

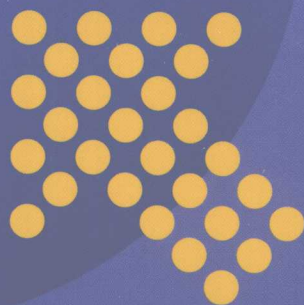
21世纪高等学校规划教材



RELI FADIANCHANG

热 力 发 电 厂

刘志真 陈 洁 主编



中国电力出版社

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

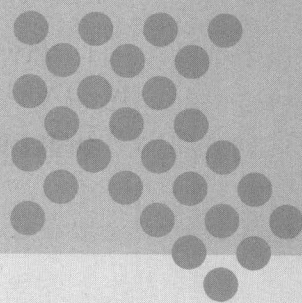
21世纪高等学校规划教材



RELI FADIANCHANG

热 力 发 电 厂

主编 刘志真 陈 洁
编写 郁 岚
主审 李勤道



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书以火力发电厂整体为研究对象,以专业技术应用能力的培养为目标,阐述了火力发电厂的热功转换理论,热经济性分析方法及辅助热力设备、热力系统的原理、结构、运行操作,并对燃气及燃煤的燃气—蒸汽联合循环、热电冷三联产、水电、核电、新能源发电进行了阐述。着重介绍 300、600MW 主力机组及其热力系统,兼顾中等容量机组及超超临界压力机组。内容包括发电厂的热经济性、发电厂的蒸汽参数及动力循环、发电厂的热力系统及辅助设备、热电厂的热经济性及其供热系统、发电厂汽水管道和阀门、火电厂辅助生产系统及设备。

本书作为一部产学研一体化教材,既可作为高职高专电力技术类电厂热能动力装置专业和火电厂集控运行专业的教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

火力发电厂/刘志真,陈洁主编. —北京:中国电力出版社,2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-8759-8

I. 热… II. ①刘…②陈… 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 061774 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 7 月第一版 2009 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 419 千字

定价 28.00 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

本书作为一部产学研一体化教材,以热力发电厂整体为研究对象,以专业技术应用能力培养为目标,阐述了热力发电厂的热功转换理论、热经济性的分析方法及辅助热力设备、热力系统的原理、结构、运行操作。着重介绍 300、600MW 主力机组及其热力系统,兼顾中等容量机组及超超临界压力机组。内容有发电厂的热经济性、发电厂的蒸汽参数及动力循环、发电厂的热力系统及辅助设备、热电厂的热经济性及其供热系统、发电厂汽水管道和阀门、火电厂辅助生产系统及设备。

在高职高专要以培养高素质技能型人才为目标、要注重技能和实践能力培养的办学理念指导下,本书编写力求做到理论联系实际,产学紧密结合,内容贴近岗位,对辅助热力设备、热力系统的运行及单元机组运行进行了叙述;力求反映本行业的新知识、新技术,对超超临界压力机组、常规燃油或燃气的燃气—蒸汽联合循环、燃煤的燃气—蒸汽联合循环、热电冷三联产、水电、核电、新能源发电等给予一定的关注。

本书由山东电力高等专科学校、山东电力研究院刘志真、陈洁主编,郁岚编写,刘志真负责全书的统稿,并编写绪论、第一、二、四章,陈洁编写第三、六章,郁岚编写第五章。

全书由山东电力高等专科学校、山东电力研究院李勤道教授主审,李教授对本书进行了认真仔细地审阅,提出了许多宝贵意见,使我们获益匪浅,在此深表谢意。

本书在编写过程中借鉴了有关兄弟院校、制造厂、设计院和发电厂的诸多宝贵资料,在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限,书中难免存在一些疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2009 年 6 月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 发电厂的热经济性	8
第一节 发电厂热经济性的评价方法	8
第二节 纯凝汽式发电厂的主要热经济指标	18
复习思考题	21
第二章 发电厂的蒸汽参数及动力循环	23
第一节 蒸汽参数对发电厂热经济性的影响	23
第二节 回热循环及其热经济性	31
第三节 蒸汽中间再热循环及其热经济性	36
第四节 燃气—蒸汽联合循环	44
第五节 热电联产	52
第六节 热电冷三联产	54
第七节 水电、核电及新能源发电	62
复习思考题	70
第三章 发电厂的热力系统及辅助设备	72
第一节 回热加热器本体及附件	72
第二节 表面式加热器及系统的热经济性	75
第三节 给水除氧设备	86
第四节 除氧器的运行及其热经济性分析	94
第五节 回热系统其他设备	101
第六节 主蒸汽与再热蒸汽系统	109
第七节 中间再热机组的旁路系统	116
第八节 给水系统	123
第九节 发电厂的辅助热力系统	130
第十节 发电厂原则性热力系统及全面性热力系统	140
第十一节 发电厂原则性热力系统的设计、拟定及计算	166
第十二节 发电厂的常规热力试验	184
第十三节 单元机组的运行	187
复习思考题	197
第四章 热电厂的热经济性及其供热系统	199
第一节 热负荷概述	199
第二节 热电厂总热耗量的分配及主要热经济指标	204
第三节 热电厂节煤量的计算及节煤条件	210

