



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

火电厂 热力系统

张灿勇 主 编
张洪明 副主编



中国电力出版社

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



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书
电力职业技术教育教学改革系列教材

要 容 内

火电厂 热力系统

电力职业技术教育教学改革系列教材
建设委员会

主 任	张效胜				
副主任	张 伟				
委 员	杨立久	苏庆民	王庆民	王焕金	
	杨新德	朱正堂	侯仰东	郭光宏	
	高洪雨	孙奎明	蔡卫敏	马明礼	

本书主编	张灿勇	
副 主 编	张洪明	
编 写	马明礼	李广华
主 审	张效胜	



中国电力出版社

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



内 容 提 要

本书以 C12 热电机组和 600MW 火电机组为典型机组,讲述了各局部热力系统的组成、连接方式以及发电厂主要热力辅助设备的基本结构、工作原理和运行的基本知识,介绍了发电厂汽水管道、阀门及其运行维护知识,同时对火电厂的供水与冷却系统、燃料运输系统、除灰系统也做了适当的介绍。

本书为职业技术学院电力技术专业相关课程教材,也可作为火电厂供热机组和大容量凝汽式机组运行和检修岗位的培训教材,还可供火电厂相关专业技术人员学习与参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

火电厂热力系统/张灿勇主编. —北京:中国电力出版社, 2007

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978-7-5083-6023-2

I. 火… II. 张… III. 火电厂-热力系统-职业教育-教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 130748 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

*

2007 年 8 月第一版 2007 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 358 千字 2 插页

印数 0001—3000 册 定价 24.00 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

随着电力体制改革和教育体制改革的不断深入,电力职业技术教育基本完成了体制和机制的重大变革。分布在全国各地的电力职工大学、电力高等专科学校、中等专业学校和电力技校,已逐步分化为三种模式:一是结合职业技能资格证书的推广,改建成为当地的电力职工培训和鉴定中心,基本转为职后教育,不再开展职前学历教育;二是响应国家“企业不再办社会”的号召,离开了传统的电力系统,并加入本地教育系统;三是坚持全方位地开展电力职业教育。部分高等职业技术学院、电力学校,在保持相当规模的职前学历教育的同时,又为电力企业开展各种培训和鉴定服务。在电力职业教育的管理体制上,也由原来的行业管理转变为双重管理,即教育资源行业管理和教育职能属地管理。这些变革又将电力职业技术教育教材建设的工作推向一个新的探索期。

《电力职业技术教育教学改革系列教材》的主要特点如下:

(1) 针对性强,实现了理论和实践的紧密结合。根据电力职业技术教育的特点,以及培养应用型人才的教育目标所界定教材内容,针对学生特点和教学实际,删繁就简,精选教材内容。文化基础课突出素质教育;专业基础课坚持“必须、够用”的原则,不片面强调学科体系的完整性;专业课则强调贴近生产实际。

(2) 实用性强,实现了传授知识和培养技能的紧密结合。坚持教材内容的针对性、科学性和先进性,在删去一些分析复杂计算的同时,充实了部分技术性、工艺性、实用性强的内容。对于固定格式的分析计算,只教会学生使用工具书或计算机;对于技术性的内容,则通过实践训练培养学生的操作技能。

(3) 趣味性强,有利于提高学生的学习积极性,改善学习效果。借助科普读物的编排方式,适当穿插与学科相关的趣味阅读材料。在教材内容编排上,采用层次化、模块化的结构,穿插引导、提示、对比、小结等内容,使枯燥的理论课程变得生动有趣。

本书作为该系列教材之一,很好地体现了以上特点。本书的特色主要体现为以下几个方面:

(1) 主题线索清晰。本书的内容主线有两条:一是机组的热经济性;二是主要热力系统和辅助设备。在篇幅上侧重第二条主线。

(2) 内容详略得当。本书重点内容有四部分,即“排挤”原理、回热系统计算、三大辅助设备、四大热力系统。对重点内容本书进行了详细分析和阐述,而其他章节在编写上则力求简练。另外,每小节有针对性地设置了巩固复习题,通过解答复习题以巩固所学的知识;每章后编写了学习指导,引导学习者看清知识的经纬,有目的地去探求,并可通过综合测试题检查学习效果。

(3) 机组选材典型。根据目前学生就业的实际,本书在机组选材上兼顾了热电机组和大容量凝汽式机组。热电机组主要以 C12 机组为主,大容量凝汽式机组主要以 N600MW 机组

为主。另外，考虑到学习知识的宽度和学生就业的适应性，本书也对其他典型机组进行了简要的介绍。

(4) 注重新技术跟踪。根据目前生产现场的实际情况，本书适当增加了新技术、新设备在发电厂中的应用，如汽液两相流自动疏水器、旋膜式除氧器、凝汽器空冷技术等。

(5) 分析论述直观。为突出本书结合实际论述直观的特点，书中能用图说明问题的，尽量用图，设备部分都增加了设备外观图，大部分局部热力系统在现场全面性热力系统的基础上为方便学习做了适当的改进，并配有文字说明。

(6) 注重专业拓展。在参考相关文献的基础上，本书安排了篇幅不等的拓展阅读资料九篇。由于大部分资料来源于现场，拉近了教材与生产现场的距离，使学习者感觉到所学知识的重要性和实用性，在拓展知识面和开拓思路的同时，增强了学习兴趣。

