



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

PUTONG GAODENG JIAOYU SHIERWU GUIHUA JIAOCAI GAOZHI GAOZHUAN JIAOYU

# 热力发电厂

RELI FADIANCHANG

汪卫东 主编 ●

石平 赵玉莲 副主编 ●



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）  
职业教育电力技术类专业教学用书

# 热力发电厂

RELI FADIANCHANG

主 编 汪卫东

副主编 石 平 赵玉莲

编 写 江文贱

主 审 叶 涛



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。

本书主要以大型机组为例，紧密联系现场实际，以培养学生的职业能力为目的，系统地阐述了热力发电厂热经济性的评价方法、热力发电厂的蒸汽参数及其循环、给水回热加热器、给水除氧系统、发电厂的汽水辅助系统、热电厂的经济性及供热、发电厂原则性热力系统、发电厂全面性热力系统、发电厂的汽水管道路、发电厂热力设备的经济运行等，同时，注重新知识、新技术在现场的应用。为了加深学生对所学知识的理解，各章附有复习思考题。

本书可作为高职高专院校热能动力工程专业和火电厂集控运行专业热力发电厂主干专业课程的教材，也可作为高等院校成人教育及函授的相应专业教材，并可供有关专业工程技术人员参考。

### 图书在版编目（CIP）数据

热力发电厂/汪卫东主编. —北京：中国电力出版社，2012.3  
普通高等教育“十二五”规划教材·高职高专教育  
ISBN 978-7-5123-2833-4

I. ①热… II. ①汪… III. ①热电厂—高等职业教育—教材 IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 047673 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>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2012 年 7 月第一版 2012 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 280 千字 2 插页

定价 25.00 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，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

## 编 委 会

主任委员 章国顺 付小平

副主任委员 杜中庆

编写顾问 胡念苏

委 员 (以姓氏笔画为序)

王赛闽 石 平 孙大耿 付爱彬 冯家强

江文贱 余素珍 李 庆 李如秀 杨 虹

杨小君 汪卫东 沈 赫 陈家瑁 苗 军

柯选玉 胡青春 赵玉莲 饶金华 徐艳萍

徐智华 崔艳华 黄建荣 程延武 谢亚清

谢利玲 蔡铎如 樊友平 魏蓄芳

# 前 言

本书注重理论与实践相结合,以解决生产过程中的实际问题为基础,以培养职业技能为核心,在编写过程中既注意内容的科学性、系统性和实用性,又考虑到高职学生的基础现状,尽量避免复杂的概念与烦琐的数学推导和计算。

本书由江西电力职业技术学院汪卫东主编,石平、赵玉莲副主编,江文贱、刘聪、刘媛参编,汪卫东负责全书的统稿工作。其中,汪卫东编写绪论、第九章,石平编写第一、二章,刘媛编写第三章,赵玉莲编写第四、第五章,江文贱编写第六、七章,刘聪编写第八、十章。

本书由华中科技大学教授叶涛主审。审稿老师在审稿过程中提出了许多具有建设性的意见和建议,使编者受益匪浅。同时,本书在编写过程中,参考了有关兄弟院校、科研院所和企业的诸多文献和资料,在此一并表示由衷的感谢。

编 者

2012年5月

# 目 录

前言	
绪论	1
第一章 凝汽式发电厂的热经济性	5
第一节 热量法及其应用	5
第二节 做功能力分析法及其应用	10
第三节 纯凝汽式发电厂的主要热经济指标	17
思考题	19
第二章 影响发电厂热经济性的因素及提高热经济性的发展方向	20
第一节 蒸汽参数对发电厂热经济性的影响	21
第二节 再热循环对电厂经济性的影响	26
第三节 给水回热循环对电厂经济性的影响	29
第四节 热电联合能量生产	35
思考题	37
第三章 给水回热加热	39
第一节 回热加热器	39
第二节 回热系统的连接方式及热经济性	46
第三节 回热加热器的全面性热力系统及其运行	47
第四节 回热系统热力计算	48
思考题	51
第四章 给水除氧系统	52
第一节 给水除氧的任务及热力除氧原理	52
第二节 除氧器的类型和构造	55
第三节 除氧器的热力系统	61
第四节 除氧器的运行	66
思考题	68
第五章 发电厂汽水辅助系统	70
第一节 发电厂的汽水损失及其补充	70
第二节 发电厂的工质回收和废热利用系统	72
第三节 暖风器及其热力系统	75
思考题	76
第六章 热电厂的经济性及供热	77
第一节 热电联产及热负荷	77

