种分布式能源发电与集中供电互相补充、互相支持的新型电力工业体系。不仅可以提高电力系统的效率, 而且可以提供更普遍、更可靠、质量更高的电力服务, 更好地促进经济和社会的可持续发展。

据报道, 上海规划到 2010 年前建成 100 项容量为 150 万千瓦的分布式热电联产系统的示范工程, 到 2020 年, 在 2010 年基础上再翻一倍达到 300 万千瓦, 北京等城市也在做这方面的规划。

为此, 我们还需要在以下方面努力: 首先, 突破分布式能源技术的核心设备依赖进口的瓶颈, 有效缩短分布式能源系统的投资成本收回周期; 其次, 完成科学全面的符合中国实际的分布式能源解决方案; 第三, 探索、研究、解决多个分布式能源电站发电的独立组网和并网方面的政策层面和技术层面的问题。

(6) 积极稳妥地加快核能发电的建设。2007 年 4 月 19 日, 国务院批复同意组建国家核电技术公司。5 月 22 日, “国家核电”在人民大会堂正式揭牌成立。国务院批复文件指出, 组建国家核电技术公司是实施国家能源发展战略的需要, 是核电体制改革的重大突破, 是尽

快提高我国核电自主化能力、推进核电建设、加快能源结构调整的重大举措。

近年来,国家实施了多项重大举措,使我国核电事业步入了快速发展的轨道。营造了一个有利于核电发展的法制环境;颁布了核电中长期发展规划,确定了我国核电发展的目标;明确了我国核电发展的技术路线,决定引进目前世界上最先进的第三代核电 AP1000 技术,走引进、消化、吸收和再创新的发展道路;在国家中长期科技发展规划中列入了大型先进压水堆和高温气冷堆核电站重大专项;对核电管理体制进行了改革,将核电业务纳入到国家能源局统一管理;陆续批准并开工建设一批新的核电项目。据 2008 年 11 月 27 日人民网报道,继福建福清核电站主体动工之后,年底前还将有浙江方家山、广东阳江两大核电站开建。2009 年,引进第三代核电技术的山东海阳、浙江三门和广东台山三大核电站将相继浇筑第一罐混凝土,总投资高达 2200 亿元。国家原子能机构相关负责人透露,两年内中国计划新建的核电站将多达 9 座。全球发展核电的国家装机容量平均水平约 17%,中国目前装机容量仅占全国电力总装机容量的 1.3%,所以核电发展空间很大。尤其经历了 2008 年冰雪灾害造成的电力紧缺之后,核电建设备受重视,而金融危机背景下 4 万亿元投资计划出台后,核电项目的审批进度明显加快。如总投资 955 亿元的广东阳江核电工程和浙江秦山核电厂扩建工程——方家山工程,就是 2008 年 11 月初国家为刺激内需首次核准的核电新项目。这两个核电站及刚刚开工的福清核电站,装机容量分别为 600 万、200 万、600 万千瓦,预计将于 2013~2014 年并网发电,届时将大大改善沿海地区的能源结构。

与此同时,中国核电建设还正在从沿海向内陆地区推进。江西彭泽、湖南桃花江、湖北咸宁大畈核电项目均已获准启动前期准备工作。根据我国核电产业发展规划,到 2020 年核电总装机容量要达到 4000 万~6000 万千瓦,占全国电力总装机容量的 4%~6%。在此蓝图下,未来十多年中,中国将投资至少 4500 亿~7000 亿元人民币用于核电建设。

### 三、热力发电厂的类型、基本要求及本课程的任务

#### (一) 热力发电厂的类型

(1) 按能源利用情况可分为化石燃料发电厂、原子能发电厂(核电站)、新能源(地热、太阳能等)发电厂。

(2) 按能量供应情况可分为只供电的凝汽式发电厂和同时供应电能与热能的热电厂。

(3) 按原动机类型可分为汽轮机发电厂、燃气轮机发电厂、内燃机发电厂和燃气—蒸汽联合循环发电厂。

(4) 按机组或火电厂容量等级分单机容量 6MW 及以下、全厂容量 25MW 及以下的小型发电厂,单机容量 6~50MW、全厂容量 25~250MW 的中型发电厂,单机容量 100MW 及以上、全厂容量 250MW 及以上的大型发电厂。

(5) 按进入汽轮机的蒸汽初参数分为中低压(3.43MPa 及以下)电厂、高压(8.83MPa)电厂、超高压(12.75MPa)电厂、亚临界压力(16.18MPa)电厂和超临界压力(23.54MPa)电厂。