本书由山东省电力学校张灿勇主编，并编写绪论，第二章的第二、三节，第三、五章；山东省电力学校马明礼编写第一章；山东省电力学校李广华编写第二章的第一节；山东省电力学校张洪明编写第四、六、七和八章。全书由山东省电力学校张效胜主审。

在本书的编写过程中，编写组得到了有关专家的热情指导，以及中华电力聊城发电厂、华电集团邹县发电厂、华能集团德州发电厂、鲁邦大河热电有限公司、泰安城建热电厂、太原电力职业技术学院、国电太原第一热电厂、国电太原第二热电厂等单位的协助，得到山东省电力学校领导、学校教务部和专业科领导的大力支持，同时也得到了许多同事实实在在的帮助，特别是李诚、张立华、张斌、叶飞等老师，给予了我们许多好的建议和具体帮助，在此谨致谢意！

由于水平所限，对于书中难免存在缺点和不足之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2007年7月

目 录

前言	
绪论	1
绪论学习指导	4
巩固复习题	5
第一章 发电厂的热经济性	6
第一节 凝汽式发电厂的各种热损失和效率	6
巩固复习题	9
第二节 凝汽式发电厂的主要经济指标	9
巩固复习题	12
第三节 提高发电厂热经济性的途径	12
巩固复习题	20
本章学习指导	20
本章综合测试题	23
第二章 发电厂主要热力辅助设备	25
第一节 凝汽设备	25
拓展阅读 300MW 机组真空偏低的原因分析及改进措施	39
巩固复习题	43
第二节 回热加热器	44
拓展阅读 回热加热器泄漏原因分析及对策	58
巩固复习题	62
第三节 除氧器	62
拓展阅读 除氧器排汽利用实例	72
巩固复习题	73
本章学习指导	74
本章综合测试题	75
第三章 给水回热加热	76
第一节 回热机组的热经济指标	76
巩固复习题	80
第二节 影响回热过程热经济性的主要因素	80
巩固复习题	83
第三节 回热系统的连接	83
拓展阅读 排挤抽汽对循环热效率的影响	87

巩固复习题	88
第四节 回热系统计算	88
巩固复习题	104
本章学习指导	106
本章综合测试题	107
第四章 发电厂的汽水管	109
第一节 管道的材料和规范	109
巩固复习题	115
第二节 阀门及其应用	115
巩固复习题	121
第三节 管道的热膨胀、补偿、支持和保温	122
巩固复习题	131
本章学习指导	131
本章综合测试题	131
第五章 发电厂热力系统	134
第一节 发电厂热力系统概述	134
巩固复习题	141
第二节 主蒸汽与再热蒸汽系统	141
巩固复习题	147
第三节 再热机组的旁路系统	147
拓展阅读 再热机组不设置旁路系统需采取的措施	150
巩固复习题	151
第四节 回热抽汽系统	151
巩固复习题	155
第五节 主凝结水系统	155
拓展阅读 重力自流接触式加热器系统	159
巩固复习题	161
第六节 除氧器管道系统	161
拓展阅读 无除氧器热力系统	164
巩固复习题	165
第七节 给水系统	165
巩固复习题	173
第八节 热电厂供热系统	173
巩固复习题	179
第九节 锅炉排污与发电厂的补充水	179
巩固复习题	183
第十节 典型机组全面性热力系统介绍	183
巩固复习题	184
本章学习指导	184

本章综合测试题	186
第六章 发电厂供水与冷却系统	188
第一节 发电厂供水系统	188
第二节 凝汽器的冷却系统	191
第三节 发电厂的工业冷却水系统	195
拓展阅读 空冷技术现场应用概况	198
巩固复习题	198
本章学习指导	199
本章综合测试题	200
第七章 发电厂燃料运输系统	202
第一节 输煤、卸煤设备及受煤设备	202
第二节 贮煤场及煤场机械	207
第三节 辅助设备	211
巩固复习题	215
本章学习指导	215
本章综合测试题	215
第八章 发电厂的除灰系统	217
第一节 水力除灰系统	217
第二节 气力除灰系统	221
拓展阅读 灰渣的综合利用	226
巩固复习题	226
本章学习指导	227
本章综合测试题	228
参考文献	230

绪 论

内 容 提 要

本章介绍了电能的特点及对电力生产的要求、热力发电厂的类型、火力发电技术发展的主要方向、本课程的性质和学习要求。

学习目的

掌握电能生产的特点及其基本要求；熟悉热力发电厂的类型；了解火力发电技术发展的主要方向；了解本课程的性质和学习要求。

学习内容

电力工业是把一次能源转变为电能的生产行业。一次能源是指以原始状态存在于自然界中、不需要经过加工或转换过程就可直接提供热、光或动力的能源，如石油、煤炭、天然气、水力、原子能、风能、地热能、海洋能等，上述前五种能源得到了广泛的使用，所以称为常规能源，全球的能源消费几乎全靠这五大能源来供应。由一次能源加工、转化而成的能源称为二次能源。电能是优质的二次能源，一些不宜或不便于直接利用的一次能源（如核能、水能、低热值燃料等），可以通过转换为电能而得到充分的利用，由此，扩大了一次能源的应用范围。

