

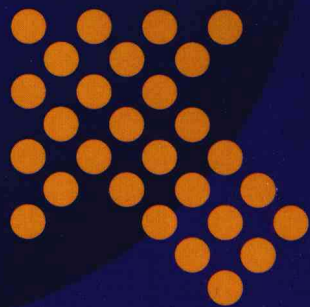
21世纪高等学校规划教材



RELI FADIANCHANG

热力发电厂

邱丽霞 主 编
韩晓琳 杨淑红 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

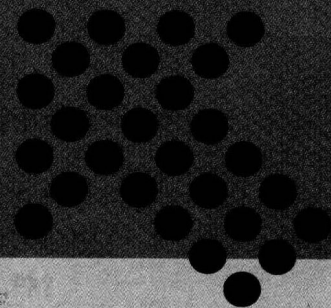
21世纪高等学校规划教材



RELI FADIANCHANG

热力发电厂

主 编 邱丽霞
副主编 韩晓琳 杨淑红
编 写 郝艳红
主 审 范 江



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。

全书针对火力发电厂的能量转换原理、主辅设备和主辅热力系统进行了比较全面的介绍。

书中内容适应经济社会发展和科技进步的需要,反映了本行业的新知识、新技术,紧密联系生产实际,符合专业培养目标和课程教学基本要求。本书内容丰富,较好地体现了教学内容弹性化、教材结构模块化的特点。

本书可作为普通高等院校本、专科学生相关专业教材,也可作为相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

热力发电厂/邱丽霞主编. —北京:中国电力出版社,
2008

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7277 - 8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 123697 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 7 月第一版 2008 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21 印张 516 千字 1 插页

定价 34.00 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

本书对热力发电厂能量转换原理、主辅设备和主辅热力系统进行了比较全面的介绍。书中热力系统的介绍以亚临界、超临界压力 600MW 机组为主, 兼顾中等容量机组及超超临界压力机组, 并加强了设备结构的介绍, 同时以适当的篇幅介绍了核电常规岛热力系统的基本内容以及火电厂节能方面的内容, 以拓宽学生的视野。

书中有关的技术数据、资料均按新技术、新政策、新设计规范编写, 力求概念准确清晰、深入浅出, 便于自学。

本书由太原电力高等专科学校邱丽霞主编, 并编写绪论、第四章; 山西电力职业技术学院韩晓琳、杨淑红任副主编, 韩晓琳编写第三、五、六章, 杨淑红编写第二、七章; 太原电力高等专科学校郝艳红编写第一章。全书由太原理工大学范江老师主审, 主审老师对本书进行了认真仔细的审阅, 提出了诸多宝贵意见, 对书稿质量的提高起了很大的作用, 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、电力设计院和发电厂诸多文献和资料, 在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限, 书中难免出现疏漏与不足之处, 恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 7 月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 热力发电厂的热经济性	6
第一节 热力发电厂热经济性的评价方法	6
第二节 凝汽式发电厂的主要热经济指标	17
第三节 提高发电厂热经济性的途径	20
复习思考题	49
第二章 发电厂的主要热力系统及辅助设备	51
第一节 回热加热器及其热力系统	51
第二节 除氧器及连接系统	69
复习思考题	81
第三章 发电厂的汽水管道和阀门	82
第一节 管道的规范与材料	82
第二节 管道的计算与选择	90
第三节 发电厂阀门	93
第四节 管道的膨胀、补偿、支持和保温	107
第五节 管道与阀门的运行与维护	121
复习思考题	129
第四章 发电厂热力系统	130
第一节 发电厂热力系统的概念和分类	130
第二节 发电厂原则性热力系统	130
第三节 主蒸汽系统	150
第四节 旁路系统	157
第五节 给水系统及其设备	166
第六节 主凝结水系统	178
第七节 发电厂其他辅助热力系统	186
第八节 核电厂二回路热力系统简述	212
第九节 发电厂的全面性热力系统	218
复习思考题	223
第五章 热电厂的热经济性及其供热系统	225
第一节 热负荷的种类及其确定	225
第二节 热电厂热经济性	233