第二节	热电厂的热经济指标 .....	82
第三节	热电厂的供热系统 .....	90
思考题	.....	93
<b>第七章</b>	<b>发电厂原则性热力系统 .....</b>	<b>94</b>
第一节	发电厂原则性热力系统的组成及应用 .....	94
第二节	原则性热力系统的拟定 .....	94
第三节	原则性热力系统举例 .....	99
第四节	原则性热力系统的计算 .....	106
思考题	.....	116
<b>第八章</b>	<b>发电厂全面性热力系统 .....</b>	<b>118</b>
第一节	概述 .....	118
第二节	主蒸汽与再热蒸汽管道系统 .....	120
第三节	旁路系统 .....	127
第四节	给水管道系统 .....	133
第五节	疏放水系统 .....	143
第六节	发电厂全面性热力系统举例 .....	148
思考题	.....	152
<b>第九章</b>	<b>发电厂的汽水管道 .....</b>	<b>153</b>
第一节	概述 .....	153
第二节	汽水管道的技术规范和材料 .....	153
第三节	汽水管道的选择和计算 .....	156
第四节	管道附件选择 .....	158
第五节	管道热应力和补偿 .....	161
思考题	.....	164
<b>第十章</b>	<b>发电厂热力设备的经济运行 .....</b>	<b>165</b>
第一节	安全可靠性管理 .....	165
第二节	电力负荷特性及工况系数 .....	168
第三节	热力设备并列运行负荷经济分配 .....	170
思考题	.....	177
<b>参考文献</b>	.....	<b>178</b>

## 绪 论

### 一、电力工业在国民经济中的地位

电力工业是国家的重要基础行业，它与国民经济的发展及国家的现代化进程有着密切的关系，直接影响着人民群众物质文化生活，是我国实现现代化、走向富裕的重要物质基础，也是实现工业自动化的重要保证之一。

实践表明，电力产业是一个供求刚性非常强的行业。由于电源建设周期长，电量产出难以调节，因此电力过剩和电力紧缺的局面交替出现。从我国电力史来看，过剩和紧缺从来都是紧密相连的。电力工业由于其特性决定了在工业中的地位必须是先行工业，其电力弹性系数（在一定的时期内，电力消费与国民生产总值年平均增长率之比）应大于1。我国1951~1980年的三个十年中，平均电力弹性系数为1.67，而1981~1990年期间只有0.71，严重的缺电现象制约了工业和经济的发展。国家财政部门从实际出发，自1999年开始，电力生产的增长速度又开始大幅回升，表0-1表示电力工业作为先行行业在国民经济中的重要作用。

表 0-1 1999~2010 年电力增长速度与 GDP 增长速度对比 %

项目	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
电力增长速度	6.5	11	7.7	15.1	15.4	12.8	13.3	14	14.4	11.9	10.8	10.6
GDP 增长速度	7.1	8	7.3	8	9.1	9.5	10.4	11.1	11.9	10.1	9.1	10.3

当然，工业现代化发展到一定程度之后，电力弹性系数会有所降低，但是应该大于1。电力企业走向国际市场，利用国际电力供求关系缓解国内电力供应的刚性冲撞，对我国的能源战略具有极其重要的意义。

### 二、我国电力工业的发展简况

旧中国电力工业规模小，技术水平落后。1949年全国解放时，全国发电设备装机容量只有1848.6MW，居世界第21位，年发电量4310GW·h，居世界第25位。发电设备完全靠国外进口，并且都是中小容量的低参数机组。电厂分布也不合理，90%以上集中在东北三省。运行水平低下，多数火力发电厂的发电标准煤耗率在1kg/(kW·h)以上。

改革开放以后，电力工业作为国民经济的第一基础产业，国家逐步形成了能源开发以电力为中心的发展战略，并通过实施“集资办电”政策和引进外资，有效解决了电力建设资金短缺的矛盾，使我国电力工业迅速发展。截至2009年末，我国总装机容量、发电量及用电量已分别增加到87407万kW、35965亿kW·h和36430亿kW·h。近年来，由于节能减排的压力和国家能源结构多元化的政策导向，水电、核电以及以风能为主的可再生能源发电投资规模持续快速增长，装机容量大幅度提高。但煤炭作为一次能源，在我国的能源消费结构中一直占有主导地位，并且随着煤炭气化、液化以及清洁技术的发展和成熟，能源优质化和污染排放的问题得到缓解。在我国电力生产结构中，火力发电的主体地位在当前及今后相当长一段时期内仍然难以动摇。从发电量来看，2009年全国6000kW及以上电厂火电发电



量为 29 867 亿 kW·h, 占全部发电量的 83%, 水电、风电、核电等占比还相对较小。与此同时, 火电结构进一步优化, 先后淘汰了一批小机组, 大容量、高效率的机组占总装机容量的比例不断提高, 单机容量 300、600MW 和 1000MW 的机组已成为电网的主力机组; 电网改造速度加快, 通过对城乡电网进行大规模建设和改造, 基本上形成 500kV 和 330kV 的骨干网架,  $\pm 500$ 、 $\pm 800$ kV 的直流输电和 1000kV 的交流输电已经开始应用, 大电网基本覆盖了全部城市和大部分农村。