电能可较为方便地转换成为社会所需要的各种形式的能源，如机械能、光能、磁能、化学能等，而且转换效率很高。电能容易控制，无污染。以电能作为动力，可有效地提高各行各业的生产自动化水平，提高劳动生产率，改善劳动者的工作环境和条件。另外，电能是提高人民的物质文化水平方面同样起着非常重要的作用。

一、电力生产的特点及基本要求

目前，电能还不能进行大量储存，这就要求发电厂所发出的电功率，必须随时与电用户所消耗的电功率保持平衡，以保证用户对电量的需求。为此，发电设备的运行工况必须随着外界负荷的变化而改变。根据电能生产的这一特点，对电能生产提出了如下要求：

(1) 安全可靠。电力生产是连续进行的现代化大生产，一个小事故处理不当就可能导致大面积的停电事故，给工农业生产和人民生活造成严重的危害，所以电力生产必须保证发电和供电的可靠性与安全性。电力系统应有必需的备用容量，以保证在检修或事故情况下能够向外正常供电，对重要用户还要采用双回路供电。

(2) 力求经济。目前，我国的电力生产仍以火电为主，所消耗的一次能源较多，而能源的利用率又很低（仅为 33% 左右，与世界先进水平相差 10 个百分点），节能空间和潜力很大。如果发电煤耗平均下降 $1\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，按目前的发电量计算，全年可节约标准煤上亿千克；若全国送电线损率和厂用电率降低 1%，则全国可节电达百亿千瓦时。因此，在电力生产过程中，必须力求经济运行，以提高能源利用率。

(3) 保证电能质量。随着电力工业的不断发展, 电网愈来愈大, 为保证电能质量, 在电力系统中设有适应用户有功功率变化的调频厂或机组, 使电网频率保持在规定的范围内。为了保证电压质量, 在电网中无功功率差异较大的局部地区, 要安装电力电容器或调相机组, 给予补偿。

(4) 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, 必须采取有效措施严格控制。目前采用高效的电气式除尘器使烟气中的粉尘含量大为减少, 同时采用煤或烟气的脱硫、脱硝、流化床及低温分段燃烧等技术, 使烟气中有害气体的含量得到有效控制, 采用中水处理技术节约水资源。可以说, 火电厂环保的优劣已成为衡量一个国家电力工业技术水平高低的标志之一。

二、热力发电厂的类型

热力发电厂是将热能转换为机械能, 最终将机械能转换为电能的工厂。

(一) 热力发电厂的分类

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、太阳能发电厂和地热发电厂等。

(1) 火力发电厂。以煤、石油(重油)、天然气等为燃料的电厂称为火力发电厂。目前, 我国的火电厂主要以燃煤为主, 严格控制电厂使用燃油。

(2) 原子能发电厂(核电站)。利用原子在原子反应堆(原子锅炉)核裂变时所释放出的大量热能加热水产生蒸汽, 通过汽轮发电机机组发电的电厂称为原子能发电厂。

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

(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, 带动汽轮发电机发电的电厂称为地热发电厂。

(二) 火力发电厂的分类

火力发电厂分类方法较多, 在此只介绍主要的几种。

1. 按生产的产品分类

可分为凝汽式发电厂和热电厂两种。

1) 凝汽式发电厂: 只对外供应电能, 将在汽轮机中做完功的蒸汽排入凝汽器凝结成水, 再送往锅炉循环使用, 这种发电厂称为凝汽式发电厂。

2) 热电厂: 利用在汽轮机中做过功的抽汽或排汽向热用户供热, 这种既生产电能又对外供热的电厂称为热电厂。

2. 按燃用的一次能源分类

1) 燃煤发电厂: 以煤炭作为燃料的电厂称为燃煤发电厂。按照我国的能源政策应优先采用劣质煤发电。

2) 燃油发电厂: 以重油或石油作为燃料的电厂称为燃油发电厂。按照我国的能源政策, 除国家批准的燃油电厂外, 应严格控制电厂使用燃油。

3) 燃气发电厂: 在地下天然气丰富的地区, 以天然气作为燃料的电厂称为燃气发电厂。当企业有副产品煤气时, 亦可用来发电。

4) 工业废热发电厂：利用工业企业排放的废热或其他可燃物，采用余热锅炉进行发电的电厂称为工业废热发电厂。

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、沼气发电与生物质气化发电为主，虽然在实际应用过程中仍存在不少问题，但是生物质能发电行业有着广阔的发展前景。

3. 按主蒸汽参数分类

1) 低压发电厂：主蒸汽参数为 $1.4\text{MPa}/350^{\circ}\text{C}$ ，适用于 3.0MW 及以下汽轮机， $10\sim 20\text{t/h}$ 锅炉。

2) 中压发电厂：主蒸汽参数为 $3.9\text{MPa}/450^{\circ}\text{C}$ ，适用于 $6\sim 50\text{MW}$ 汽轮机， $35\sim 220\text{t/h}$ 锅炉。

3) 高压发电厂：主蒸汽参数为 $9.8\text{MPa}/540^{\circ}\text{C}$ ，适用于 $25\sim 100\text{MW}$ 汽轮机， $120\sim 410\text{t/h}$ 锅炉。