第三节	热电厂的供热系统	242
第四节	热电厂的供热管道系统及其设备	247
	复习思考题	253
第六章	发电厂热力设备的经济运行	255
第一节	电力负荷预测及工况系数	255
第二节	发电厂热力设备的动力特性	258
第三节	热力设备并列运行时的负荷经济分配	260
第四节	大型火电机组的电力调峰运行	266
第五节	火电厂节能策略	268
第六节	电能成本及其计算	280
	复习思考题	281
第七章	发电厂辅助生产系统	283
第一节	发电厂燃料运输系统	283
第二节	发电厂供水系统	294
第三节	发电厂除尘系统	305
第四节	发电厂的除灰系统及设备	311
第五节	发电厂脱硫和脱硝系统	320
	复习思考题	328
参考文献		330

绪 论

一、我国电力工业的发展和现状

中国电力工业自 1882 年在上海诞生以来,经历了艰难曲折、发展缓慢的 67 年,到 1949 年发电装机容量和发电量仅为 185 万 kW 和 43 亿 kW·h,分别居世界第 21 位和第 25 位。1949 年以后我国的电力工业得到了快速发展。1978 年发电装机容量达到 5712 万 kW,发电量达到 2566 亿 kW·h,分别跃居世界第 8 位和第 7 位。改革开放之后,电力工业体制不断改革,在实行多家办电、积极合理利用外资和多渠道资金,运用多种电价和鼓励竞争等有效政策的激励下,电力工业发展迅速,在发展规模、建设速度和技术水平上不断刷新纪录、跨上新的台阶。装机容量先后超过法国、英国、加拿大、德国、俄罗斯和日本,从 1996 年底开始一直稳居世界第 2 位。进入新世纪,我国的电力工业发展遇到了前所未有的机遇,呈现出快速发展的态势。

电力装机容量、发电量持续增长。进入新世纪,电力装机容量实现了 4 亿 kW、5 亿 kW、6 亿 kW 三次大的标志性跨越,四年年均增长 15%,比改革开放以来年均增长率高 6.41%。2006 年底,全国发电装机容量达到 6.24 亿 kW,火电发电量为 23573 亿 kW·h,装机容量和发电量已经连续十二年位列世界第二位。到 2007 年底,全国电力装机容量超过了 7 亿 kW。

电源建设取得跨越式发展。水电装机容量平稳快速增长,风电发展步入高速增长期,核电在确定技术路线、项目前期准备等方面取得了可喜的进展。截至 2006 年底,水电装机容量达到 1.30 亿 kW,居世界首位;火电装机容量达到 4.84 亿 kW,对电力供应的保障作用更加明显;核电前期准备的项目容量已达 1740 万 kW,全国正式并网投运的风电设备容量 207.25 万 kW,比 2002 年增长 420%,年均增长 50%,特别是 2006 年一年投产的风电装机容量相当于以往历史的总和;生物质发电开始起步,截至 2006 年底,全国已建成共 8 万 kW 国家级秸秆发电示范项目机组,填补了我国秸秆发电的空白。

电网规模不断扩大。区域、省电网主网架得到较大发展,截至 2006 年底,220kV 及以上输电线路回路长度增长到 28.64 万 km,年均增长 10.99%;变电容量增长到 96405 万 kVA,年均增长 16.29%。全国大部分地区已经形成了 500 (220) kV 为主的电网主网架,西北地区官厅至兰州东的 750kV 输变电工程投产,标志着我国输变电最高电压等级提高到了新的水平。全国联网格局初步形成,对促进资源优化配置起到了重要的作用。

火电技术装备水平大幅提高。300、600MW 的大型发电机组已成为电力系统的主力机组,并逐步向 1000MW 级发展,火电机组的参数逐步向超(超)临界方向发展,在建的机组与发达国家的新建机组的效率、可靠性、环保性能等基本持平。近年来,华能玉环电厂 1、2 号,华电邹县电厂 7、8 号共四台国产超超临界压力百万千瓦燃煤机组相继投运,国电大同二厂直接空冷 600MW 机组、国网新源四川白马电厂和大唐开远电厂 300MW 循环流化床锅炉机组的投运,标志着我国火电技术装备水平和制造能力进入新的发展阶段。

节能减排初见成效。2006年,全国电厂供电标准煤耗为 $366\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,比2002年下降 $17\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,全国供电线损率为 7.08% ,比2002年下降 0.63% 。2003~2006年供电煤耗、线损率下降共计相当于节约标准煤3400万t,同时带来年减少排放烟尘15.7万t、二氧化硫51.2万t、氮氧化物30.7万t、二氧化碳5700万t的效果,起到了节约资源与保护环境的作用。

