



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

RELI FADIANCHANG

# 热力发电厂

(第五版)

叶 涛 张燕平 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家

# 热力发电厂

(第五版)

主编 叶 涛 张燕平

参编 陈爱萍 邱丽霞

主审 武学素 胡念苏



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

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,热电厂的热经济性及其供热系统,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。另外,对核电厂的基本原理、结构和典型热力系统也作了适当的介绍。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能源与动力工程专业“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,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,张燕平主编. —5版. —北京:中国电力出版社,2016.7

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-5123-9348-6

I. ①热… II. ①叶… ②张… III. ①热电厂—高等学校—教材 IV. ①TM621

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第111452号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京天宇星印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2004年8月第一版

2016年7月第五版 2006年7月北京第十七次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 21印张 525千字 2插页

定价43.00元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
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

“十二五”期间，我国电力行业企业继续加大结构调整力度，基建新增装机连续5年超过9000万kW，2015年我国装机总量已达到15.08亿kW。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，2015年在运行的1000MW级超超临界压力机组超过80台。世界首台1000MW级超超临界压力空冷机组也已在宁夏投运；国内首台1000MW二次再热发电机组，同时也是目前世界上最大的二次再热机组于2015年投运。核电也在稳妥地建设中，2015年在运行的核电机组已达30台，总装机容量2831万kW；在建的核电机组24台，总装机容量2672万kW。2014年我国6000kW及以上电厂供电标准煤耗率已降到318g/kWh，全国发电厂平均厂用电率已降至5%。

为了及时反映我国电力工业发展的新成就、新技术和新工艺，编者对本书进行了适当修订。

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。

本书注重使读者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，更注重与实际的热力发电厂热力系统相联系。取材以300、600MW机组及热力系统为主，对1000MW级超超临界压力机组也进行了介绍，同时对燃气-蒸汽联合循环、燃煤联合循环、核能发电、火电厂中脱硫脱硝的主要方法和系统的主要方法和系统的内容进行了介绍。

根据主审老师的建议，增加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。

华中科技大学张燕平，修订了绪论、第二章、第四章，并对全书进行统稿；华中科技大学叶涛修订了第五、八章；南京工程学院陈爱萍修订了第一、七章；山西大学邱丽霞修订了第三、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://www.cepp.sgcc.com.cn>或关注微信服务号“中国电力教材服务”）。

在修订过程中，编者参考了大量的文献、资料、论文及统计报告，列于书后参考文献中，在此对参考文献的作者表示衷心的感谢。

编 者

2016年6月

## 第四版前言

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，“十一五”期间我国电力行业企业继续加大结构调整力度，基建新增装机连续 5 年超过 9000 万 kW，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，2010 年在运行的 1000MW 级超超临界压力机组已达 33 台，在建的 1000MW 级超超临界压力机组已达 68 台；世界首台 1000MW 级超超临界压力空冷机组也已在宁夏建成。核电也在稳妥地建设中。“十一五”期间关停小火电机组容量为 72 100MW，为节能减排、保护环境和提高经济效益作出了贡献。2010 年，全国 6MW 及以上的电厂供电煤耗率为 335g/(kW·h)，比上年降低 5g/(kW·h)。“十一五”期间累计下降超过 35g/(kW·h)。

本书注重使读者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。取材以 300、600MW 机组及热力系统为主，对 1000MW 级超超临界压力机组也进行了介绍，同时对燃气-蒸汽联合循环、燃煤联合循环、核能发电、火电厂中脱硫脱硝的主要方法和系统的内容进行了介绍。

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。

参加本书修订工作的有华中科技大学叶涛、张燕平，南京工程学院陈爱萍，山西大学工程学院邱丽霞。其中叶涛修订了绪论、第五章、第八章，并对全书进行统稿；陈爱萍修订了第一、七章；张燕平修订了第二、四章；邱丽霞修订了第三、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.sgcc.com.cn>）。