水能是可再生的清洁能源, 我国水力资源丰富, 可开发的水能资源是 4.48 亿 kW, 年发电量为 2.47 万亿 kW·h, 按水电开发度达到 60% 计算, 每年可节约 30 亿 t 标准煤。以葛洲坝水电厂(装机 21 台, 总容量为 2715kW) 为代表的大、中型水力发电厂总装机容量到 2010 年达到了 1.9 亿 kW, 计划到 2020 年达到 3 亿 kW。其水电建设技术正大步迈向世界先进行列, 低于亚洲平均水电占总电力 34% 的水平。绝大多数水力发电站都是与综合性水利设施连接在一起的, 既能发电又能调节水利资源, 与航运、养殖、灌溉、防洪和旅游组成水资源综合利用体系。

在核能发电方面, 1984 年中国自行设计和建造的第一座实用型核电站(秦山核电站,  $30+2\times 60+2\times 72.8$ , 三期工程合计约 300 万 kW), 秦山核电站的建成结束了中国内地无核电的历史。随后, 大亚湾、岭澳、田湾等百万千瓦机组相继投运。随着核电的发展, 国产化率从大亚湾核电站的不足 1% 的到福清核电站的 75%, 自主创新能力的不断提高, 使我国的核电事业由“适度发展”转变为“积极推进”。

风能作为一种清洁的可再生能源, 越来越受到世界各国的重视。全球风能资源蕴藏量巨大, 总量约为  $2.74\times 10^9$  MW, 其中可利用的风能为  $2\times 10^7$  MW。中国风能储量很大、分布面广, 开发利用潜力巨大。“十五”期间, 中国的并网风电得到迅速发展。2006 年, 中国风电累计装机容量已经达到 2600MW, 成为继欧洲、美国 and 印度之后发展风力发电的主要市场之一。2007 年以来, 中国风电产业规模延续暴发式增长态势。2008 年, 中国新增风电装机容量达到 7190MW, 新增装机容量增长率达到 108%, 累计装机容量跃过 13 000MW 大关。内蒙古、新疆、辽宁、山东、广东等地风能资源丰富, 风电产业发展较快。2009 年, 中国在新能源领域的快速发展使得风力发电量达到了 25.8GW·h, 超过了德国的 25.77GW·h, 仅次于美国 35GW·h, 后者占据世界风力发电总量的 36%。尽管中国在新能源领域有了大规模的增长, 但风力发电量只占据中国电力消耗总量的 1%。

太阳能是人类取之不尽用之不竭的可再生能源, 具有充分的清洁性、绝对的安全性、相对的广泛性、确实的长寿命和免维护性、资源的充足性及潜在的经济性等优点, 在长期的能源战略中具有重要的地位。中国光伏发电使用量很少, 2007 年年底发电装机只有 10 万 kW。根据中国资源综合利用协会可再生能源专业委员会等机构共同发布的《中国光伏发展报告》预计, 如能得到稳定的政策支持, 到 2030 年, 中国太阳能光伏发电装机容量将达到 1 亿 kW, 年发电量将达到 1300 亿 kW·h, 相当于少建 30 多个大型火电厂, 不仅节约大量煤炭、石油等不可再生资源, 而且对节能减排、保护环境将起到重要作用。

目前, 电源结构以火电为主, 水电、核电、风电、太阳能发电所占比重较少, 电煤资源与运输之间的矛盾越来越突出, 煤炭、电源、电网市场存在着体制性的矛盾, 尽管发改委不断加大宏观调控的力度, 但到目前来看, 效果并不理想。客观上, 电力企业的垄断一直存在。“电力体制改革方案”也指出, 垄断经营的体制性缺陷日益明显, 改革的目标在于打破

垄断、引入竞争,提高效率,降低成本。从2002年至今,虽然国家电力公司进行了大规模的重组,也实施了形式上的网电分离、政企分开,但在引入竞争方面并未有很大改观。政府对固定资产投资的宏观调控刚性手段增加了电力市场不确定性,加上煤炭、电力不能同步完全实现市场化所带来的风险,使外资在经历过一段短暂的投资热潮之后,纷纷退出中国电力市场,而电力投资规模让民营企业望而却步。与此同时,当前电力行业发展中存在的“高投入、高消耗、高排放、难循环、低效率”问题还比较突出,我国电力装机容量和发电量已连续9年居世界第二位,与国外先进水平相比,国有电力企业在运营成本、工程造价、供电煤耗率等方面还存在明显差距,整个行业效率与世界先进水平还有较大差距。我国是一个煤炭资源相对丰富的国家,加上火电成本相对较低,在未来一定时间内,火电仍然占据主导地位。但由于火电对自然环境的污染以及出于优化能源结构的考虑,水电开发工作将成为未来一段时期内我国电力工作的重心,比例在目前的基础上还会有大的增加。核电因为关系到安全以及技术性要求高,在我国一直没有实现较大规模发展。在经历了日本福岛、美国三哩岛和前苏联切里诺贝利事件之后,核电进入了发展低谷期。随着技术的日臻完善以及自然能源的匮乏,核电正进入新一轮的发展。按照国家规划,到2020年,核电在我国电力结构中的比重将从目前的1%左右提高到5%,达到4000万kW的装机总容量。