但是,我们还应看到目前存在的几个问题。首先电源结构有待优化:①煤电比重很高,近几年又增长较快,所占比重进一步提高,而水电开发率较低,清洁发电装机总容量所占比例较小,截至2006年底,火电装机容量约占装机总容量的 77.8% ;②运行的空冷机组容量所占比例低,其节水优势没有体现出来;③热电联产机组少,城市集中供热普及率较低;④电源调峰能力不足,主要依靠燃煤火电机组降负荷运行,调峰经济性较差。

其次电力生产主要技术指标与国际水平还有一定差距。主要是火电机组参数等级不够先进,超临界机组占的比例偏小;国产大机组的经济性落后于相应进口机组,其中30万kW容量等级,国产亚临界机组的供电煤耗比进口机组高 $4\sim 12\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,60万千瓦容量等级,国产亚临界机组的供电煤耗比进口机组高 $20\sim 23\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,比进口超临界机组高 $28\sim 39.5\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。这种状况有待在今后的发展中逐步予以克服。

经过多年的发展和探索,我国电力工业发展的指导思想已经明确,这就是:大力开发水电,优化发展煤电,积极推进核电,稳步发展天然气发电,加快新能源发电,提高能源利用效率,加强电网建设,保护生态环境,促进装备工业发展,深化体制改革,实现电力、经济、社会、环境统筹协调发展。

二、热力发电厂的类型

热力发电厂是将热能转换成机械能,然后将机械能转换成电能的工厂。

(一) 热力发电厂的类型

按发电厂热能的来源不同,热力发电厂可分为火力发电厂、原子能发电厂、太阳能发电厂、地热发电厂等。

(1) 火力发电厂:利用煤、石油、天然气等矿石燃料生产电能的工厂。

(2) 原子能发电厂(核电站):利用核能来生产电能的工厂。

(3) 太阳能发电厂:利用太阳能发电的电厂,其发电的方式有两种:一种是将太阳能集中到一个容器上,加热水或其他低沸点液体以产生蒸汽,推动汽轮机发电机组发电;另一种是采用光伏电池直接发电。

(4) 地热发电厂:利用地下高温热水(或汽水混合物),经过扩容器降压产生蒸汽,或通过热交换器使低沸点液体产生蒸汽,带动汽轮发电机组发电的电厂。

(二) 火力发电厂的分类

1. 按燃料分类

(1) 燃煤发电厂:以煤为燃料的发电厂,是目前我国火力发电厂的主要类型。

(2) 燃油发电厂:以石油(实际是提取汽油、煤油、柴油后的油渣)为燃料的发电厂。

(3) 燃气发电厂:以天然气、煤气等可燃气体为燃料的发电厂。

(4) 余热发电厂:用工业企业的各种余热进行发电的电厂。

(5) 生物质发电厂:生物质发电主要是利用农业、林业和工业废弃物为原料,也可以将城市垃圾作为原料,采取直接燃烧或气化的方式发电。我国目前主要以秸秆发电、沼气发

电、城市生活垃圾发电与生物质气化发电为主，虽然在实际应用过程中存在不少问题，但生物质发电有着广阔的发展前景。

2. 按供出能源分类

(1) 凝汽式发电厂：只向外供应电能的电厂。

(2) 热电厂：同时向外供应电能和热能的电厂。

3. 按原动机类型分类

(1) 蒸汽轮机发电厂：利用燃料在锅炉中燃烧产生蒸汽，用蒸汽推动汽轮机，再由汽轮机带动发电机发电。这种发电方式在火力发电中居主要地位，占世界火力发电总装机容量的95%以上。

(2) 燃气轮机发电厂：通过压气机将空气压缩后送入燃烧室，与喷入的燃料混合燃烧产生高温高压燃气，进入透平机膨胀做功，推动发电机发电。

(3) 燃气—蒸汽联合循环发电厂：把燃气发电和蒸汽发电组合起来形成燃气—蒸汽联合循环发电，它具有较高的电能转换效率，受到世界各国的重视。

4. 按蒸汽压力和温度等级分类

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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。

(4) 亚临界压力发电厂：蒸汽压力一般为 16.77MPa、温度为 540/540℃的发电厂，单机功率为 300MW 至 600MW 不等。

(5) 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，机组功率一般为 600MW 及以上。

(6) 超超临界压力发电厂：蒸汽压力大于 25MPa、温度为 600/600℃的发电厂，机组功率为 600MW 及以上。

三、火电厂的生产特点及对火电厂的基本要求

火电厂种类虽然很多，但从能量转换的观点分析，其生产过程基本相同，都是将燃料的化学能通过燃烧变为热能，推动涡轮机（蒸汽轮机、燃气轮机）做功产生机械能，经发电机转变为电能，最后通过变压器将电能送入电力系统。