在改编过程中，编者参考了大量的文献、资料、论文等，列于书后参考文献中，在此对参考文献的作者表示衷心的感谢。

编者

2012 年 6 月

## 目 录

前言	
第四版前言	
绪论	1
第一章 热力发电厂动力循环及其热经济性	7
第一节 热力发电厂热经济性的评价方法	7
第二节 凝汽式发电厂的主要热经济性指标	18
第三节 发电厂的动力循环	20
第四节 核能发电	55
思考题	67
第二章 发电厂的回热加热系统	68
第一节 回热加热器的类型	68
第二节 表面式加热器及系统的热经济性	73
第三节 给水除氧及除氧器	82
第四节 除氧器的运行及其热经济性分析	89
第五节 汽轮机组原则性热力系统计算	98
思考题	110
第三章 热电厂的热经济性及其供热系统	112
第一节 热负荷及其载热质	112
第二节 热电联合生产及热电厂总热耗量的分配	119
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	121
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	146
第四章 发电厂的热力系统	148
第一节 热力系统及主设备选择原则	148
第二节 发电厂的辅助热力系统	151
第三节 发电厂原则性热力系统举例	158
第四节 发电厂原则性热力系统的计算	170
第五节 发电厂的管道阀门	180
第六节 主蒸汽系统	191
第七节 中间再热机组的旁路系统	196
第八节 给水系统	204
第九节 回热全面性热力系统及运行	211

第十节 发电厂疏放水系统·····	221
第十一节 发电厂全面性热力系统·····	224
思考题·····	225
<b>第五章 电厂中的泵和风机·····</b>	<b>227</b>
第一节 概述·····	227
第二节 泵与风机的性能曲线·····	239
第三节 液力耦合器·····	246
第四节 泵的汽蚀·····	249
第五节 泵与风机的运行·····	253
思考题·····	260
<b>第六章 火电厂输煤系统及供水系统·····</b>	<b>261</b>
第一节 火电厂燃料运输系统·····	261
第二节 火电厂的供水系统·····	273
思考题·····	286
<b>第七章 火电厂的除尘、脱硫脱硝和除灰渣系统·····</b>	<b>288</b>
第一节 电力环境保护概述·····	288
第二节 火电厂的除尘设备·····	289
第三节 烟气脱硫与烟气脱硝系统·····	297
第四节 火电厂的除灰渣系统·····	302
思考题·····	310
<b>第八章 火电厂主厂房布置·····</b>	<b>311</b>
第一节 概述·····	311
第二节 主厂房的布置类型及特点·····	312
第三节 主厂房内主要设备的布置·····	316
思考题·····	325
<b>参考文献·····</b>	<b>326</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发展之路,实现了历史性的大跨越。

1978 年,全国电力装机总量只有 5712 万 kW,年发电量仅 2566 亿 kWh。截至 2015 年底,我国装机总量已达到 15.08 亿 kW,发电量达到 5.61 万亿 kWh,分别为 1978 年的 26.4 倍和 21.8 倍。人均装机容量达 1.1kW。

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 kW,1995 年达到 2 亿 kW,2000 年突破 3 亿 kW,2004 年突破 4 亿 kW。“十一五”期间,我国发电装机容量连续保持每年新增 9000 万 kW 的迅猛势头。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。

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。2009 年,300MW 及以上大型火电机组比重达到 69%,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 2015 年底,全国已有超过 80 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。2015 年火电装机容量为 9.9021 亿 kW,水电、核电、风电占能源生产总量的比例也在逐年提高。到 2015 年末,我国水电装机容量达到 3.1937 亿 kW,位居世界第一;核电装机容量达 0.2608 亿 kW,风电装机容量为 1.2934 亿 kW,居世界第一位,仅 2015 年就新增 3353 万 kW;太阳能发电装机容量为 0.4318 亿 kW。