(6) 按电厂位置特点分为坑口(路口、港口)发电厂、负荷中心发电厂。

(7) 按电厂承担电网负荷的性质分为基本负荷发电厂、中间负荷(腰荷)发电厂和调峰发电厂。

(8) 按机炉组合分为非单元机组发电厂和单元机组发电厂。

(9) 按服务规模分为区域性发电厂、企业自备发电厂、移动式(如列车)发电厂和未并

入电网的孤立发电厂。

### (二) 对热力发电厂的基本要求

努力提高发电厂的安全可靠性、可用率；提高发电厂的经济性，节约用地，缩短建设周期，降低工程造价，降低煤耗、水耗和厂用电率，以节约能源；考虑技术的先进性和适用性，提高机械化、自动化水平和劳动生产率；严格执行《中华人民共和国环境保护法》，符合劳动安全与工业卫生的有关规定；便于施工，便于运行、检修和扩建。

### (三) 本课程的任务和作用

在已修工程热力学、汽轮机原理和锅炉原理等课程的基础上，本课程以热力发电厂整体为研究对象，着重研究汽轮机发电厂的热功转换理论基础及其热力设备和系统，在安全、经济、满发的前提下，分析其经济效益，热经济性的定性分析以熵方法为主，定量计算为常规热平衡法。

通过本课程的学习，使学生了解现代大型热力发电厂的组成。掌握和运用热功转换基本理论，能正确进行热经济性分析，在保证电力安全生产的前提下，学会分析其经济、社会效益。明确本课程是以热力发电厂整体为研究对象，以整个地区能量供应系统的效益为目标的一门政策性强、综合性强并与电厂生产实际紧密联系的专业方向课程，通过本门课程的学习使学生在这方面的能力得到一次训练，也为学生将来从事电厂实际工作和科研工作打下必要的基础。



## 第一章 热力发电厂动力循环及其热经济性

### 第一节 热力发电厂热经济性的评价方法

#### 一、评价热力发电厂热经济性的主要方法

凝汽式发电厂生产电能的过程是一个能量转换的过程,即燃料的化学能通过锅炉转换成蒸汽的热能,蒸汽在汽轮机中膨胀做功,将蒸汽的热能转变成机械能,通过发电机最终将机械能转换成电能。在整个能量转换过程的不同阶段存在着数量不等、原因不同的各种损失,使热能不能全部有效利用。发电厂热经济性是通过能量转换过程中能量的利用程度或损失大小来衡量或评价的。要提高发电厂的热经济性,就要研究发电厂能量转换及利用过程中的各项损失产生的部位、大小、原因及其相互关系,以便找出减少这些热损失的方法和相应措施。

评价发电厂热经济性的方法主要有两种:以热力学第一定律为基础的热量法(热效率法),以热力学第二定律为基础的熵方法(做功能力损失法)或焓方法。

热量法是以燃料化学能从数量上被利用的程度来评价电厂的热经济性,一般用于电厂热经济性定量分析。

熵方法或焓方法是以燃料化学能的做功能力被利用的程度来评价电厂的热经济性,一般用于电厂热经济性定性分析。

#### 二、热量法

热量法以热力学第一定律为理论基础,以热效率或热损失率的大小来衡量电厂或热力设备的热经济性。

热效率反映了热力设备将输入能量转换成输出有效能量的程度,在发电厂整个能量转换过程的不同阶段,采用各种效率来反映不同阶段的能量的有效利用程度,用能量损失率来反映各阶段能量损失的大小。

根据能量平衡关系得



热效率  $\eta$  的通用表达式为

$$\eta = \frac{\text{有效利用能量}}{\text{输入总能量}} \times 100\% = \left(1 - \frac{\text{损失能量}}{\text{输入总能量}}\right) \times 100\%$$