4) 超高压发电厂：主蒸汽参数为 $13.7\text{MPa}/540^{\circ}\text{C}$ (555°C)，适用于 $125\sim 200\text{MW}$ 汽轮机， $400\sim 670\text{t/h}$ 锅炉。

5) 亚临界发电厂：主蒸汽参数为 $16.7\text{MPa}/540^{\circ}\text{C}$ (555°C)，适用于 $300\sim 600\text{MW}$ 汽轮机， $1000\sim 2050\text{t/h}$ 锅炉。

6) 超临界发电厂：现在常规的超临界机组采用的主蒸汽参数为 24.1MPa 、 $538^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}$ ，适用于 $600\sim 1000\text{MW}$ 级汽轮机。

7) 超超临界发电厂：超超临界机组一般采用二次再热，其参数为 31.0MPa 、 $566^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}$ ，或 31.0MPa 、 $593^{\circ}\text{C}/593^{\circ}\text{C}/593^{\circ}\text{C}$ ，或 34.5MPa 、 $649^{\circ}\text{C}/593^{\circ}\text{C}/593^{\circ}\text{C}$ ，适用于 1000MW 及以上级汽轮机。

链 接

“临界”：指机组在设计工况下运行时工质的状态为临界状态，对于水蒸气，临界压力为 22.115MPa 。

三、火力发电技术发展的主要方向

1. 发展高参数、大容量的火电机组，以提高效率、降低发电成本

亚临界压力机组作为近期的主力机组已逐步过渡到 600MW 等级，新建的引进型亚临界压力机组的实际运行供电煤耗率可降至 $320\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 以下。超超临界压力机组目前在引进国外技术，消化吸收的基础上，逐步实现国产化和批量化，并提高其在火电机组中的比重。容量等级从 600MW 起步，向 1000MW 级发展，机组参数从亚临界向超超临界发展。

在北方缺水地区发展大型空冷机组，研究开发 600MW 等级和 1000MW 等级空冷机组，重点开发直接空冷技术。

在研究和总结国内外燃烧无烟煤技术的基础上，发展大型燃烧无烟煤锅炉。

2. 加快烟气脱硫、脱硝，高效除尘成套技术的开发

目前环保方面的要求越来越严格，很多地方已出台了电站必须加装脱硫装置和采用低 NO_x 燃烧器，以减少 SO_x 和 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。

3. 消化吸收国外先进发电技术，推动洁净煤发电示范工程

目前世界上技术比较成熟的有常压循环流化床燃烧(CFBC)、增压流化床燃烧联合循环(PFBC-CC)以及整体煤气化联合循环(IGCC)。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个百分点),环保性能更好,其排放量仅为常规机组排放量的1/5~1/10。

目前国内CFBC锅炉已具备设计制造100MW等级的能力,现正向300MW等级锅炉发展。

PFBC-CC的发展方向是提高汽轮机进口蒸汽参数和燃气轮机进口燃气温度,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是高效清洁的燃煤联合循环发电技术,目前该技术已基本成熟。我国正积极努力,在建立好示范电厂的同时引进部分技术,逐步实现国产化。

4. 开展以大型燃气轮机为核心的联合循环发电技术

随着天然气产量的增加,为减轻环保压力,燃气轮机的发展非常迅速。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种优点,应大力提倡。但是我国燃气轮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。

四、本课程的性质和任务

“火电厂热力系统”是火电厂热能动力类专业的一门综合性的主干专业课程。

本课程以火力发电厂整体为研究对象,通过学习达到如下目标:掌握发电厂的有关热经济指标;应用热功转换理论定性分析其热经济性,能够用常规功率法定量计算机组回热系统的热经济性;熟悉电厂主要辅助热力设备的构造及其工作原理;全面掌握发电厂热力系统及电厂经济运行的基本知识;熟悉发电厂的供水与冷却、燃煤运输系统、除灰系统。

通过学习本课程,可以为从事热能动力类专业的生产技术人员奠定良好的基础。

绪论学习指导

1. 电力工业是把一次能源转变为电能的生产行业;电能是优质的二次能源。
2. 由于发电厂所发出的电功率必须随时与电用户所需的电负荷相适应,电力生产又是连续进行的现代化大生产,因此,电力生产必须做到安全、经济运行,保证供电质量,同时控制污染,保护环境。
3. 热力发电厂分为火力发电厂、原子能发电厂、太阳能发电厂和地热发电厂等。其中,火力发电厂按不同分类标准可分为:①按生产的产品分,可分为凝汽式发电厂和热电厂两种;②按燃用的一次能源分,可分为燃煤发电厂、燃油发电厂、燃气发电厂、工业废热发电厂和生物质发电厂等;③按主蒸汽参数分,可分为低压发电厂、中压发电厂、高压发电厂、超高压发电厂、亚临界发电厂、超临界发电厂和超超临界发电厂。
4. 火力发电技术发展的主要方向:①发展高参数、大容量的火电机组,以提高效率、降低发电成本;②加快高效除尘成套设备、烟气脱硫、脱硝技术的开发;③消化吸收国外先进发电技术,推动洁净煤发电示范工程的发展;④大力开发以大型燃气轮机为核心的联合循环发电技术。