另外,在电力节能环保方面取得的进展:2014 年,我国 6000kW 及以上电厂供电标准煤耗率已降到 318g/kWh,全国电网输电线路损失率为 6.34%。供电标准煤耗率比“十五”期末的 370g/kWh 下降了 52g/kWh,与发达国家的差距大大缩小。截至 2014 年底,已投运火电厂烟气脱硫机组容量约 7.55 亿 kW,占全国现役燃煤机组容量的 91.5%,已投运火电厂烟气脱硝机组容量约 6.6 亿 kW,占全国现役火电机组容量的 80%。电力 SO<sub>2</sub> 排放总量由 2005 年的 1300 万 t 降至 2014 年的 620 万 t;烟尘排放总量从 1980 年的 399 万 t 降至 2014 年的 98 万 t。火电行业节能减排相关法规、标准也日趋完善,常规火电烟气减排已步入正轨。

2014 年,全国发电厂平均厂用电率已降至 5%,其中火电厂平均厂用电率为 6.0%。

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 及以上输电线路长度仅为 23 万 km,变电设备容量为 1.26 亿 kVA。截至 2014 年底,



全国电网 220kV 及以上输电线路回路长度、公用变设备容量分别为 57.20 万 km、30.27 亿 kVA, 分别比 2013 年增长 5.2% 和 8.8%。截至 2014 年底, 在运在建的特高压输电线路长度超过 1.5 万 km。

30 年来, 我国电力装备制造业也取得了长足的进步: ①超超临界压力机组技术应用达到国际先进水平。1000MW 超超临界压力机组的台数已达到 88 台, 并于 2015 年 9 月投产了国内首台二次再热发电机组, 该机组同时也是目前世界上最大的二次再热机组。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、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 2016 年投入商业运行。我国在消化、吸收、全面掌握我国引进的第三代先进核电 AP1000 非能动技术的基础上, 通过再创新开发出具有我国自主知识产权先进压水堆核电机组 CAP1400、CAP1400 示范电厂将在 2016 年开工建设。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。

改革开放以来, 我国能源电力取得了举世瞩目的发展成就, 发电装机容量、用电量、电网规模均位列世界第一。中国人均装机虽然已突破 1kW, 但与发达国家相比还存在较大差距。我国能源安全、电力供应、环境污染以及温室气体排放等问题十分突出, 长期看以化石能源为主的传统能源发展方式难以为继, 必须走清洁低碳发展之路, 实施“两个替代”, 在

能源开发上实施清洁替代,以水能、太阳能、风能等清洁能源替代化石能源;在能源消费上实施电能替代,提高电能终端能源消费中的比重。

“十三五”电力规划明确指出,为保障国民经济发展需求,能源和电力需求仍将刚性增长,考虑产业转移、结构调整和绿色低碳发展,预计到2020年,我国全社会用电量将达到8万亿kWh。并将进一步加大清洁能源开发力度,能源开发重心进一步西移北移。

## 二、火力发电技术发展的主要方向

当前,世界范围内正以发展清洁能源和智能电网为契机,推动新一轮的能源变革。要解决这些突出的矛盾和问题,必须深入贯彻科学发展观,加快转变电力发展方式,推动能源生产和利用方式变革。为此,要大力实施“一特四大”战略,加快建设坚强智能电网,全面优化电源布局 and 结构,把确保电力安全作为发展的基本前提,以科技创新支撑和引领发展方式转变,实现电力行业发展质量、发展能力和经济效益的全面提升。

就火电而言,继续实行大电厂、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) 全国新建燃煤发电项目原则上要采用60万kW及以上超超临界压力机组,平均供电煤耗率低于300g标准煤/kWh(以下简称g/kWh),到2020年,现役燃煤发电机组改造后平均供电煤耗率低于310g/kWh。我国2015年9月投产的泰州电厂为国内首台二次再热发电机组,机组发电效率达47.82%,供电煤耗率为266.5g/kWh,是我国综合指标最好,同时也是世界上综合指标最好的机组。