（一）火电厂的特点

与水电厂和其他类型电厂相比，火电厂的特点如下所述。

(1) 布局灵活，装机容量的大小可按需要决定。

(2) 建造工期短，一般为水电厂的一半甚至更短。一次性建造投资少，仅为水电厂的一半左右。

(3) 煤耗量大，生产成本低。2005年我国发电用一次能源 8.56 亿 t 标准煤，占全国一次能源消费量 22.25 亿 t 标准煤的 38.5%，加上运煤费用和大量用水，其生产成本比水力发电要高出 3~4 倍。

(4) 动力设备繁多，发电机组控制操作复杂。厂用电量和运行人员都多于水电厂，运行

费用高。

(5) 汽轮机开、停机过程时间长,耗资大,不宜作为调峰电源使用。

(6) 对环境的污染大。据统计,每燃烧 1t 标准煤约排放 4.6kg 烟尘、15.1kg 二氧化硫、9.0kg 氮氧化物、1.68t 二氧化碳。

(二) 对火电厂的基本要求

1. 安全可靠

热力发电厂的产品(电能或热能)是无法储存的,这就迫使发电厂只能是随产随销,并需做到产销之间的严格协调,否则就难以保证产品的质量。为此,要求发电厂的生产必须具有高度的安全性、可靠性和机动性。

2. 力求经济

我国的电力生产仍以燃煤为主,发电需要的一次能源数量巨大,而能源的利用率又相对较低。因此降低煤耗、水耗和厂用电率是火力发电生产永远的主题。

3. 控制污染,保护环境

火电厂在生产过程中产生的烟尘、SO_x、NO_x、废水、灰渣和噪声等,污染环境,危害人民的身体健康,必须采取有效措施进行控制。

四、火力发电主要技术发展方向

今后 20~30 年内,优化火电结构将主要围绕节能、节水与环保这几个主题进行。即节约能源,提高发电效率;减少污染物排放,保护生态环境;节约淡水;实现循环经济方式。具体措施如下:

1. 大力发展超临界和超超临界参数机组

要大力发展大容量、高效率、低污染、调峰性能好的燃煤机组,以节约能源,降低排放,实现国民经济的可持续发展。我国的电力工业发展产业政策是结合技术引进,积极开发建设 600 MW 和 1000MW 级的超临界和超超临界参数机组。

超超临界技术是国际上成熟、先进的发电技术,在机组的可靠性、可用率、机组寿命等方面已经可以和亚临界机组媲美,并有了较多的商业运行经验。目前,国际上超超临界参数机组的参数能够达到主蒸汽压力 25~31MPa,主蒸汽温度 566~611℃,机组热效率 42%~45%。

2. 大力发展洁净煤发电技术

在目前有代表性的洁净煤发电新技术中,包括有超超临界发电技术、循环流化床发电技术(CFBC)、增压流化床联合循环发电技术(PFBC-CC)、整体煤气化联合循环发电技术(IGCC)。几种技术在机组净效率、环保性能、可靠性、技术成熟程度、设备投资、电价、批量化生产等方面各具有特点。这几种新技术的技术经济比较见表 0-1。

表 0-1 几种洁净煤发电技术的比较

发电技术	机组净效率 (%)	环保性能	可靠性	技术成熟程度	设备投资
超超临界	45.47	较优	最高	成熟	中等
循环流化床	38.40	一般	中等	基本成熟	较低
增压循环流化床联合循环	41.42	一般	低	尚待成熟	较高
整体煤气化联合循环	43.45	优	低	尚待成熟	最高

发展大容量循环流化床锅炉 (CFB) 是实现清洁燃烧的途径之一。循环流化床锅炉 (CFB) 对煤种的适应性广, 系统简单, 调峰性能好, 特别适用于燃烧高硫煤和劣质煤, 其脱硫效率可达 90%, NO_x 排放低于 $200\text{mg}/\text{m}^3$ (标况下)。

整体煤气化联合循环 (IGCC) 具有能量转换效率高, 满足严格的环保标准, 进料灵活性大, 可以实现多联产, 能为经济地去除 CO_2 创造条件等特点, 被世界公认为是最具发展潜力的洁净煤技术。