发电厂的热经济性

内 容 提 要

本章主要分析了凝汽式发电厂生产过程中存在的各种热损失及其对应的热效率，介绍了衡量发电厂热经济性的主要指标，讨论了提高发电厂热经济性的主要途径。

第一节 凝汽式发电厂的各种热损失和效率

学习目的

掌握热力发电厂基本热力循环的组成；掌握凝汽式发电厂中存在的热损失及对应的热效率；掌握凝汽式发电厂总效率的计算方法；深刻理解纯凝汽式发电厂热效率低的原因及提高其热经济性的主要途径。

学习内容

一、朗肯循环在发电厂中的应用

在以水蒸气为工质、以汽轮机为原动机的热力发电厂中，热能转化为机械能的过程是由蒸汽动力循环来实现的。朗肯循环是热力发电厂中最基本的蒸汽动力循环，按朗肯循环工作的发电厂称为纯凝汽式发电厂。现代发电厂中实际采用的复杂热力循环，都是在朗肯循环的基础上加以改进和完善得到的。

链 接

“基本”：在此可理解为是“根本”或“主要”的意思。

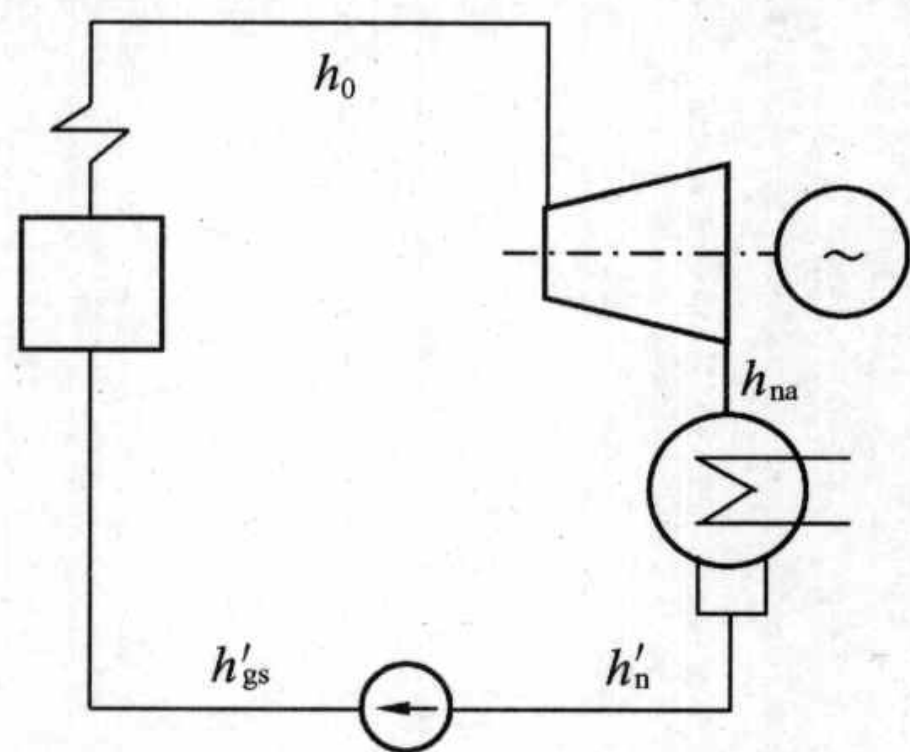


图 1-1 朗肯循环的热力系统图

朗肯循环的热力系统图如图 1-1 所示。由热工学知识知，朗肯循环由四个热力过程组成：水在锅炉中定压吸热，被加热成一定参数的过热蒸汽；过热蒸汽在汽轮机中绝热膨胀做功；汽轮机排汽（乏汽）在凝汽器中定压放热，凝结成水；凝结水在水泵中被绝热压缩，送回锅炉。

动力循环热经济性的高低用循环热效率 η_t 来反映，它等于 1kg 工质在循环中所做的净功 W_t 与循环吸热量 q_0 之比。则朗肯循环的热效率为

$$\eta_t = \frac{W_t}{q_0} = \frac{(h_0 - h_{na}) - (h'_{gs} - h'_n)}{h_0 - h'_{gs}} = \frac{(h_0 - h_{na}) - \Delta h'_{gs}}{h_0 - h'_{gs}}$$

当蒸汽初压力低于 10MPa 时，水在水泵中的焓升 $\Delta h'_{gs}$ 可以忽略不计，即 $\Delta h'_{gs} = h'_{gs} - h'_n = 0$ ，于是朗肯循环的热效率可以简化为

$$\eta_t = \frac{h_0 - h_{na}}{h_0 - h'_n}$$

当蒸汽初压力在 10MPa 以上时, 水在水泵中的焓升 $\Delta h'_{gs}$ 不能忽略, 其计算公式为

$$\Delta h'_{gs} = \frac{1}{\eta'_{gs}} (p_{gs} - p'_{gs}) v_{gs}$$

式中 η'_{gs} ——不计容积损失的水泵效率, 一般在 0.8~0.85 之间;

p_{gs} 、 p'_{gs} ——水泵出口和入口水的压力, Pa;

v_{gs} ——水泵中水的平均比容, m^3/kg 。

朗肯循环热效率的数值约为 40%~45%, 它反映了热力循环中冷源损失的大小, 由热工学知识知, 这部分损失是在热功转换过程中必然存在的, 在理论上不可消除的, 所以又称为固有冷源损失。