第四节	热电厂的热化系数及供热系统的调峰设备	213
第五节	供热式汽轮机的形式及参数	216
第六节	供热载热质及热电厂的供热系统	221
第七节	热电厂典型机组的原则性热力系统	225
	复习思考题	228
第五章	发电厂汽水管道和阀门	230
第一节	汽水管道的材料与技术规范	230
第二节	汽水管道的选择及计算	234
第三节	发电厂的管道阀门	237
第四节	管道的结构	243
第五节	管道布置的基本原则	250
第六节	管道的运行与维护	251
	复习思考题	253
第六章	火电厂辅助生产系统及设备	254
第一节	电厂输煤系统及煤场设备	254
第二节	除尘与除灰系统	258
第三节	供水及水处理系统	263
	复习思考题	267
	参考文献	268

绪 论

一、我国电力工业的发展及现状

新中国成立初期,我国电力工业的基础极其薄弱,发电装机容量和发电量只有 185 万千瓦和 43 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 分别居世界第 21 位和第 25 位。到 1978 年,发电装机容量和发电量达到 5712 万千瓦和 2566 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 分别跃居世界第 8 位和第 7 位。1991 年,我国的发电装机容量为 15 147.31 万千瓦,年发电量为 6774.94 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 均居世界第四位,到 1996 年底,这两项分别达到 23 654 万千瓦和 10 794 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 均跃居世界第二位。2002 年我国电力体制进行了重大改革,将原国家电力公司分拆组建为两大电网公司、五大发电集团公司和四大辅业公司。这次电力体制改革,基本打破了垄断,实现了厂网分开,在发电环节引入了竞争机制,极大地解放了电力生产力,促进了电力工业的快速发展。2002 年我国电力装机容量为 35 657 万千瓦,经过五年发展建设,2007 年我国装机容量达到 71 329 万千瓦,五年新增发电装机相当于过去 53 年的总和。我国人均装机也从 2002 年的 0.3 千瓦,增加到 2007 年的人均 0.54 千瓦。截止 2007 年底,我国 7.13 亿千瓦电力装机中,火电装机 5.54 亿千瓦,占 77.70%,水电装机 1.45 亿千瓦,占 20.40%,核电装机 885 万千瓦,占 1.2%,风电及其他新能源 600 万千瓦,占 0.7%。2002 年我国发电量 16 542 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 历时五年,到 2007 年,我国发电量增加到 32 559 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 每年平均增速为 19%。2007 年发电量中,水电 4867 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 占总发电量的 14.95%,火电 26 980 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 占总发电量的 82.86%,核电 626 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 占总发电量的 1.92%。我国电力无论是装机容量还是发电量均居全球第二位,仅次于美国,成为世界上电力生产和消费大国。

随着华能玉环电厂、华电邹县电厂、国电泰州电厂共七台百万千瓦超超临界压力机组的相继投运,标志着我国已经成功掌握世界先进的火力发电技术,电力工业已经开始进入“超超临界”时代。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。

电网规模迅速扩大,电压等级不断提升。2007 年末,全国 220kV 及以上输电线路回路长度达到 32.71 万 km,220kV 及以上变电设备容量达到 114 445 万 $\text{kV} \cdot \text{A}$, 均居世界第一位。全国大部分地区已形成 500kV 主网架,西北地区 750kV 输变电工程投产,1000kV 特高压交流试验示范工程和 800kV 直流试验示范工程正在建设之中。

目前我国电力工业主要存在电力能源结构不合理、煤电比例偏高、资源消耗过高、电网建设严重滞后、煤电运输不协调等问题。

(一) 我国电力能源结构不合理,煤电比例偏高

2006 年世界电力的装机结构,其比例分别为煤电 39%,水电 19%,核电 16%,天然气 15%,其他 11%。而我国煤电比例从新中国成立以来一直高居 70% 以上。我国的核电、天然气发电和新能源发电远远低于世界平均水平。过高的煤电比例不仅使电煤供应紧张,还给电煤运输带来困难。煤电生产过程中能源利用效率较低:美国、日本等发达国家供电煤耗达 335g/($\text{kW} \cdot \text{h}$),而我国 2007 年供电煤耗为 357g/($\text{kW} \cdot \text{h}$),比国际先进水平每千瓦时还高出

22g/(kW·h), 每年要多消耗煤炭 8000 万 t。厂用电率比国际先进水平高: 发达国家厂用电率一般为 4%, 而我国 2005 年厂用电率为 5.87%。煤电生产过程中, 需要排放大量的二氧化碳、氮氧化物等有害气体, 破坏和影响生态环境, 给我国能源减排、环境保护增加压力。电力企业每年用于治理脱硫和污染物排放的费用高达 70~80 亿元, 发电企业成本压力较大。

(二) 电力厂网结构不合理, 电网建设严重滞后

我国电网规模与电源规模严重不匹配。2007 年末, 我国电网资产占电力资产的比重仅为 35%, 电源资产占电力资产的比例为 65%, 与发达国家电网、电源资产占电力资产比例 6:4 的平均水平相比有明显差距。我国电网建设薄弱、滞后已是不争的事实。