到2020年,电力装机约达到10亿kW,预计6亿多千瓦为煤电。按1kW煤电每年耗3t原煤计算,一年约需要18亿t煤。这18亿t煤炭产生烟尘、二氧化硫、氮氧化物、二氧化碳以及废水、灰渣和其他有害物质如果处理不当,会对全球、区域、局部的大气、水体和生态环境质量造成重大影响。随着电力环境保护的领域、内容、阶段、范围不断扩大和加深,电力环境保护的领域由火电为主,逐步扩大到水电、输变电、甚至是新能源发电领域;内容也由污染物排放治理逐步发展到生态保护、水土保持、电磁污染防治、噪声强化控制等各个方面;阶段由前期与生产运行阶段延伸到宏观规划、项目论证、工程设计、施工建设、生产运行、退役处理的整个电力工业生命周期的全过程;范围由污染防治扩展到节能、节水、综合利用等清洁生产工艺方面,同时也深入到对二次污染的影响和治理,如火电厂脱硫废水等的治理;与此同时,水电建设对生态环境影响也不容忽视。因此,如何把握新时代背景下电力环保的新特点,面对新挑战,寻找并抓住新的机遇,是摆在电力企业面前的重要任务。在全世界日益重视环境保护的今天,电力工业的发展在注重经济效益的同时,也越来越重视社会效益。如:为了节约水资源,改变了传统的水力除灰,用气体输送代替;用冷却塔和闭式循环代替开式循环;为了节约土地占有,大力开发粉煤灰的综合利用。火力发电厂工业废水水量大,污水种类较多,水质差别较大,针对当前水资源严重短缺的状况,工业废水处理系统一般实行清污分流,对水质状况较好、污染程度较轻的废水,经过处理后作为工业水补水,实现回收利用,对水质状况较差、污染程度较重的废水,经过处理后,用作冲灰冲渣水,最大限度实现水资源的重复利用。随着电力工业的快速发展,电力环境保护也取得了重要进展。烟尘和废水基本实现达标排放,其总排放量逐年下降;通过采取关停纯凝式小火电机组、降低燃煤含硫量等措施,二氧化硫排放上升的趋势在1998年以后已经趋缓;新建机组的氮氧化物排放通过燃烧措施得到有效控制;粉煤灰的综合利用和废水回收率均达50%以上;水电环境保护和水土保持工作不断加强;输变电环境保护工作已逐步走向正轨。电力的环境保护工作为电力的可持续发展作出了重要贡献。

随着社会城市化的发展,城市的垃圾大量增加,垃圾发电为垃圾的处理提供了一个有效

的途径。垃圾发电是把各种垃圾收集后，进行分类处理。

### 三、热力发电厂的类型

根据热力发电厂的能源利用、能量供应的类型、热力原动机的种类、电厂总容量、蒸汽初参数、承担负荷和服务规模等情况，热力发电厂可分为不同的类型，见表 0-2。

表 0-2 热力发电厂的分类

分类方法	发电厂类型				
	化石燃料发电厂	原子能发电厂	地热发电厂	太阳能发电厂	垃圾发电厂
能源利用	化石燃料发电厂	原子能发电厂	地热发电厂	太阳能发电厂	垃圾发电厂
能量供应	供应电能的 凝汽式发电厂	供应电能、热能的 热电厂			
原动机 种类	汽轮机发电厂	燃气轮机发电厂	燃气—蒸汽 轮机发电厂		
电厂总 容量(MW)	小容量 100MW 以下	中容量 100~250MW	大容量 250~1000MW	特大容量 1000MW 以上	
汽轮机 进汽参数	$p_0=1.28\sim 8.8\text{MPa}$ $t_0=340\sim 535^\circ\text{C}$	$p_0=12.7\sim 13.2\text{MPa}$ $t_0=535\sim 540^\circ\text{C}$	$p_0=16.7\sim 17.8\text{MPa}$ $t_0=535\sim 540^\circ\text{C}$	$p_0=24.2\text{MPa}$ $t_0=538\sim 566^\circ\text{C}$	$p_0=24.2\sim 31\text{MPa}$ $t_0=566\sim 600^\circ\text{C}$
机炉配合	非单元机组发电厂	单元机组发电厂			
承担负荷	带基本负荷	带中间负荷	调峰		
服务规模	区域性发电厂	企业自备发电厂	列车电站	孤立发电厂	