二、凝汽式发电厂能量转换过程中的各种热损失及其热效率

发电厂生产的根本目的是产生电能, 所以在发电厂生产过程中, 最终不能转换为电能的那部分能量, 就是发电厂中的热损失, 在凝汽式发电厂中, 除固有冷源损失外, 整个能量转换过程的不同阶段还存在着产生原因不同、数量大小不等的其他

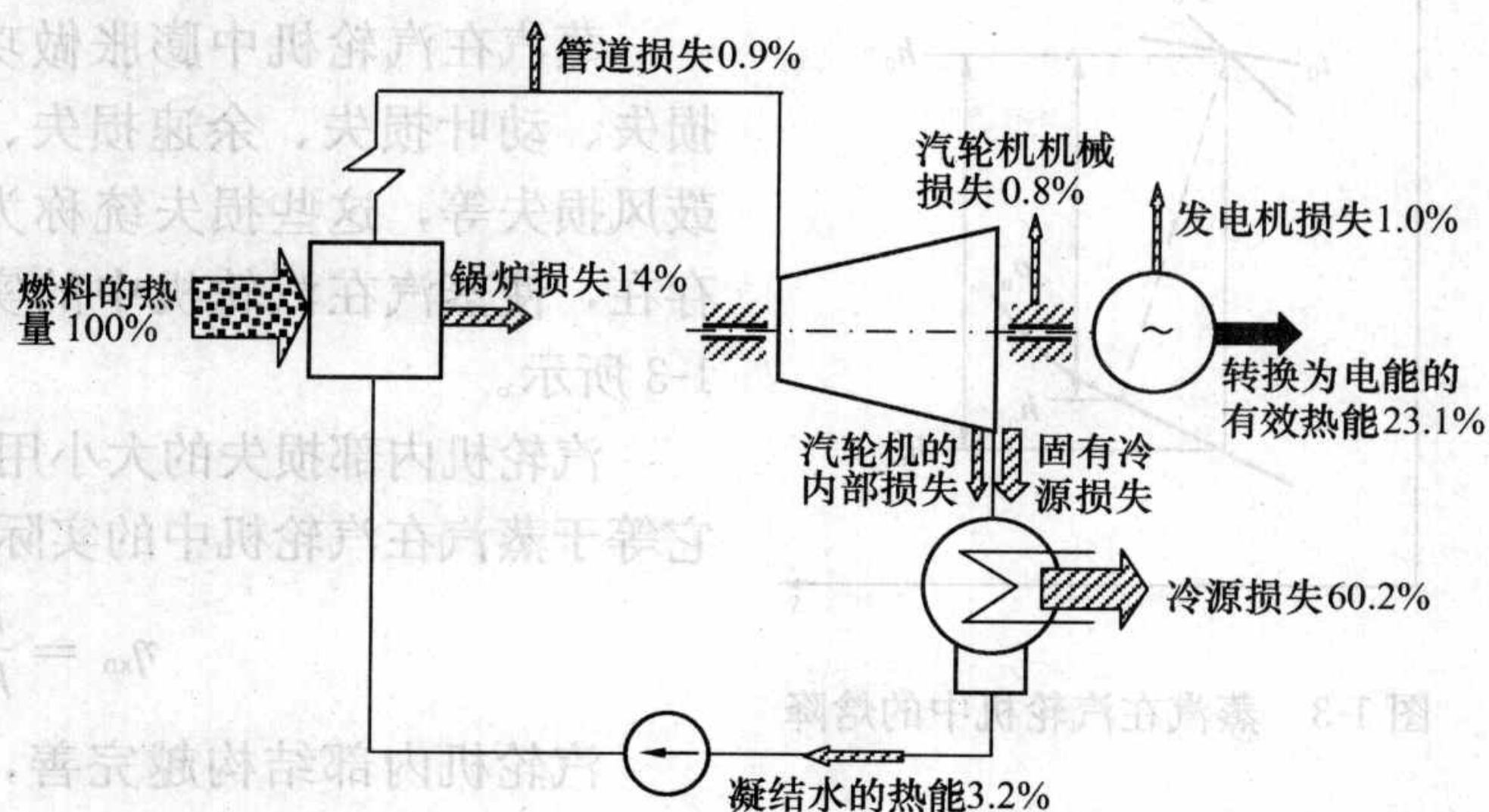


图 1-2 纯凝汽式发电厂中的热损失分布

热损失, 图 1-2 所示为某纯凝汽式发电厂中的热损失分布。热损失的大小一般用相应的热效率来表示, 在某环节中有效利用的能量与输入该环节的总能量之比, 即为该环节的热效率。

1. 锅炉损失和锅炉效率

在锅炉内的燃料燃烧、热量传递等过程中, 主要存在排烟热损失、散热损失、化学不完全燃烧热损失、机械不完全燃烧热损失、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%。

锅炉损失的大小用锅炉效率 η_{gl} 来表示, 它等于锅炉的热负荷与输入燃料的热量之比, 即

$$\eta_{gl} = \frac{D_{gr}(h_{gr} - h'_{gs})}{B_d Q_{dw}}$$

式中 D_{gr} ——锅炉的过热蒸汽流量, kg/h;

h_{gr} ——锅炉的过热蒸汽焓, kJ/kg;