(三) 煤电运输不协调, 瓶颈制约依然严重

一是电煤价格不协调。煤炭价格放开, 由市场调节, 电力价格由政府管制, 实行政府定价。二是电煤供需不协调。近几年来, 我国的火力装机规模增长速度较快, 电与煤的比例关系失调, 造成电煤市场供不应求。三是电煤运输不协调。由于电力的快速发展, 电煤需求量增长较快, 电煤的运输是电力持续发展的重要“瓶颈”。

因此, 降低煤电机组比例及资源消耗, 大力发展水电、核电、新能源发电已成为当务之急。

二、电力工业发展方针

“十一五”期间电力工业发展要坚持提高能源利用效率、重视生态环境保护、加强电网建设、优化发展火电、有序开发水电、积极推进核电建设、适度发展天然气发电、鼓励新能源发电、带动装备工业技术进步、加强国际合作、深化电力体制改革的基本方针。

提高能源利用效率。我国电力能源结构不合理, 煤电比例偏高, 电力工业资源消耗过高。为此要大力发展 600MW 及以上超(超)临界压力机组、大型联合循环机组。采用高效洁净发电技术改造现役火电机组, 实施“上大压小”和小机组淘汰退役。推进热电联产、热电冷联产和热电煤气多联供。在以工业热负荷为主的地区, 因地制宜建设以热力为主的背压机组; 在采暖负荷集中或发展潜力较大的地区, 建设 300MW 等级高效环保热电联产机组; 在中小城市建设以循环流化床技术为主的热电煤气三联供, 以洁净能源作燃料的分布式热电联产和热电冷联供, 将分散式供热燃煤小锅炉改造为集中供热。到 2010 年, 使火电供电标准煤耗由 2005 年的 370g/(kW·h) 下降到 355g/(kW·h), 厂用电率由 5.87% 下降到 4.5%; 城市集中供热普及率由 30% 提高到 40%, 新增供暖热电联产机组超过 40 000MW, 年节能 3500 万 t 标准煤以上, 为节能和环保作出贡献。

重视生态环境保护。我国能源结构以煤为主, 电力生产高度依赖煤炭。煤炭大量开采和燃烧, 引发了严重的生态环境问题。因此, 新建火电机组必须同步安装高效除尘设施; 加快现役电厂除尘器的改造, 提高可靠性、稳定性和除尘效率。通过使用低硫燃料、装设脱硫设备等综合措施, 严格控制电厂二氧化硫排放; 推广低氮燃烧技术, 扩大烟气脱氮试点范围, 鼓励火电厂减少氮氧化物排放。到 2010 年, 使火电厂烟尘排放量控制在 1.2g/(kW·h)、二氧化硫排放量下降到 2.7g/(kW·h), 电厂废水排放达标率实现 100%。

加强电网建设。建设西电东送三大输电通道和跨区域输变电工程, 扩大西电东送规模, 继续推进西电东送、南北互济、全国联网。加强区域、省级电网建设, 同步发展输配电网, 加强城乡电网建设和改造, 完善城乡配电网络, 扩大供电范围, 确保供电安全。采用先进输、变、配电技术和设备, 逐步淘汰能耗高的老旧设备; 加强跨区联网, 推广应用电网经

济运行技术;采取有效措施,减轻电磁场对环境的影响;加强电网抗灾能力建设。

以大型高效环保机组为重点优化发展火电。建设大型超超临界压力电站和大型空冷电站;推进洁净煤发电,建设单机 600MW 级循环流化床电站,启动整体煤气化燃气—蒸汽联合循环电站工程;鼓励发展坑口电站,建设大型煤电基地;适度发展天然气发电;加快淘汰落后的小火电机组。

在保护生态基础上有序开发水电。统筹做好移民安置、环境治理、防洪和航运;建设金沙江、雅砻江、澜沧江、黄河上游等水电基地和溪洛渡、向家坝等大型水电站;适当建设抽水蓄能电站;在水能资源丰富但地处偏远的地区,因地制宜开发中小型水电站。

积极推进核电建设。核电属于清洁能源,应积极推进建设。截至 2007 年底,我国核电装机容量已达 8850MW。规划到 2020 年,我国核电装机容量将达到 40 000MW。应重点建设百万千瓦级核电站,逐步实现先进压水堆核电站的设计、制造、建设和运营自主化;积极支持高温气冷堆核电示范工程;加强核燃料资源勘查、开采、加工工艺改造以及核电关键技术开发和核电人才培养。

三、发电厂的类型及简述

按使用能源划分,发电厂有下述基本类型。

1. 火力发电厂

火力发电厂是利用煤、石油、天然气等燃料燃烧所得到的热能生产电能的发电厂。按燃料类型可分为燃煤发电厂、燃油发电厂、燃气发电厂以及其他燃料的发电厂。

2. 水力发电厂

水力发电是将高处的河水(或湖水、江水)通过导流引到下游形成落差推动水轮机旋转带动发电机发电。以水轮发电机组发电的发电厂称为水力发电厂。

3. 核能发电厂

核能发电是利用原子反应堆中核燃料(例如铀)原子核发生裂变反应所放出的热能产生蒸汽(代替了火力发电厂中的锅炉),驱动汽轮机再带动发电机旋转发电。与之相应的发电厂称为核能发电厂,简称核电站。

4. 风力发电厂(场)