按照《国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知》和环境保护部、国家发展和改革委员会等6部委《关于印发〈京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则〉的通知》要求,京津冀、长三角等区域除热电联产外,禁止审批新建燃煤发电项目。

(2) “十三五”规划已将“对燃煤机组全面实施超低排放和节能改造”作为100个重点建设工程之一。

全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造。环境保护部、国家发展和改革委员会、能源局于2015年12月发布了“全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案”,目标:到2020年,全国所有具备改造条件的燃煤电厂力争实现超低排放(即在基准氧含量6%条件下,烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度分别不高于10、35、50mg/m<sup>3</sup>)。全国有条件的新建燃煤发电机组达到超低排放水平。加快现役燃煤发电机组超低排放改造步伐。

具备条件的燃煤机组要实施超低排放改造。在确保供电安全前提下,将东部地区(北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南等11省市)原计划2020年前完成的超低排放改造任务提前至2017年前总体完成,要求30万kW及以上公用燃煤发电机组、10万kW及以上自备燃煤发电机组(暂不含W型火焰锅炉和循环流化床锅炉)实施超低排放改造。

将对东部地区的要求逐步扩展至全国有条件地区,要求30万kW及以上燃煤发电机组(暂不含W型火焰锅炉和循环流化床锅炉)实施超低排放改造。其中,中部地区8省力争在2018年前基本完成;西部地区12省区市及新疆生产建设兵团在2020年前完成。力争2020年前完成改造5.8亿kW。

不具备改造条件的机组要实施达标排放治理。燃煤机组必须安装高效脱硫脱硝除尘设施,推动实施烟气脱硝全工况运行。各地要加大执法监管力度,推动企业进行限期治理,一厂一策,逐一明确时间表和路线图,做到稳定达标,改造机组容量约 1.1 亿 kW。

(3) 大力开展洁净煤燃烧技术研究。“煤炭清洁高效利用技术”是“十三五”规划建设的 100 个重点建设工程之一。大力开展洁净煤燃烧技术研究,是煤炭清洁高效利用技术的关键。

目前世界上技术比较成熟的洁净煤燃烧技术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 Lagisza 电厂 460MW 超临界压力 CFB 锅炉是美国福斯特·惠勒 (FW) 公司制造的世界首台 CFB 锅炉。该机组于 2009 年 6 月正式移交商业运行,各项参数基本达到设计值。锅炉燃用燃煤发热量为 18~23MJ/kg,硫分为 0.6%~1.4%,灰分为 10%~25%,其煤耗率比常规汽包锅炉低 5%,机组效率可达到 42.7%。

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%,SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 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% CO<sub>2</sub> 的目标。与此同时还积极推进 450MW 的 IGCC 项目,配套建设脱 CO<sub>2</sub> 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。

(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环境保护的压力,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 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 的排放都具有重大的意义。

(5) 发展储能与分布式能源建设。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。“十三五”规划中把发展储能与分布式能源建设列为重点建设工程之一,按照“自发自用,余量上网、电网调节”的原则发展。

(6) 积极稳妥地进行核能发电的建设。全球目前共有可运营核电机组 439 台,其中美国作为最大的核电发展国家,拥有 99 台核电机组,发电量占其电力来源的 19.5%,而排名第二的法国拥有 58 台机组,核电占比达到 76.9%,是全球对核电依赖最大的国家。相比之下,尽管中国核电在运机组 30 台,装机容量已达世界第四,但 2015 年核电占国内电力来源比例仅有 3%,超过 70% 的电力仍然依赖于火电。“十三五”期间,我国将继续推进核电机组的建设,计划核电运行装机容量达到 5800 万千瓦,在建达到 3000 万千瓦以上。

### 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、超临界压力(23.54MPa)电厂和超超临界压力(28MPa 或主、再热蒸汽温度超过 $593^\circ\text{C}$ )的电厂。