下面以图 1-1 所示的凝汽式发电厂为例,阐述凝汽式发电厂的各种热损失和热效率。

#### (一) 锅炉设备的热损失与锅炉效率

锅炉设备中的热损失主要包括排烟热损失、散热损失、未完全燃烧热损失、排污热损失等。其中排烟热损失占总损失的 40%~50%。

锅炉效率  $\eta_b$  表示锅炉设备的热负荷与输入燃料的热量之比,其表达式为

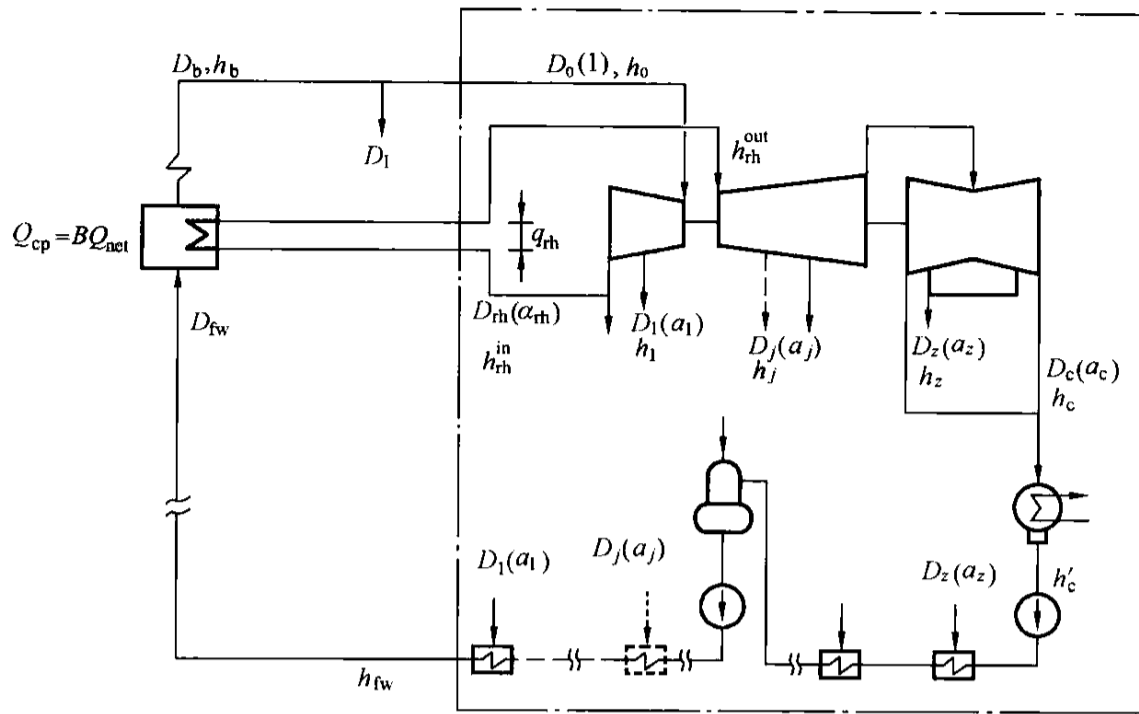


图 1-1 凝汽式发电厂热力系统图

$$\eta_b = \frac{Q_b}{Q_{cp}} = \frac{Q_b}{BQ_{net}} = \frac{D_b(h_b - h_{fw})}{BQ_{net}} = 1 - \frac{\Delta Q_b}{Q_{cp}} \quad (1-1)$$

锅炉热损失率为

$$\zeta_b = \frac{\Delta Q_b}{Q_{cp}} = \frac{Q_{cp} - Q_b}{Q_{cp}} = 1 - \frac{Q_b}{Q_{cp}} = 1 - \eta_b \quad (1-2)$$

上两式中  $Q_b$ ——锅炉热负荷, kJ/h, 对再热机组  $Q_b = D_b(h_b - h_{fw}) + D_{rh}q_{rh}$ ;

$Q_{cp}$ ——全厂热耗量, kJ/h;

$B$ ——锅炉煤耗量, kg/h;

$Q_{net}$ ——煤的低位发热量, kJ/kg;

$\Delta Q_b$ ——锅炉热损失, kJ/h;

$D_b$ ——锅炉过热蒸汽流量, kg/h;

$h_b$ ——锅炉过热器出口蒸汽比焓, kJ/kg;

$h_{fw}$ ——锅炉给水比焓, kJ/kg;

$D_{rh}$ ——锅炉再热蒸汽流量, kg/h;

$q_{rh}$ ——1kg 再热蒸汽的吸热量,  $q_{rh} = h_{rh}^{out} - h_{rh}^{in}$ , kJ/kg。

锅炉效率反映了锅炉设备运行经济性的完善程度, 其影响因素很多, 如锅炉的参数、容量、结构特性、燃烧方式及燃料的种类等。大型锅炉效率一般在 0.90~0.94 范围内。