增压循环流化床联合循环 (PFBC-CC) 的优点是系统简单, 技术比 IGCC 电厂容易掌握, 但存在高温除尘、效率需要提高等问题, 它是清洁煤发电和老厂改造的途径之一。

3. 开发节水型机组

火力发电需要耗用大量的淡水资源, 而我国淡水资源短缺, 人均占有量为世界平均水平的 $1/4$, 且分布不均, 其中煤炭资源丰富的华北和西北属严重缺水地区, 所以应加强在富煤地区研究开发超临界和超超临界参数直接空冷机组, 优化城市中水处理技术, 利用其作为电厂补给水, 提高湿式冷却塔浓缩倍率, 优化循环排污水净化技术, 实现污水零排放。

4. 开发环境保护技术

我国应高度重视电力与环境的协调发展, 加大环保投资力度, 特别是对二氧化硫的控制力度, 在这方面, 我国与先进国家差距还较大, 主要表现在效率低和污染物排放量大两方面。环境污染问题已成为制约我国电力工业发展的主要因素。应加强开发具有自主知识产权的脱硫脱硝技术, 积累工程建设及运行经验, 进一步开发高附加值的粉煤灰综合利用技术。

5. 推进热电联产、热电冷联产和热电煤气多联供

工业热负荷为主的地区, 因地制宜建设以热力生产为主的背压机组; 在采暖负荷集中或发展潜力较大的地区, 建设 300MW 等级以上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。

五、本课程的性质和任务

本课程是以热力发电厂整体为研究对象, 着重研究发电厂能量转换的热力系统及提高其热经济性方法的专业课程。课程的主要内容有: 热力发电厂的热经济性、发电厂的主要热力辅助设备及系统、发电厂汽管道和阀门、发电厂的热力系统、热电厂及热、电联合生产、发电厂热力设备的经济运行、发电厂辅助生产系统。本课程是一门综合性较强的专业课, 应在已具有工程热力学、传热学、汽轮机原理、锅炉原理等方面有关的知识基础上进行学习。

第一章 热力发电厂的热经济性

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，就要研究发电厂热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并提出相应措施。

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）；以热力学第一定律和热力学第二定律为基础的焓方法。

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，单纯以数量来衡量，没有考虑能量的质量问题。由于其直观、易于理解，计算方便，目前被广泛用于电厂热经济性定量分析中。

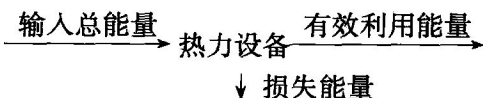
焓方法是以燃料化学能的焓被利用的程度来评价电厂的热经济性的，既考虑了能量的守恒性又反映了能量在品质上的差异，揭示出了能量在传递、转换过程中的方向性、条件性和可能的转换程度。一般用于电厂热经济性定性分析。

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，因此热量法又称为热效率法。

热效率反映了热力设备及系统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 η 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）锅炉设备的热损失及锅炉效率

发电厂的燃料在锅炉中燃烧，使燃料的化学能转变为烟气的热能，烟气流过锅炉各部分

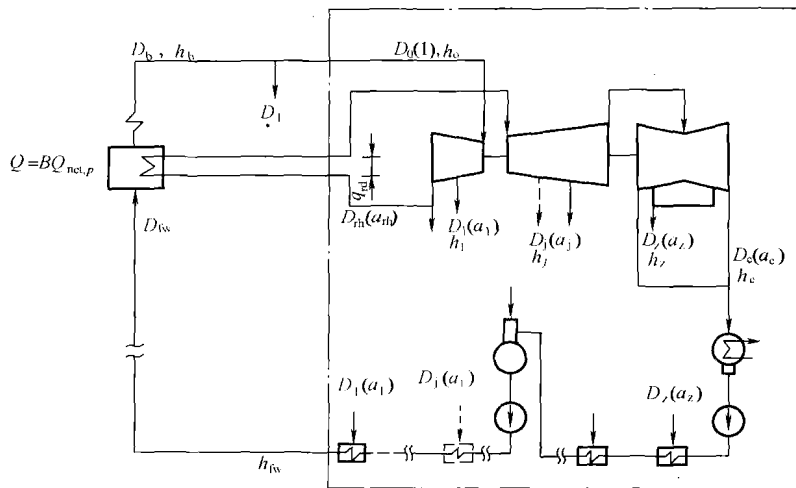


图 1-1 凝汽式发电厂热力系统图

受热面，把热量传递给水和水蒸气。

锅炉效率 η_b 表示锅炉设备的热负荷与输入燃料的热量之比。对于不计连续排污热损失的非再热式锅炉，其表达式为

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

锅炉热损失率为

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

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

Q_{cp} ——全厂热耗量, kJ/h;