风力发电是通过风轮机把风能的运动动能提取、转换成转轴输出的机械能,驱动发电机发电。与之相应的发电厂称为风力发电厂(场)。

5. 太阳能发电厂

太阳能发电主要有太阳能光发电和太阳能热发电两种基本方式。不通过热过程直接将太阳的光能转换成电能的利用方式称为太阳能光发电,目前得到实际应用的是光伏发电。光伏发电是利用太阳能级半导体电子器件有效地吸收太阳光辐射能,并使之转变成电能的直接发电方式。太阳能热发电是将吸收的太阳辐射热能转换成电能的发电方式。

6. 其他

其他发电厂类型还包括地热发电厂、潮汐能发电厂等。

(1) 地热能发电厂。①直接利用地热井中的干蒸汽推动汽轮发电机组发电;②从地热井提取的参数较高的湿蒸汽或热水通过扩容降压产生蒸汽来推动汽轮发电机组发电;③当从地热井提取的湿蒸汽(或热水)参数较低或含有较多不凝结气体杂质时,通过热交换器使低沸点液体产生蒸汽来推动汽轮发电机组发电。

(2) 潮汐能发电厂。潮汐能发电是利用海水潮汐涨落时海水水位的升降落差推动水轮发电机组发电的。

四、热力发电厂的类型

热力发电厂是将热能转化为机械能，再将机械能转换成电能的发电厂。

1. 按使用能源划分

热力发电厂包括上述类型中的火力发电厂、核能发电厂、太阳能热发电、地热发电厂。

2. 按原动机类型分

汽轮机发电厂、燃气轮机发电厂、内燃机发电厂、燃气—蒸汽联合循环发电厂。

3. 按发电厂功能分

供电的凝汽式发电厂、供电/供热的热电厂、供电/供热/供冷（制冷）的发电厂、供电/供热/供煤气的发电厂、多功能发电厂。

4. 按蒸汽压力和温度分类

中低压发电厂：蒸汽压力一般为 3.92MPa、温度为 450℃ 的发电厂，单机功率小于 25MW。

高压发电厂：蒸汽压力一般为 9.9MPa、温度为 540℃ 的发电厂，单机功率小于 100MW。

超高压发电厂：蒸汽压力一般为 13.83MPa、温度为 540℃/540℃ 的发电厂，单机功率小于 200MW。

亚临界压力发电厂：蒸汽压力一般为 16.77MPa 或 18.24MPa、温度为 540℃/540℃ 的发电厂，单机功率为 300~600MW。

超临界压力发电厂：蒸汽压力大于 22.11MPa、温度为 550℃/550℃ 的发电厂，机组功率为 600MW 及以上。

超超临界压力发电厂：蒸汽压力大于 25MPa、蒸汽温度高于 580℃ 的发电厂，机组功率为 600MW 及以上。

五、火力发电厂的生产过程及能量转换过程

火力发电厂是利用煤、石油、天然气等燃料燃烧得到热能，再把热能转换为电能的发电厂。截至 2007 年底，全国火电装机容量约占总装机容量的 77.73%；2007 年火电发电量约占全部发电量的 82.86%。火力发电是我国的主要发电方式，下面以燃煤火电为例介绍火力发电厂的理论基础、生产过程及能量转换过程。

1. 朗肯循环——火力发电厂的理论基础

现代火电厂的基本循环是最简单的蒸汽动力循环——朗肯循环。图 0-1 所示为朗肯循环热力系统，图 0-2 所示为朗肯循环 $T-s$ 图。从图 0-2 中可以看出，工质循环经历了四个热力过程：4-5-6-1 是工质在锅炉中被定压加热、汽化和过热的过程；1-2 是过热蒸汽在汽轮机中定熵膨胀做功过程；2-3 是排汽在凝汽器中定压凝结放热过程；3-4 是凝结水在水泵中定熵压缩的过程。

朗肯循环热效率 η_t 表示 1kg 蒸汽在汽轮机中产生的理想功 w_{in} 与循环吸热量 q 之比，即

$$\eta_t = \frac{w_{in}}{q} = \frac{(h_0 - h_{ca}) - (h_{fw} - h'_c)}{h_0 - h_{fw}} \quad (0-1)$$

式中 $h_{fw} - h'_c$ ——给水泵耗功；

$h_0 - h_{ca}$ ——理想比焓降。

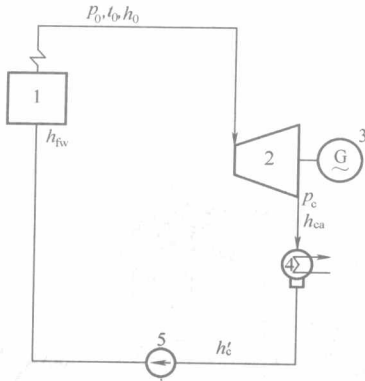


图 0-1 朗肯循环热力系统

1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；5—水泵

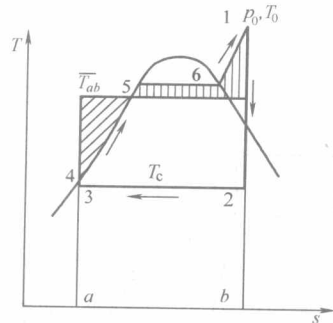


图 0-2 朗肯循环 T-s 图

当初压 p_0 小于 10MPa 时，泵功可忽略不计，则

$$\eta_t = \frac{w_{ia}}{q} = \frac{h_0 - h_{ca}}{h_0 - h_{fw}} \quad (0-2)$$

朗肯循环热效率以吸热过程和放热过程的平均温度表示，其表达式为

$$\eta_t = \frac{w_{ia}}{q} = 1 - \frac{q_{ca}}{q} = 1 - \frac{\bar{T}_c \Delta s}{\bar{T}_{ab} \Delta s} = 1 - \frac{\bar{T}_c}{\bar{T}_{ab}} \quad (0-3)$$