(5) 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。

(6) 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、调峰发电厂。

(7) 按机炉组合分为非单元机组发电厂和单元机组发电厂。

(8) 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

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

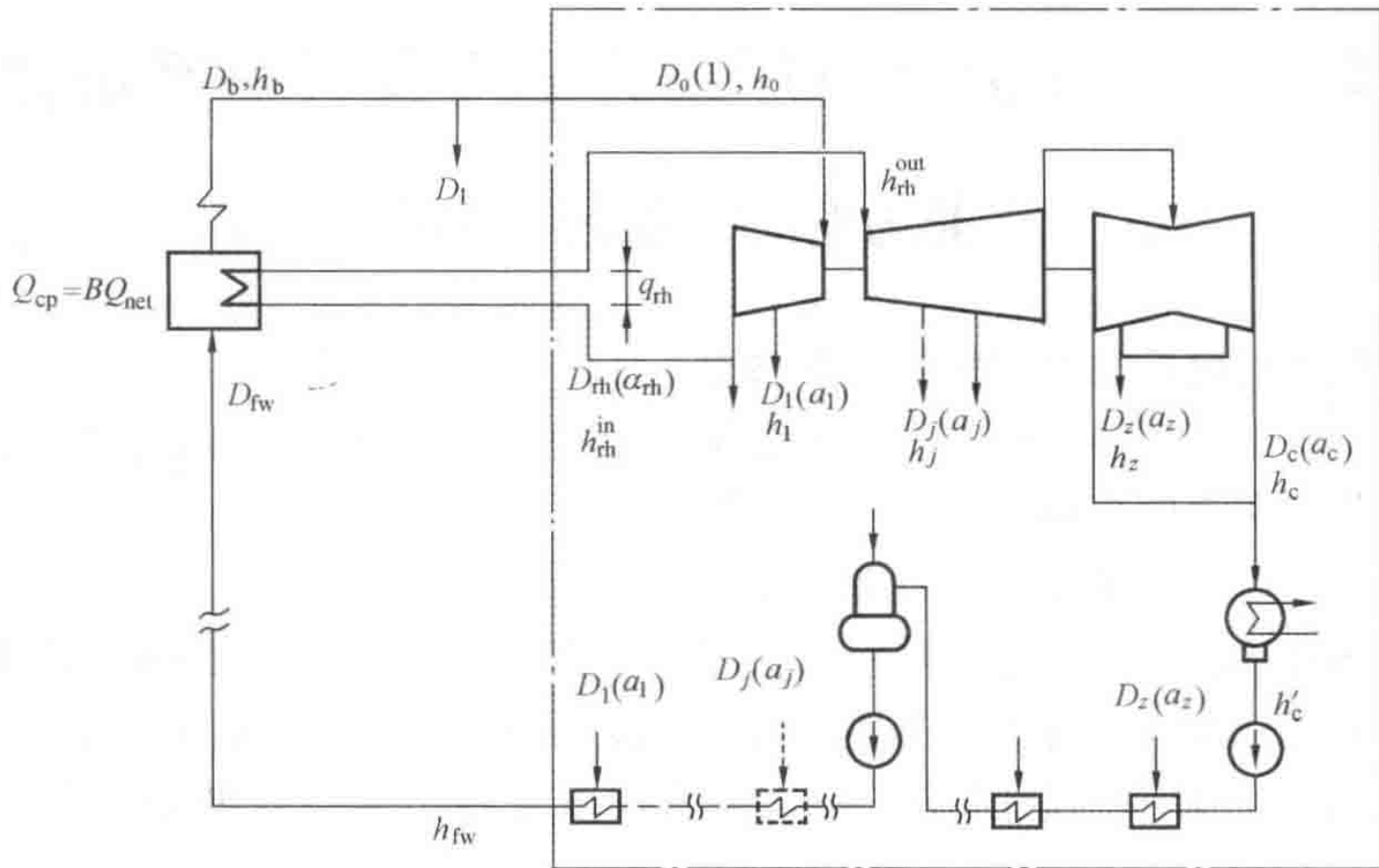


图 1-1 凝汽式发电厂热力系统图

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

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

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

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

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

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

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

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

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

式中  $D_c$ ——汽轮机凝汽量, kg/h;