B ——锅炉单位时间内的燃料消耗量, kg/h;

$Q_{net,p}$ ——燃料的低位发热量, kJ/kg;

ΔQ_b ——锅炉热损失, kJ/h;

D_b ——锅炉过热蒸汽流量, kg/h;

D_{rh} ——再热蒸汽流量, 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;

q_{rh} ——单位再热蒸汽吸热量, kJ/kg。

锅炉效率反映了燃料输入热量被有效利用的程度，同时也反映了热损失的大小。锅炉效率越高，说明锅炉在能量转换环节中的热损失越小。锅炉设备中的热损失主要包括有排烟热损失、未完全燃烧热损失、散热损失、排污热损失、灰渣物理热损失等。其中排烟热损失最大，约占总损失的 40%~50%。

影响锅炉效率的因素主要有锅炉的参数、容量、结构特性及燃料的种类等。现代大型电站锅炉的效率一般为 90%~94%。

(二) 管道热损失及管道效率

锅炉生产的蒸汽通过主蒸汽管道进入汽轮机做功。管道效率是指通过主蒸汽管道、再热

蒸汽管道时的散热损失及工质排放和泄漏造成的热损失。蒸汽在管道中的节流损失，在汽轮机的相对内效率中考虑。

管道效率表示汽轮机的热耗量 Q_0 与锅炉设备热负荷 Q_b 之比。对于非再热机组，其表达式为

$$\eta_p = \frac{Q_0}{Q_b} = \frac{D_0(h_0 - h_{fw})}{D_b(h_b - h_{fw})} = 1 - \frac{\Delta Q_p}{Q_b} \quad (1-3)$$

管道热损失率 ζ_p 为

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

式中 Q_0 ——汽轮机组热耗量，kJ/h；

D_0 ——汽轮机组的汽耗量，kg/h；

h_0 ——汽轮机进口蒸汽比焓，kJ/kg；

ΔQ_p ——管道热损失，kJ/h。

管道效率反映了管道设施保温的完善程度和工质在主蒸汽管道上的泄漏和排放的大小。一般情况下，现代发电厂的管道效率不考虑工质损失时在 99% 以上。

(三) 汽轮机设备的冷源损失及汽轮机绝对内效率

蒸汽在汽轮机内膨胀做功，而后进入凝汽器放热并凝结成水。排汽焓与凝结水焓之差，即为汽轮机设备的冷源损失，其包括两部分：第一部分称为固有冷源损失，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，与其对应的能量被有效利用的程度用理想循环效率 η_i 来反映；第二部分称为附加冷源损失，即蒸汽在汽轮机中实际膨胀过程中产生的损失，包含进汽节流、排汽及内部（包括漏汽、摩擦、湿汽等）损失，这些损失使汽轮机的实际排汽焓 h_c 大于理想排汽焓 h_{ca} ，从而增加一部分冷源损失 $(h_c - h_{ca})$ ，如图 1-2 所示。通常用汽轮机的相对内效率 η_{ri} 来说明汽轮机内部构造的完善程度。

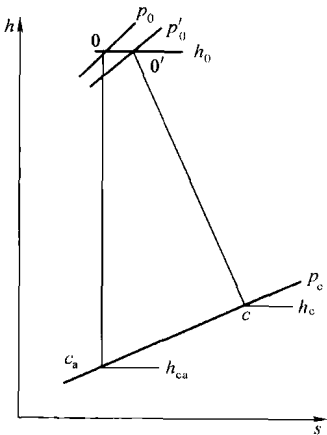


图 1-2 蒸汽膨胀过程线

汽轮机的绝对内效率 η_i 表示汽轮机实际内功率与汽轮机热耗量之比（即所做的功与耗用的热量之比），其表达式为

$$\eta_i = \frac{3600P_i}{Q_0} = \frac{1 - \Delta Q_c}{Q_0} = \frac{3600P_i}{3600P_{ia}} \frac{3600P_{ia}}{Q_0} = \eta_n \eta_t \quad (1-5)$$