## (二) 管道热损失与管道效率

在工质流过主蒸汽管道时, 会有一部分热损失。管道效率用汽轮机的热耗量  $Q_0$  与锅炉设备热负荷  $Q_b$  之比表示, 其表达式为

$$\eta_p = \frac{Q_0}{Q_b} = 1 - \frac{\Delta Q_p}{Q_b} \quad (1-3)$$

管道热损失率  $\zeta_p$  为

$$\zeta_p = \frac{\Delta Q_p}{Q_{cp}} = \frac{\Delta Q_p}{Q_b} \frac{Q_b}{Q_{cp}} = \frac{Q_b}{Q_{cp}} \left(1 - \frac{Q_0}{Q_b}\right) = \eta_b(1 - \eta_p) \quad (1-4)$$

式中  $\Delta Q_p$ ——管道热损失。

管道的效率反映了管道设施保温的完善程度和工质损失热量的大小。管道的效率一般为 0.98~0.99。

### (三) 汽轮机的冷源损失与汽轮机绝对内效率

在汽轮机中,冷源损失包括两部分,即理想情况下(汽轮机无内部损失)汽轮机排汽在凝汽器中的放热量;蒸汽在汽轮机中实际膨胀过程中存在着进汽节流、排汽及内部(包括漏汽、摩擦、湿汽等)损失,使蒸汽做功减少而导致的冷源损失。

汽轮机的绝对内效率  $\eta_i$  表示汽轮机实际内功率与汽轮机热耗之比(即单位时间所做的实际内功与耗用的热量之比),其表达式为

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_0} = \frac{1 - \Delta Q_c}{Q_0} = \frac{W_i}{W_a} \frac{W_a}{Q_0} = \eta_{ri} \eta_t \quad (1-5)$$

$$\text{其中} \quad \eta_{ri} = \frac{W_i}{W_a} \quad (1-6)$$

$$\eta_t = \frac{W_a}{Q_0} \quad (1-7)$$

式中  $Q_0$ ——汽轮机汽耗为  $D_0$  时的热耗, kJ/h;

$W_i$ ——汽轮机汽耗为  $D_0$  时实际内功率, kJ/h;

$W_a$ ——汽轮机汽耗为  $D_0$  时理想内功率, kJ/h;

$\Delta Q_c$ ——汽轮机冷源热损失, kJ/h;

$\eta_t$ ——循环的理想热效率;

$\eta_{ri}$ ——汽轮机相对内效率。

汽轮机冷源热损失率  $\zeta_c$  为

$$\zeta_c = \frac{\Delta Q_c}{Q_{cp}} = \frac{\Delta Q_c}{Q_0} \frac{Q_0}{Q_b} \frac{Q_b}{Q_{cp}} = \frac{Q_b}{Q_{cp}} \frac{Q_0}{Q_b} \left(1 - \frac{W_i}{Q_0}\right) = \eta_b \eta_p (1 - \eta_i) \quad (1-8)$$

式(1-5)是相对于新蒸汽为  $D_0$  时的表达式。当新蒸汽为 1kg 时用汽轮机实际比内功和汽轮机比热耗表示,则汽轮机的绝对内效率的表达式为

$$\eta_i = \frac{w_i}{q_0} = 1 - \frac{\Delta q_c}{q_0} \quad (1-9)$$

$$\text{其中} \quad w_i = \frac{W_i}{D_0}, \quad q_0 = \frac{Q_0}{D_0}, \quad \Delta q_c = \frac{\Delta Q_c}{D_0}$$

另外,  $\eta_i$  计算表达式常用汽轮机汽水参数来表示上面表达式中的  $Q_0$ 、 $W_i$ 、 $q_0$ 、 $w_i$ 。  $\eta_i$  计算表达式计算时不计系统中工质的损失,新汽流量  $D_0$  与给水流量  $D_{fw}$  相等。以图 1-1 为例,以汽轮机的汽水参数所表示的  $Q_0$ 、 $W_i$ 、 $q_0$ 、 $w_i$  及  $\eta_i$  如下所述。

#### 1. 汽轮机汽耗为 $D_0$ 时的实际内功

汽轮机实际做功  $W_i$  有三种表示法:

(1)  $W_i$  以汽轮机凝汽流和各级回热汽流的内功之和表示,则实际内功为

$$\begin{aligned} W_i &= D_1(h_0 - h_1) + D_2(h_0 - h_2) + \cdots + D_z(h_0 - h_z + q_{th}) + D_c(h_0 - h_c + q_{th}) \\ &= \sum_1^z D_j \Delta h_j + D_c \Delta h_c \quad \text{kJ/h} \end{aligned} \quad (1-10)$$

式中  $D_c$ ——汽轮机凝汽量, kg/h;