$q_{rh}$ ——每 kg 再热蒸汽吸热量, kJ/kg;

$\Delta h_j$ ——抽汽在汽轮机中的实际焓降, 再热前其值为  $\Delta h_j = h_0 - h_j$ , 再热后其值为  $\Delta h_j = h_0 - h_j + q_{rh}$ , kJ/kg;

$\Delta h_c$ ——凝汽在汽轮机中的实际焓降, kJ/kg。

(2)  $W_i$  以输入、输出汽轮机的能量之差来表示, 则实际内功为

$$W_i = D_0 h_0 + D_{rh} q_{rh} - \sum_1^z D_j h_j - D_c h_c \quad \text{kJ/h} \quad (1-11)$$

其中 
$$D_0 = D_1 + D_2 + \dots + D_z + D_c = \sum_1^z D_j + D_c \quad \text{kg/h} \quad (1-12)$$

$$D_{rh} = D_0 - D_1 - D_2 = \sum_3^z D_j + D_c$$

将式 (1-12) 代入式 (1-11), 整理得

$$\begin{aligned} W_i &= D_1(h_0 - h_1) + D_2(h_0 - h_2) + \dots + D_z(h_0 - h_z + q_{rh}) + D_c(h_0 - h_c + q_{rh}) \\ &= \sum_1^z D_j \Delta h_j + D_c \Delta h_c \quad \text{kJ/h} \end{aligned} \quad (1-13)$$

从式 (1-10) 和式 (1-13) 可以看出, 两种方法所得出的结果是一致的。

汽轮机组的实际比内功表达式为

$$w_i = \frac{W_i}{D_0}$$

$$w_i = h_0 + \alpha_{rh} q_{rh} - \sum_1^z \alpha_j h_j - \alpha_c h_c = \sum_1^z \alpha_j \Delta h_j + \alpha_c \Delta h_c \quad \text{kJ/kg} \quad (1-14)$$

其中 
$$\alpha_j = \frac{D_j}{D_0}$$

(3) 用反平衡法求  $W_i$ 、 $w_i$

$$W_i = Q_0 - \Delta Q_c, \quad w_i = q_0 - \Delta q_c$$

其中 
$$\Delta Q_c = D_c(h_c - h'_c), \quad \Delta q_c = \alpha_c(h_c - h'_c)$$

2. 汽轮机汽耗为  $D_0$  时机组热耗 (循环吸热量)

$$Q_0 = D_0 h_0 + D_{rh} q_{rh} - D_{fw} h_{fw}$$

无工质损失时 
$$D_0 = D_{fw}, \quad Q_0 = D_0(h_0 - h_{fw}) + D_{rh} q_{rh} \quad \text{kJ/h} \quad (1-15)$$

1kg 新蒸汽的热耗 (比热耗) 为

$$q_0 = h_0 + \alpha_{rh} q_{rh} - h_{fw} = (h_0 - h_{fw}) + \alpha_{rh} q_{rh} \quad \text{kJ/kg} \quad (1-16)$$

根据能量平衡

$$h_{fw} = \alpha_c h'_c + \sum_1^z \alpha_j h_j \quad \text{kJ/kg} \quad (1-17)$$

将式 (1-17) 代入式 (1-15), 机组热耗可写成

$$\begin{aligned} Q_0 &= D_0(h_0 - \alpha_c h'_c - \sum_1^z \alpha_j h_j) + D_{rh} q_{rh} \\ &= \sum_1^z D_j \Delta h_j + D_c(h_0 - h'_c + q_{rh}) \quad \text{kJ/h} \end{aligned} \quad (1-18)$$

比热耗  $q_0$  可写成