### 四、对热力发电厂的基本要求

对发电厂的基本要求是：发电厂生产应力求安全可靠，努力提高经济效益，便于施工、维修和扩建，提高劳动生产率和自动化程度，切实搞好电厂的环境保护。

## 第一章 凝汽式发电厂的热经济性

电厂的经济效益评价,有热经济性、技术经济性和综合经济效益等不同的提法,这些提法在分析电厂经济性时起着不同的作用,分析的出发点和范围也不同。

发电厂的热经济性主要用来说明火力发电厂燃料利用程度,以及热力过程中各部分的能量利用情况。燃料费用占发电成本份额通常都在70%左右,直接影响到火电厂的发电成本、利润和燃料节约量。热经济性指标主要有汽轮发电机组热效率、电厂热效率、标准煤耗率等。火电厂的经济效益包含非常广泛的内容,一般用综合经济效益来说明,包括热经济性、安全可靠、投资、建设工期、物资消耗、人员配置等。由于热经济性代表了火力发电厂能量利用、热功转换技术的先进性和运行的经济性,故它是火电厂一切经济性的基础,也是本章讨论的内容之一。

对电厂热经济性的评价,可通过能量转换过程中能量的利用程度或损失大小来衡量。评价能量的利用程度,有两种观点:一种是能量数量的利用,另一种是能量质量的利用。这两种观点导致了评价方法的不一样,分别为以热力学第一定律为基础的热量法(效率法)和以热力学第一定律和第二定律为基础的做功能力分析法(熵分析法和焓分析法)。

### 第一节 热量法及其应用

热量法通常采用的传统评价方法,它是从现象看问题,以电厂消耗燃料产生热量被利用的程度来进行热经济性评价,只是单纯以能量的数量来衡量,没有考虑能量的品质问题。但是由于它直观、易于理解,计算方便、简捷,目前被世界各国广泛应用于定量计算。

评价火力发电厂实际循环,主要是分析和研究实际循环中各种热力设备或热力过程中的热量损失,这些热量损失在设备或热力过程中的分布情况及其对热经济性的影响,其实质是通过热量的利用程度(如热效率)或损失大小(如热量损失、热量损失率)来评价电厂和热力设备的热经济性。

在热量转换及传递过程中,热平衡式为

$$\text{输入热量} = \text{有效利用热量} + \text{损失热量}$$

热效率( $\eta$ )定义为某一热力循环中装置或设备有效利用的热量占所输入热量的百分数。其大小定量地表征了该设备或热力过程的热能转换效果,反映了设备的技术完善程度,其计算式为

$$\eta = \frac{\text{有效利用热量}}{\text{输入热量}} \times 100\%$$

在发电厂的生产过程中,每一个能量的传递环节和转换过程都不可避免地存在着能量的损失,图1-1所示为朗肯循环的热力系统和T-s图。下面以此为基础分析能量转换过程中的各种损失和效率。

#### 一、火电厂基本热力循环(朗肯循环)热效率

火电厂采用的基本热力循环为朗肯循环,热功转换都是在此循环基础上进行的。朗肯循

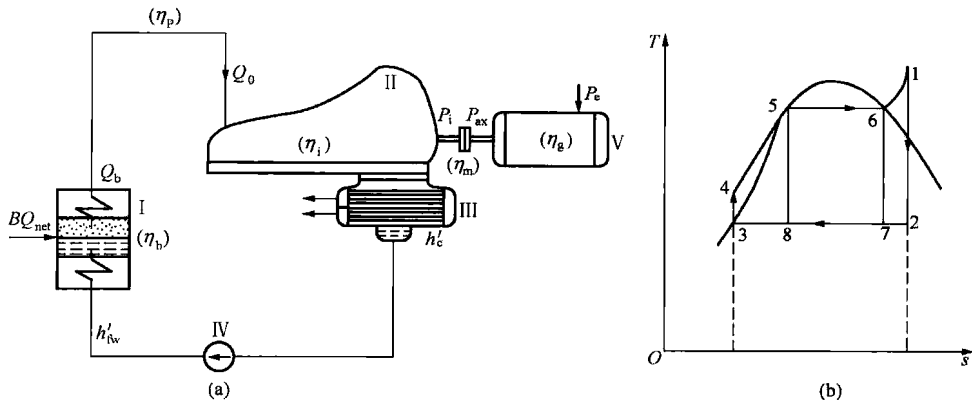


图 1-1 朗肯循环

(a) 朗肯循环热力系统示意图；(b) 朗肯循环的  $T-s$  图

I—锅炉；II—汽轮机；III—凝汽器；IV—凝结水泵；V—发电机

环也是最简单的蒸汽动力循环。由热力学知识可知，同温限理想循环以卡诺循环的热效率最高。卡诺循环是由两个定温过程及两个绝热过程组成的，见图 1-1 (b) 中 5-6-7-8-5。在电厂实际的蒸汽动力装置中不便采用卡诺循环，其主要原因是：首先，在压缩机中，绝热过程 8-5 难以实现，因状态 8 是湿饱和蒸汽，压缩过程中压缩机工作不稳定，同时，状态 8 的比体积比水的比体积大得多，需用比水泵大得多的压缩机，耗能很大；其次，循环局限于饱和区，上限温度受制于临界温度 ( $374^{\circ}\text{C}$ )，故即使实现卡诺循环，其热效率也不高；再次，蒸汽膨胀终了湿度过大，不利于热机安全。