式中 $\bar{T}_c$ ——放热过程平均温度，K；

$\bar{T}_{ab}$ ——吸热过程平均温度，K。

2. 火力发电厂的生产过程

在朗肯循环的基础上，采用多级给水回热加热、蒸汽中间再热等，形成了图 0-3 所示的现代火电厂的复杂热力循环及其系统。

煤由上煤机送入煤仓后进入磨煤机，在其中研制成煤粉，同时送入热空气进行干燥并将煤粉送入锅炉燃烧。由送风机送来的空气，在进入炉膛之前，先在空气预热器中接受排烟的预热。炉膛内的燃烧产物——高温烟气，在引风机的作用下，沿着锅炉烟道依次流过炉膛、过热器、再热器、省煤器和空气预热器，将热量逐步传递给水、蒸汽和空气。降温后的烟气进入除尘器进行净化，净化除尘后的烟气被引风机抽出，最后经烟囱排入大气。

燃料燃烧时从炉膛内落下的灰渣、从尾部烟道落入空气预热器下面灰斗中的飞灰，以及除尘器收集下来的飞灰，通常都用水冲入冲渣沟和冲灰沟，并随冲灰水流往灰渣泵房，然后用灰渣泵、灰渣管等设备将其排送到储灰场。目前我国很多大电厂采用了气力除灰系统，该系统既能避免对环境和水质造成污染，也有利于灰渣的综合利用。

燃料在锅炉中燃烧放出的热量将水加热并蒸发成饱和蒸汽，经进一步加热后成为具有一定压力和温度的过热蒸汽。过热蒸汽沿主蒸汽管道进入汽轮机，推动汽轮机的转子转动，从而获得机械能。在汽轮机中做完功的乏汽排入凝汽器，在其中被由循环水泵提供的冷却水冷却而凝结成水，凝结水经凝结水泵升压，进入除氧器除氧后再由给水泵升压，经高压加热器进一步加热后送入锅炉。送入锅炉的给水又继续重复上述循环过程。

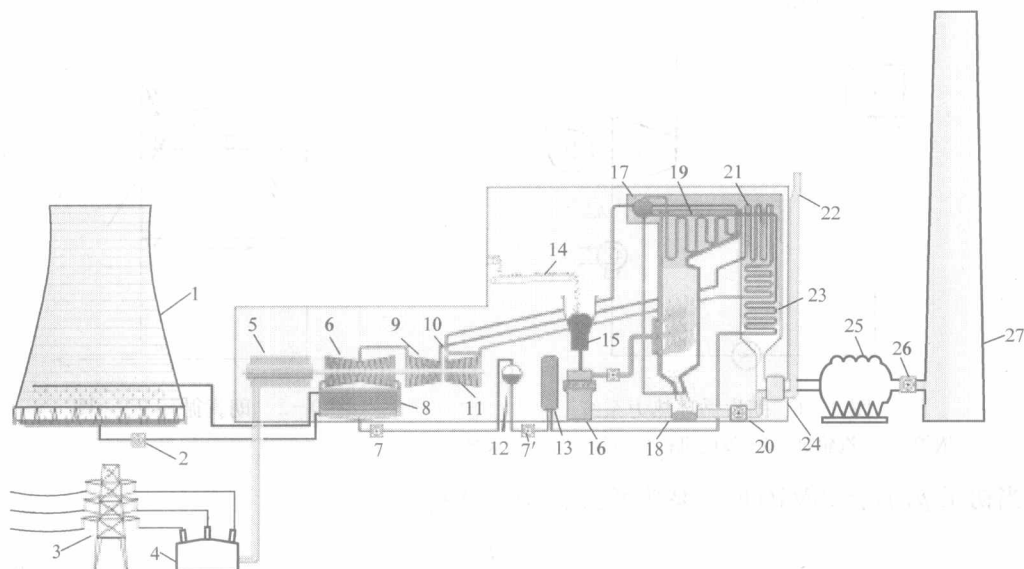


图 0-3 典型燃煤发电厂示意

Typical diagram of a coal-fired thermal power station

- 1—冷却水塔 Cooling tower; 2—冷却水泵 (循环水泵) Cooling water pump; 3—三相输电线 Three-phase transmission line; 4—升压变压器 Step-up transformer; 5—发电机 Electrical generator; 6—低压汽轮机 Low pressure steam turbine; 7—凝结水泵 Condensate pump; 7'—锅炉给水泵 Boiler feedwater pump; 8—表面式凝汽器 Surface condenser; 9—中压汽轮机 Intermediate pressure steam turbine; 10—主汽门 Steam control valve; 11—高压汽轮机 High pressure steam turbine; 12—除氧器 Deaerator; 13—给水 (高压) 加热器 Feedwater heater; 14—上煤机 Coal conveyor; 15—煤仓 Coal hopper; 16—磨煤机 Coal pulverizer; 17—锅炉汽包 Boiler steam drum; 18—冷灰斗 Bottom ash hopper; 19—过热器 Superheater; 20—送风机 Forced draught (draft) fan; 21—再热器 Reheater; 22—燃烧空气入口 Combustion air intake; 23—省煤器 Economiser; 24—空气预热器 Air preheater; 25—除尘器 Precipitator; 26—引风机 Induced draught (draft) fan; 27—烟囱 Flue gas stack