$$\eta_{ri} = \frac{P_i}{P_{ia}} \quad (1-6)$$

$$\eta_t = \frac{3600P_{ia}}{Q_0} \quad (1-7)$$

上几式中 Q_0 ——汽轮机汽耗量为 D_0 时的热耗，kJ/h；

P_i ——汽轮机汽耗量为 D_0 时的实际内功率，kW；

P_{ia} ——汽轮机汽耗量为 D_0 时的理想内功率，kW；

ΔQ_c ——汽轮机冷源热损失，kJ/h；

η_i ——理想循环的热效率；

η_i ——汽轮机相对内效率。

汽轮机冷源热损失率 ζ_c 为

$$\zeta_c = \frac{\Delta Q_c}{Q_{cp}} = \frac{\Delta Q_c}{Q_0} \frac{Q_0}{Q_b} \frac{Q_b}{Q_{cp}} = \frac{Q_b}{Q_{cp}} \frac{Q_0}{Q_b} \left(1 - \frac{3600P_i}{Q_0}\right) = \eta_b \eta_p (1 - \eta_i) \quad (1-8)$$

式(1-5)是相对于新蒸汽流量为 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, $w_i = \frac{W_i}{D_0} = \frac{3600P_i}{D_0}$, $q_0 = \frac{Q_0}{D_0}$, $\Delta q_c = \frac{\Delta Q_c}{D_0}$ 。

另外, η_i 计算式常用汽轮机汽水参数来表示上面表达式中的 Q_0 、 P_i 、 q_0 、 w_i 。 η_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 η_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 Δh_j ——抽汽在汽轮机中的实际焓降。

其中 Δh_j 在再热前为 $\Delta h_j = h_0 - h_j$; Δh_j 在再热后为 $\Delta h_j = h_0 - h_j + q_{rh}$ 。 Δh_c 为凝汽流在汽轮机中的实际焓降。

(2) W_i 以输入、输出汽轮机的能量之差来表示, 则

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

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

将式(1-12)代入式(1-11), 整理得

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

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

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

$$\left. \begin{aligned} w_i &= h_0 + \alpha_{rh} q_{rh} - \sum_1^z \alpha_j h_j - \alpha_c h_c = \sum_1^z \alpha_j \Delta h_j + \alpha_c \Delta h_c \quad \text{kJ/kg} \\ \alpha_j &= \frac{D_j}{D_0} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

(3) 用反平衡法求 W_i

$$W_i = Q_0 - \Delta Q_c + D_{fw} \Delta h_{pu} \quad \text{kJ/h} \quad (1-15)$$

式中 D_{fw} ——给水流量, kg/h;

Δh_{pu} ——1kg 给水在给水泵中的焓升, kJ/kg。

2. 汽轮机汽耗为 D_0 时机组热耗 (循环吸热量)

$$Q_0 = D_0 h_0 + D_{rh} q_{rh} - D_{fw} h_{fw} \quad \text{kJ/h} \quad (1-16)$$

无工质损失时 $D_0 = D_{fw}$, $Q_0 = D_0 (h_0 - h_{fw}) + D_{rh} q_{rh}$

1kg 新蒸汽的热耗 (比热耗)

$$q_0 = h_0 + \alpha_{rh} q_{rh} - h_{fw} = (h_0 - h_{fw}) + \alpha_{rh} q_{rh} \quad \text{kJ/kg} \quad (1-17)$$

根据能量平衡

$$h_{fw} = \alpha_c h'_c + \sum_1^z \alpha_j h_j \quad \text{kJ/kg} \quad (1-18)$$

将式 (1-18) 代入式 (1-16), 则机组热耗可写成

$$\begin{aligned} Q_0 &= D_0 (h_0 - \alpha_c h'_c - \sum_1^z \alpha_j h_j) + D_{rh} q_{rh} \\ &= \sum_1^z D_j \Delta h_j + D_c (h_0 - h'_c + q_{rh}) \quad \text{kJ/kg} \end{aligned} \quad (1-19)$$

比热耗 q_0 可写成

$$\begin{aligned} q_0 &= h_0 + \alpha_{rh} q_{rh} - h_{fw} \\ &= h_0 + \alpha_{rh} q_{rh} - (\alpha_c h'_c + \sum_1^z \alpha_j h_j) \\ &= \sum_1^z \alpha_j \Delta h_j + \alpha_c (h_0 - h'_c + q_{rh}) \end{aligned} \quad (1-20)$$

以上各式中 h_0 、 h_j 、 h_c 、 h'_c 、 h_{fw} ——新汽、抽汽、实际排汽、冷凝水、锅炉给水的比焓, kJ/kg;