朗肯循环组成如图 1-1 所示，燃料在炉膛中燃烧释放热量；经给水在锅炉受热面中定压吸热，成为饱和蒸汽；饱和蒸汽在过热器中定压吸热成为过热蒸汽，即过程 4-5-6-1。过热蒸汽在汽轮机内绝热膨胀做功，即过程 1-2。从汽轮机排出的做过功的乏汽在凝汽器内定压凝结，向冷却水放热，即过程 2-3，它既是定压过程，也是定温过程。凝汽器内压力为 4~5kPa，其相应的饱和温度为  $28.95\sim 32.88^{\circ}\text{C}$ ，仅稍高于环境温度。3-4 为凝结水经给水泵的绝热压缩过程，压力升高后的水再次进入锅炉进行循环。

朗肯循环的热效率  $\eta_t$  由前面热效率的定义可知，应为理想循环做功量与循环的吸热量之比，即

$$\eta_t = \frac{w_t}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{\bar{T}_{\text{av}2}}{\bar{T}_{\text{av}1}} \quad (1-1)$$

式中  $w_t$ ——理想循环做功量，kJ/kg；

$q_1$ ——理想循环吸热量，kJ/kg；

$q_2$ ——理想循环放热量，kJ/kg；

$\bar{T}_{\text{av}1}$ 、 $\bar{T}_{\text{av}2}$ ——理想循环的平均吸热、放热温度，K。

$w_t$  一般采用式 (1-2) 进行计算：

$$w_t = (h_0 - h_{\text{ca}}) - (h'_{\text{fw}} - h'_c) \quad (1-2)$$

式中  $h_0$ ——新蒸汽进入汽轮机的初焓值，kJ/kg；

$h_{\text{ca}}$ ——蒸汽在汽轮机中等熵膨胀后的排汽焓值，kJ/kg；

$h'_{fw}$ ——锅炉给水焓值, kJ/kg;

$h'_c$ ——凝结水焓值, kJ/kg;

$h_0 - h_{ca}$ ——1kg 蒸汽在汽轮机中进行等熵膨胀所做的功, kJ/kg;

$h'_{fw} - h'_c$ ——1kg 凝结水通过给水泵时所消耗的功, kJ/kg。

因  $q_1 = h_0 - h'_{fw}$ , 故

$$\eta_t = \frac{(h_0 - h_{ca}) - (h'_{fw} - h'_c)}{h_0 - h'_{fw}} \quad (1-3)$$

由于水的压缩性很小, 当蒸汽初压力不高时 (一般情况下,  $p_0 < 10\text{MPa}$  时), 给水泵的耗功和给水在给水泵中的焓升可以忽略不计。此时, 式 (1-3) 可以简化为

$$\eta_t = \frac{h_0 - h_{ca}}{h_0 - h'_{fw}} \quad (1-4)$$

但当初压力很高时, 给水泵耗功约占汽轮机做功的 2%。粗略的计算中, 仍可将给水泵耗功忽略不计, 但在较精确的计算时, 即使初压力不高, 也不应忽略给水泵耗功。

可见, 理想循环的热效率反映了理想循环冷源损失的大小, 冷源损失越大, 循环效率也就越低。要想提高循环热效率, 就要降低冷源损失。目前的技术条件下, 朗肯循环的热效率为 40%~45%。

## 二、凝汽式发电厂的其他各项热损失和效率

热力发电厂实际生产过程的不可逆性, 使得能量转换和传递过程中存在着各种损失, 可用过程和设备的效率来表述其损失的大小。这些效率依次为锅炉效率、管道效率、汽轮机的绝对内效率、汽轮机的机械效率、发电机效率。

### 1. 锅炉设备的热损失与锅炉效率 $\eta_b$

发电厂的燃料在炉膛内燃烧, 使燃料的化学能转变为烟气的热量, 烟气流过锅炉各受热面, 又将热量传递给受热面管内的水和蒸汽。锅炉效率等于锅炉设备输出的被有效利用的热量 (锅炉的热负荷) 与输入燃料的热量 (燃料在锅炉中完全燃烧时的放热量) 之比。锅炉效率反映了锅炉设备能量传递过程中的各项热损失的大小。

对不计连续排污热损失的非再热锅炉, 锅炉效率的计算式为

$$\eta_b = \frac{Q_b}{Q_{cp}} = \frac{Q_b}{BQ_{net,p}} = \frac{D_b(h_b - h'_{fw})}{BQ_{net,p}} \quad (1-5)$$

式中  $Q_b$ ——锅炉的热负荷, kJ/h;

$Q_{cp}$ ——发电厂热耗量, kJ/h;