为使乏汽在凝汽器内冷凝成水,还必须借助于循环水泵对冷却水升压,并使其沿着冷却水进水管进入凝汽器。从凝汽器中出来的具有一定温升的冷却水进入冷却塔放热,然后再进入凝汽器吸热,这就形成了汽轮机的冷却水系统。

发电机由汽轮机直接拖动,所发出的交流电,一小部分由厂用配电设备予以分配,作为厂房照明和各种辅助设备的厂用电源,其余大部分电能经升压变压器升压后,再经输电线路送入电网,由电网调度中心统一分配给用户。

3. 火力发电厂的能量转换过程

火电厂的能量转换过程:在锅炉中燃料燃烧将热水加热变成蒸汽,将燃料的化学能转换为蒸汽热能;蒸汽在汽轮机中膨胀做功,将蒸汽的热能转换为机械能;汽轮机带动发电机旋转,将机械能转变成电能。

六、热力发电厂课程的任务和作用

在已学习了工程热力学、传热学、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,使学生了解热力发电厂的组成、掌握热功转换的基本理论,能正确进行热经济性分析,树立安全、效益(经济效益、社会效益、环境效益)相统一的观点,为学生将来从事电厂实际工作打下必要的基础。

第一章 发电厂的热经济性

第一节 发电厂热经济性的评价方法

在发电厂能量转换及传递过程的不同阶段,存在着大小不等、原因各异能量损失。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。

实际能量既具有数量的守恒性又具有质量上的差异性,就同一种能量而言,由于它的状态参数不同,其质量也不相同。比如同样是 1000kJ 的热量,在 100℃ 下转换为机械能的能力大约只相当于 800℃ 下的三分之一左右;大气介质所含热能的质量为零。

要想准确地分析和评价能量利用的效果,必须从能量的数量和质量(做功能力)两方面进行考核。因此,评价发电厂热经济性的基本方法主要有两种:从能量的数量角度出发,以热力学第一定律为基础的热量法(热效率法);从能量的质量角度出发,以热力学第一、第二定律为基础的熵方法(做功能力损失法)或焓方法(做功能力法)。

一、热量法

热量法以热效率的高低作为评价能量转换过程完善程度的指标。热量法以热力学第一定律为基础,仅考虑能量的数量,没有考虑能量质的问题,其实质是能量的数量平衡。热量法具有直观、计算方便、简捷等优点,目前被世界各国广泛应用于定量计算。本书主要用热量法来研究发电厂的能量转换过程和热经济性。

能量转换及传递过程的热平衡式为

$$\text{输入总能量} = \text{有效利用能量} + \text{损失能量}$$

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

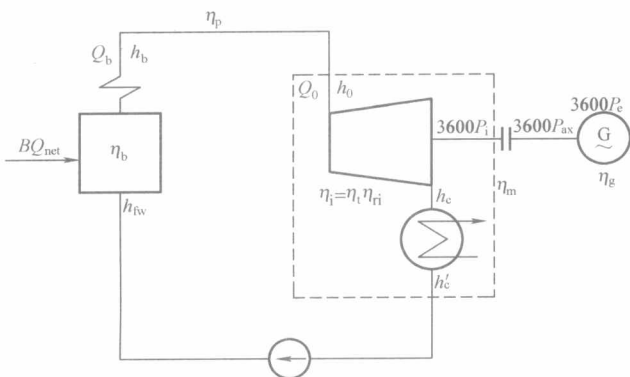


图 1-1 纯凝汽式发电厂热力系统

热效率是某一热力循环中热力设备有效利用能量占输入总能量的百分数,它表明了能量转换过程中能量的有效利用程度。

下面以图 1-1 所示的纯凝汽式发电厂(无回热、无再热)为例,应用热量法阐述凝汽式发电厂的各种热损失和热效率。

(一) 锅炉(boiler)热损失与锅炉效率 η_b

在锅炉内,燃料的化学能并不是全部转换为蒸汽的热能,还存在一些热损失。主要有:排烟热损失、化学不完全燃烧热损失、机械不完全燃烧热损失、散热损失、灰渣热损失等。

锅炉效率 η_b 等于锅炉的热负荷 Q_b 与锅炉消耗燃料热量 BQ_{net} 之比,即

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

式中 Q_b ——锅炉的热负荷, kJ/h;

D_b ——锅炉蒸发量, kg/h;

h_b ——过热器出口蒸汽比焓, kJ/kg;

h_{fw} ——锅炉给水比焓, kJ/kg;

B ——锅炉每小时消耗燃料量, kg/h;