α_j 、 α_{rh} 、 α_c ——汽轮机抽汽、再热蒸汽和凝汽的份额;

D_{rh} ——再热蒸汽量, kg/h;

q_{rh} ——1kg 再热蒸汽的吸热量, kJ/kg。

3. 凝汽式汽轮机的绝对内效率 η_i

$$\begin{aligned} \eta_i &= \frac{3600 P_i}{Q_0} = \frac{W_i}{Q_0} = \frac{\sum_1^z D_j \Delta h_j + D_c \Delta h_c}{D_0 (h_0 - h_{fw}) + D_{rh} q_{rh}} \\ &= \frac{\sum_1^z D_j \Delta h_j + D_c \Delta h_c}{\sum_1^z D_j \Delta h_j + D_c (h_0 - h'_c + q_{rh})} \end{aligned} \quad (1-21)$$

用比内功和比热耗来表示, 则 η_i 的表达式为

$$\eta_i = \frac{w_i}{q_0} = \frac{\sum_1^z \alpha_j \Delta h_j + \alpha_c \Delta h_c}{(h_0 - h_{fw}) + \alpha_{rh} q_{rh}}$$

$$= \frac{\sum_1^z \alpha_j \Delta h_j + \alpha_c \Delta h_c}{\sum_1^z \alpha_j \Delta h_j + \alpha_c (h_0 - h'_c + q_{rh})} \quad (1-22)$$

式(1-22)中,若无再热蒸汽,则 $q_{rh}=0$,即为回热循环汽轮机绝对内效率;若 $q_{rh}=0$, $\sum \alpha_j=0$,即无回热,也无再热,那么,该式即为朗肯循环汽轮机的绝对内效率。

现代大型汽轮机组的绝对内效率达到45%~47%。扣去给水泵消耗的功率 P_{pu} (kW),可得汽轮机的净内热效率 η^n

$$\eta^n = \frac{P_i - P_{pu}}{Q_0} \quad (1-23)$$

(四) 汽轮机的机械损失及机械效率

汽轮机的机械损失包含汽轮机支持轴承、推力轴承与轴和推力盘之间的机械摩擦耗功,以及拖动主油泵、调速系统的耗功量,用汽轮机的机械效率来评价,它等于汽轮机输出给发电机轴端的功率与汽轮机内功率之比,称之为机械效率 η_m ,其表达式为

$$\eta_m = \frac{P_{ax}}{P_i} = 1 - \frac{\Delta Q_m}{W_i} \quad (1-24)$$

式中 P_{ax} ——发电机输入功率, kW;

ΔQ_m ——机械损失, kJ/h。

汽轮机机械损失率 ζ_m 为

$$\zeta_m = \frac{\Delta Q_m}{Q_{cp}} = \eta_b \eta_p \eta_i (1 - \eta_m) \quad (1-25)$$

现代大型汽轮机的机械效率一般大于99%。

(五) 发电机的能量损失及发电机效率

发电机的损失包括发电机轴与支持轴承摩擦耗功,以及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)造成的功率消耗。可用发电机效率 η_g 来评价。它等于发电机的输出功率 P_e 与轴端输入功率 P_{ax} 之比,其表达式为

$$\eta_g = \frac{P_e}{P_{ax}} = 1 - \frac{\Delta Q_g}{3600 P_{ax}} \quad (1-26)$$

式中 ΔQ_g ——发电机损失, kJ/h。

发电机能量损失率 ζ_g 为

$$\zeta_g = \frac{\Delta Q_g}{Q_{cp}} = \eta_b \eta_p \eta_i \eta_m (1 - \eta_g) \quad (1-27)$$

现代大型发电机的效率,采用氢冷时为98%~99%,采用空冷时为97%~98%,采用双水内冷时为96%~98.7%。

(六) 全厂总能量损失及总效率

上述能量损失的总和就是整个火力发电厂的能量损失。对凝汽式发电厂而言,其总效率 η_{cp} 表示发电厂输出的有效能量(电能)与输入总能量(燃料的化学能)之比,即

$$\eta_{cp} = \frac{3600 P_e}{B Q_{net,p}} = \frac{3600 P_e}{Q_{cp}} \quad (1-28)$$

全厂总效率与分效率之间的关系,可用图1-3示出,为

$$\eta_{cp} = \eta_b \eta_p \eta_i \eta_m \eta_g = \eta_b \eta_p \eta_i \eta_m \eta_g \quad (1-29)$$