$B$ ——锅炉单位时间内的燃料消耗量, kg/h;

$D_b$ ——锅炉蒸发量, kg/h;

$Q_{net,p}$ ——燃料的低位发热量, kJ/kg;

$h_b$ ——锅炉过热器出口蒸汽焓值, kJ/kg。

锅炉效率越高, 说明在锅炉的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排烟热损失、散热损失、化学未完全燃烧热损失、机械未完全燃烧热损失、排污热损失、灰渣物理热损失等, 其中排烟热损失最大, 占锅炉总损失的 40%~50%。

影响锅炉效率的主要因素有锅炉的参数、容量、结构特性、燃料种类及性质、燃烧方式以及炉内的空气动力工况等。可通过热平衡试验来测定各项损失的大小, 现代大型电厂锅炉的效率一般为 90%~94%。

## 2. 管道热损失与管道效率 $\eta_p$

管道效率反映的是工质在流过主蒸汽管道、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。此外，蒸汽在主蒸汽管道中流动还有节流损失，而节流损失通常放在汽轮机的相对内效率中考虑。

管道效率等于汽轮机组热耗量与锅炉热负荷的比值，即

$$\eta_p = \frac{Q_0}{Q_b}$$

$$Q_0 = D_0(h_0 - h'_{fw})$$

$$Q_b = D_b(h_b - h'_{fw})$$

$$\eta_p = \frac{D_0(h_0 - h'_{fw})}{D_b(h_b - h'_{fw})}$$

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。

管道效率主要反映了主蒸汽管道保温的完善程度，保温完善程度越高，则其散热损失越小，管道效率也就越高；同时也反映了工质在主蒸汽管道上的泄漏和排放的大小，泄漏和排放损失越大，管道的损失就越大。一般情况下，现代发电厂的管道效率为98%~99%。

## 3. 汽轮机设备中的冷源损失与汽轮机的绝对内效率 $\eta_i$

蒸汽在汽轮机中实际膨胀做功的过程为不可逆的过程，因此除了理想冷源损失外，还存在着进汽节流、排汽及内部的各项损失，包括喷管损失、动叶损失、余速损失、湿汽损失、漏汽损失、鼓风摩擦损失等。这些损失造成蒸汽的做功量减少，使汽轮机的实际排汽焓  $h_c$  大于理想排汽焓  $h_{ca}$ ，导致增加一部分冷源损失  $(h_c - h_{ca})$ ，即附加冷源热损失。该损失的大小通过汽轮机的相对内效率反映。

汽轮机的相对内效率  $\eta_i$  是指蒸汽在汽轮机中的实际焓降与理想焓降的比值，即

$$\eta_i = \frac{P_i}{P_{ia}} = \frac{h_0 - h_c}{h_0 - h_{ca}}$$

式中  $P_i$ ——汽轮机的实际内功率，kW；

$P_{ia}$ ——汽轮机的理想内功率，kW。

汽轮机的相对内效率是衡量汽轮机中能量转换过程完善程度的指标。现代大型汽轮机的相对内效率为90%~92%。

汽轮机的绝对内效率  $\eta_i$ （又称实际循环热效率）是指汽轮机的实际内功率与汽轮机组的热耗量的比值，即

$$\eta_i = \frac{3600P_i}{Q_0} = \frac{D_0(h_0 - h_c)}{D_0(h_0 - h'_{fw})} = \frac{h_0 - h_c}{h_0 - h'_{fw}} = \eta_p \eta_i$$

式中 3600——电热当量，1kW·h的电相当于3600kJ的热量。

$\eta_i$  反映了机组实际冷源热损失的大小，现代大型汽轮机组的绝对内效率达到45%~47%。

## 4. 汽轮机的机械损失和机械效率 $\eta_m$

汽轮机的机械效率反映了汽轮机机械损失的大小，主要包括支持轴承、推力轴承与轴和推力盘之间的机械摩擦耗功，以及拖动主油泵和调速器系统的耗功。它使汽轮机输出的有效功率（轴端功率）总小于汽轮机内功率。

机械效率是指汽轮机输出给发电机轴端的功率与汽轮机内功率之比，其表达式为

$$\eta_m = \frac{P_{ax}}{P_i}$$

式中  $P_{ax}$ ——汽轮机的轴端功率，kW。

汽轮机的机械效率一般为 96.5%~99%。

#### 5. 发电机的能量损失及发电机效率 $\eta_g$

发电机的效率主要反映了发电机的损失，主要包括机械方面的轴承摩擦损失，通风耗功和发电机线圈和铁芯的铜损、铁损等。

发电机效率是指发电机输出的电功率与汽轮机输入的轴功率的比值，即

$$\eta_g = \frac{P_e}{P_{ax}}$$

式中  $P_e$ ——发电机输出的电功率，kW。

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

### 三、发电厂的总效率及热平衡

发电厂的总效率表示发电厂在整个能量转化过程中能量损失的大小，是指发电厂输出的电能与消耗能量的比值，即

$$\eta_{cp} = \frac{3600P_e}{BQ_{net,p}}$$

在确定了发电厂各设备或过程的效率后，很容易求得整个电厂实际循环的总效率。对凝汽式发电厂而言，整个热功转换过程的热量有效利用程度则可用发电厂实际循环的总效率  $\eta_{cp}$  表示，其计算表达式为各热力设备或过程效率的积，即

$$\eta_{cp} = \eta_b \eta_p \eta_i \eta_m \eta_g \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明，凝汽式发电厂的总效率取决于各设备的分效率，其中任一设备热经济性的改善，都可能使电厂热效率有所提高。因此，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。