Q_{net} ——燃料的低位发热量, kJ/kg。

锅炉效率的大小反映了锅炉设备的完善程度, 其影响因素有: 锅炉的参数、容量、结构特性、燃料种类等。现代大型电站锅炉效率一般为 90%~94%。

(二) 管道 (pipe) 热损失与管道效率 η_p

锅炉产生的蒸汽通过主蒸汽管道进入汽轮机时, 会有一部分热损失, 用管道效率 η_p 表示, 其值等于汽轮机设备的热耗量 Q_0 与锅炉热负荷 Q_b 之比, 即

$$\eta_p = \frac{Q_0}{Q_b} = \frac{D_0(h_0 - h_{\text{fw}})}{D_b(h_b - h_{\text{fw}})} \quad (1-2)$$

式中 D_0 、 Q_0 ——汽轮机组汽耗量、热耗量, kg/h、kJ/h;

h_0 ——汽轮机的进汽比焓, kJ/kg。

管道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。若不计工质损失, 现代发电厂管道效率一般为 98%~99%。

(三) 汽轮机 (steam turbine) 的冷源损失与汽轮机内效率

汽轮机的冷源损失是指汽轮机排汽在凝汽器内的放热量, 包括理想循环冷源损失和附加冷源损失两部分。

1. 理想循环冷源损失与理想循环热效率 η_i

理想循环冷源损失是指蒸汽在汽轮机中定熵膨胀时汽轮机排汽在凝汽器内的放热量 (1kg 排汽放热量为 $h_{\text{ca}} - h'_c$), 是理想情况下汽轮机也不可避免的冷源损失 (见图 1-2)。这部分热损失的大小决定于热力循环的形式和参数, 通常用理想循环热效率 η_i 来表示, 它等于单位时间内循环理想功 W_{ia} 与循环热耗量 Q_0 之比, 即

$$\eta_i = \frac{W_{\text{ia}}}{Q_0} = \frac{D_0(h_0 - h_{\text{ca}})}{D_0(h_0 - h_{\text{fw}})} \quad (1-3)$$

式中 W_{ia} ——汽轮机理想内功率, kJ/h;

h_{ca} ——理想情况下汽轮机排汽比焓, kJ/kg。

理想循环热效率 η_i 说明热力循环形式与参数的先进性, 一般理想循环热效率为 40%~50%。

2. 附加冷源损失与汽轮机的相对内效率 η_{ri}

蒸汽在汽轮机中实际膨胀做功时存在进汽节流、排汽及内部 (包括漏汽、摩擦、湿汽等) 损失, 这些不可逆损失使蒸汽做功减少, 实际排汽比焓 h_c 大于理想排汽比焓 h_{ca} , 实际做功过程 1kg 排汽在凝汽器内的放热量 ($h_c - h'_c$) 大于理想情况下

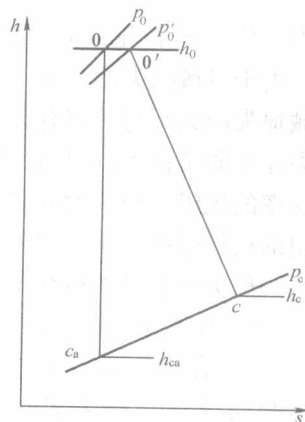


图 1-2 蒸汽膨胀过程线

1kg 排汽在凝汽器内的放热量 ($h_{ca} - h'_c$), 两者之差 ($h_c - h_{ca}$) 即为附加冷源损失。附加冷源损失的大小, 用汽轮机的相对内效率 η_{ri} 来表示, 它等于单位时间内蒸汽在汽轮机中所做的实际内功 W_i 与理想内功 W_{ia} 之比, 即

$$\eta_{ri} = \frac{W_i}{W_{ia}} = \frac{D_0(h_0 - h_c)}{D_0(h_0 - h_{ca})} \quad (1-4)$$

式中 W_i ——汽轮机实际内功, kJ/h;

h_c ——汽轮机实际排汽比焓, kJ/kg。

汽轮机的相对内效率 η_{ri} 说明汽轮机内部构造的完善程度。现代大型汽轮机组的相对内效率为 90% 左右。

3. 汽轮机的冷源损失与汽轮机的绝对内效率 η_i

汽轮机的冷源损失是指蒸汽在汽轮机中实际膨胀做功时汽轮机排汽在凝汽器内的放热量 (1kg 排汽放热量为 $h_c - h'_c$), 为理想循环冷源损失与附加冷源损失之和, 用汽轮机的绝对内效率 η_i 来表示。绝对内效率 η_i 是实际循环热效率, 为单位时间内实际内功 W_i 与汽轮机的热耗量 Q_0 之比, 即