B_d ——锅炉每小时的燃料消耗量, kg/h;

Q_{dw} ——燃料的低位发热值, kJ/kg。

锅炉效率反映了锅炉中能量利用的完善程度, 影响锅炉效率的因素有很多, 如锅炉的参数、容量、结构特性、燃料种类及燃烧方式等。大、中型锅炉的效率一般在 85%~94% 的范围内。

2. 管道损失和管道效率

锅炉产生的过热蒸汽通过主蒸汽管道进入汽轮机，做功后的蒸汽在凝汽器中凝结成的水经主凝结水管道和给水管重新回到锅炉。工质流过这些汽水管时，由于汽水泄漏和管道散热，不可避免地会产生热量损失，这部分损失称为管道损失。显然，管道系统的严密性和保温程度愈好，管道损失就愈小。

管道损失的大小用管道效率 η_{gd} 来表示，它等于汽轮机组的热耗量与锅炉热负荷之比，即

$$\eta_{gd} = \frac{h_0 - h'_{gs}}{h_{gr} - h'_{gs}}$$

若不计汽水损失，管道效率的数值一般为 99%；若计汽水损失，其数值一般为 96%~98%。

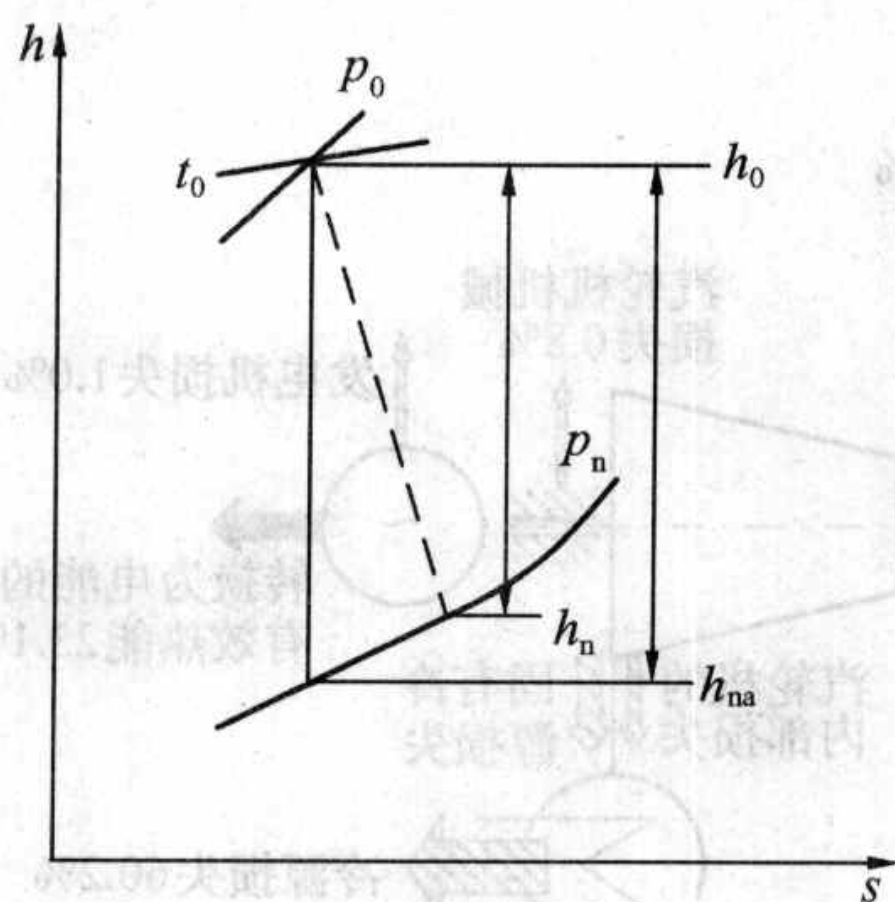


图 1-3 蒸汽在汽轮机中的焓降

3. 汽轮机内部损失和汽轮机相对内效率

蒸汽在汽轮机中膨胀做功时，存在着节流损失、喷嘴损失、动叶损失、余速损失、湿汽损失、漏汽损失、摩擦鼓风损失等，这些损失统称为汽轮机内部损失。该损失的存在，使蒸汽在汽轮机中的实际焓降小于理想焓降，如图 1-3 所示。

汽轮机内部损失的大小用汽轮机相对内效率 η_{xi} 来表示，它等于蒸汽在汽轮机中的实际焓降与理想焓降之比，即

$$\eta_{xi} = \frac{h_0 - h_n}{h_0 - h_{na}}$$

汽轮机内部结构越完善，汽轮机相对内效率越高，其数值一般为 78%~85%。

汽轮机内部损失的能量，最后随排汽进入凝汽器，使凝汽器中的热损失在固有冷源损失的基础上又增加了一部分，所以汽轮机内部损失又称为附加冷源损失。固有冷源损失和附加冷源损失统称为冷源损失，其大小用汽轮机绝对内效率 η_{jn} 来表示。汽轮机绝对内效率 η_{jn} 为循环热效率 η_t 与汽轮机相对内效率 η_{xi} 的乘积，即

$$\eta_{jn} = \eta_t \eta_{xi} = \frac{h_0 - h_{na}}{h_0 - h'_n} \frac{h_0 - h_n}{h_0 - h_{na}} = \frac{h_0 - h_n}{h_0 - h'_n}$$