若以锅炉生产 1kg 蒸汽需要消耗燃料的热量为基准进行计算，可得电厂能量平衡方程为

$$q'_{cp} = 3600W_e + q_{lb} + q_{lp} + q_{lc} + q_{lm} + q_{lg} = \frac{h_b - h'_{fw}}{\eta_b}$$

式中  $q'_{cp}$ ——锅炉每生产 1kg 蒸汽需要消耗的热量，kJ/kg；

$q_{lb}$ ——锅炉热损失，kJ/kg；

$q_{lp}$ ——管道热损失，kJ/kg；

$q_{lc}$ ——冷源损失，kJ/kg；

$q_{lm}$ ——汽轮机的机械损失，kJ/kg；

$q_{lg}$ ——发电机的能量损失，kJ/kg；

$W_e$ ——1kg 蒸汽的发电量，kW·h/kg。

表 1-1 列出了不同参数的凝汽式发电厂的各项损失。

以燃料供给的热量为基准，计算出电能及各项能量损失所占的百分数以后，便可绘制出发电厂的热流图。图 1-2 为一个超高压参数纯凝汽式电厂的热流图，其蒸汽初参数为 13MPa、535℃，终参数为 5kPa。图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。

表 1-1

火力发电厂的各项损失

%

项 目	电 厂 初 参 数			
	中参数	高参数	超高参数	超临界参数
锅炉热损失	11	10	9	8
管道热损失	1	1	0.5	0.5
汽轮机冷源热损失	61.5	57.5	52.5	50.5
汽轮机机械损失	1	0.5	0.5	0.5
发电机损失	1	0.5	0.5	0.5
总热损失	75.5	69.5	63	60
全厂效率	24.5	30.5	37	≥40

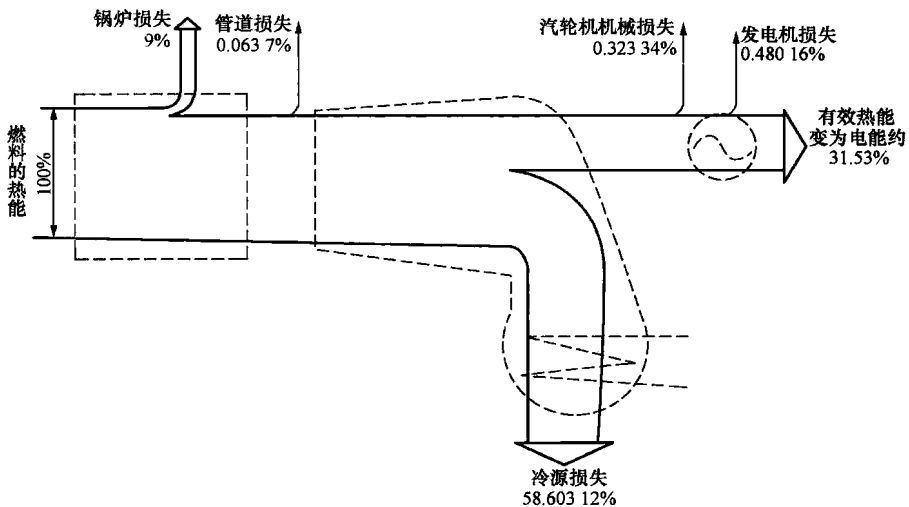


图 1-2 超高压参数纯凝汽式发电厂热流图

热量法从数量上揭示了能量利用的效果，它建立在自然界中能量守恒与转换定律基础上；从热力学范畴看，它是以热力学第一定律为基础的，其实质是能量在数量上的平衡，并未揭示出能量在品质上的差异。

## 第二节 做功能力分析法及其应用

由热力学第一定律和热力学第二定律可知，能量既具有量的守恒性又具有品质上的差异性，而这种差异性在能量传递、转换过程中体现为方向性、条件性及可能转换的程度上。例如，机械能或电能理论上可以全部转换为热能，但是绝对不可能实现全部逆向转换的。又如，热能本身可自发地从高温物体传给低温物体，却不能自发地反方向进行。比如同数量热能，当其状态参数不同，品质也不相同，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 1/3 左右，更明显的是处于环境条件下的大气介质，