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_0} = \frac{3600P_i}{Q_0} = \frac{D_0(h_0 - h_c)}{D_0(h_0 - h_{fw})} = \eta_i \eta_{ri} \quad (1-5)$$

$$P_i = W_i / 3600$$

式中 P_i ——汽轮机实际内功, kW。

汽轮机的绝对内效率 η_i 表示汽轮机热经济性的高低, 它不仅反映热量的利用率, 还反映热功转换的程度, 既是数量指标, 又是质量指标。

汽轮机组的绝对内效率一般为 36%~45%, 现代大型汽轮机组的绝对内效率采取措施后已达到 45%~47%, 甚至更高。

(四) 汽轮机的机械损失及机械效率 η_m

汽轮机运行时, 要克服各轴承的摩擦阻力, 还要带动主油泵、调速器等, 将消耗一部分有用功而造成的损失称为机械损失。汽轮机机械损失的大小用汽轮机的机械效率 η_m 来评价, 它等于汽轮机输出给发电机轴端的功率 P_{ax} 与汽轮机内功 P_i 之比, 即

$$\eta_m = \frac{P_{ax}}{P_i} \quad (1-6)$$

式中 P_{ax} ——汽轮机输出给发电机轴端的功率, kW。

由于机械损失的存在, 汽轮机输出给发电机轴端的功率 P_{ax} 小于汽轮机实际内功 P_i 。机械损失的大小与转速有关, 并随转速增大而增大。对于同一台汽轮机, 在一定转速下机械损失在不同负荷下近似为一常数, 因此, 汽轮机的机械效率随内功的增大而增大。对于不同功率的机组, 功率大的机组调速器、主油泵等所消耗的功率并不成正比增大, 所以大功率机组的机械效率比小功率机组高。

一般大型汽轮机机械效率为 99% 左右。

(五) 发电机 (generator) 的能量损失与发电机效率 η_g

发电机的能量损失包括机械方面的轴承摩擦损失、发电机内冷却介质的摩擦和铜损 (线圈发热)、铁损 (铁芯涡流发热) 等造成的耗功。此项损失用发电机效率 η_g 的大小进行评价, 它等于发电机输出的电功率 P_e 与汽轮机输出给发电机轴端的功率 P_{ax} 之比, 即

$$\eta_g = \frac{P_e}{P_{ax}} \quad (1-7)$$

式中 P_e ——发电机输出的电功率, kW。

现代大型发电机的效率, 采用氢气冷却时为 98%~99%, 采用空气冷却时为 97%~98%, 采用双水内冷时为 96%~98.7%。

(六) 凝汽式发电厂 (condensing power plant/station) 的能量损失与效率 η_{cp}

上述各能量损失的总和就是整个凝汽式发电厂能量损失, 其大小用凝汽式发电厂效率 η_{cp} 来表示。它等于发电厂发出的电能与燃料供给的化学能之比, 即

$$\eta_{cp} = \frac{3600P_e}{BQ_{net}} = \eta_b \eta_p \eta_t \eta_r \eta_m \eta_g = \eta_b \eta_p \eta_t \eta_m \eta_g \quad (1-8)$$

式 (1-8) 表明, 凝汽式发电厂的总效率决定于各设备的分效率, 其中任一设备热经济性的改善, 都可能使电厂效率有所提高, 两者提高的相对值相等。为了提高发电厂的热经济性, 必须提高每一个设备对能量的利用率。在上述各效率中, 管道效率、汽轮机机械效率、发电机效率再提高的幅度不大, 再提高对电厂效率的影响也较小。因此, 要想提高整个电厂的热效率, 必须要提高锅炉效率和汽轮机的绝对内效率。

以燃料供给的热量为基础, 计算出电能及各项能量损失所占的百分数后, 便可绘制出发电厂的热流图。图 1-3 为一超高压纯凝汽式发电厂的热流图, 其蒸汽初参数为 13MPa、535℃, 终参数为 5kPa。图 1-3 中直观地显示出发电厂能量利用与损失的具体分布情况, 其中汽轮机的冷源损失是所有损失中最大的。

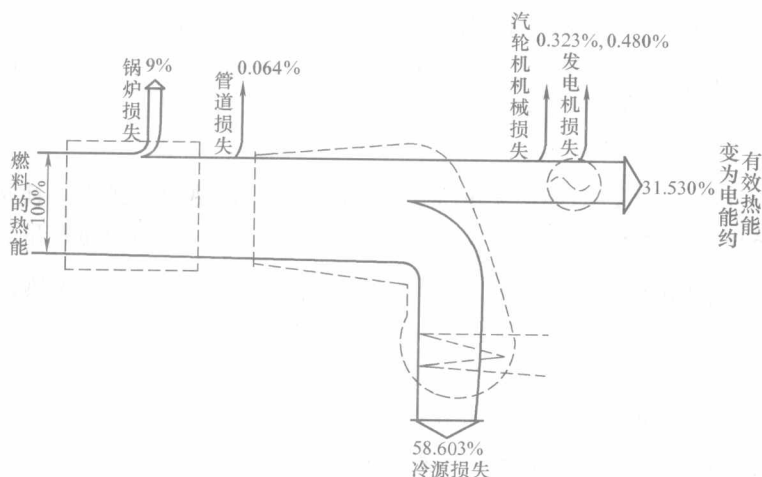


图 1-3 超高压纯凝汽式发电厂的热流图

二、熵方法

熵方法以热力学第一、第二定律为理论基础, 计算各种热力过程中由于不可逆性而产生的做功能力损失。实际的热力过程都是不可逆过程, 必然引起系统的熵增 (即熵产), 导致做功能力损失。熵方法通过环境温度乘以熵产来计算做功能力损失, 并以此作为评价电厂热力设备热经济性的指标。凡是熵增的过程, 都会使热经济性下降。

在温度为 T_m 的环境里, 若某一热力过程或设备中的熵增为 Δs_g , 则引起的做功能力损失 Δe_l 为