由上式可以看出，汽轮机绝对内效率等于 1kg 工质在汽轮机中实际做的功与循环吸热量之比。

4. 汽轮机机械损失和汽轮机机械效率

汽轮机机械损失包括汽轮机支持轴承与轴之间的机械摩擦损失、推力轴承与推力盘之间的机械摩擦损失、汽轮机调节系统和油系统的能量损失等。汽轮机机械损失的存在，使汽轮机实际输出的有效功率小于汽轮机的内功率。

汽轮机机械损失的大小用汽轮机机械效率 η_j 来表示，它等于汽轮机实际输出的有效功率 P_{yx} 与其内功率 P_n 之比，即

$$\eta_j = \frac{P_{yx}}{P_n}$$

汽轮机机械效率反映了汽轮机机械部分的完善程度，其数值一般为 98%~99%。

5. 发电机损失和发电机效率

发电机损失包括发电机机械方面的摩擦损失、通风损失和电气方面的铁损、铜损等，其

大小用发电机效率 η_d 来表示。发电机效率等于发电机输出的电功率 P_d 与汽轮机输出的有效功率 P_{yx} 之比, 即

$$\eta_d = \frac{P_d}{P_{yx}}$$

发电机效率随发电机的冷却方式和冷却介质的不同而有一些差异, 其数值一般为 96%~99%(双水内冷)、97%~98%(空冷)、98%~99%(氢冷)。

三、凝汽式发电厂总效率

凝汽式发电厂的总效率 η_{ndc} 可以有以下两种计算方法:

其一, 将发电厂的整个生产过程看作由锅炉设备、热力管道、汽轮机设备、发电机等环节组成, 如图 1-4 所示, 则其总效率应为上述各个环节热效率的乘积, 即

$$\eta_{ndc} = \eta_{gl} \eta_{gd} \eta_t \eta_{xn} \eta_j \eta_d = \eta_{gl} \eta_{gd} \eta_{jn} \eta_j \eta_d$$

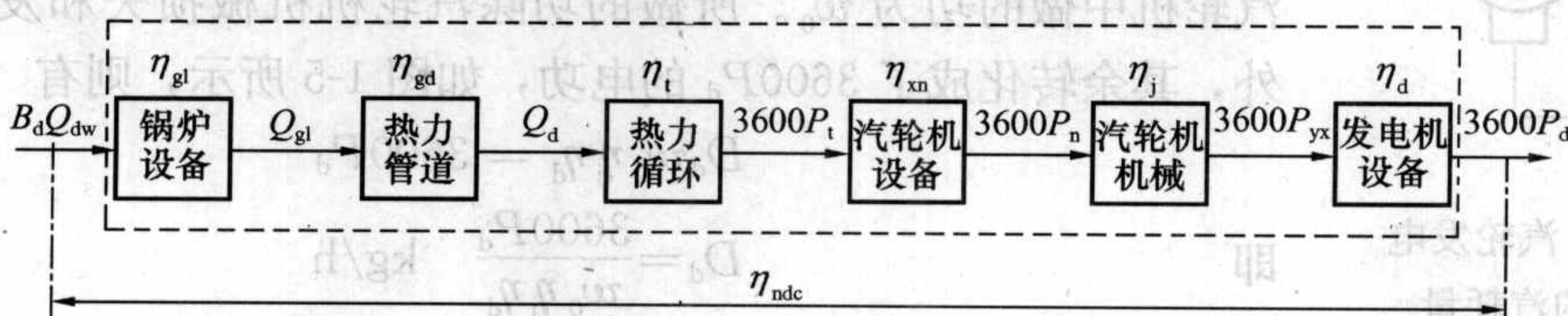


图 1-4 推导凝汽式发电厂总效率的两种方法

其二, 将发电厂的整个生产过程看作一个环节, 如图 1-4 虚线框所示, 则其总效率应为在该环节有效利用的能量与输入的总能量之比, 即

$$\eta_{ndc} = \frac{3600 P_d}{B_d Q_{dw}}$$

由具体计算结果和图 1-2 中标注的数值可知, 纯凝汽式发电厂中对燃料热能的有效利用程度(总效率)是相当低的, 其主要原因是冷源损失太大, 所以, 要提高发电厂总效率, 主要是设法减小冷源损失。本章第三节讲述的合理选用蒸汽参数和改善热力循环形式, 就是通过减小冷源损失来提高发电厂的热经济性的。

巩固复习题

1. 热力发电厂的基本循环是什么循环? 它由哪几个热力过程组成?
2. 写出朗肯循环热效率的计算公式, 其中水泵的焓升如何考虑?
3. 凝汽式发电厂主要存在哪些热损失? 其大小分别用什么热效率来表示? 其中哪项热损失最大?
4. 凝汽式发电厂的总效率有哪两种计算方法? 分别写出其计算公式。
5. 凝汽式发电厂热效率低的主要原因是什么?

第二节 凝汽式发电厂的主要经济指标

学习目的

掌握发电厂各主要热经济指标的概念, 了解其计算方法。