

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



RELI FADIANCHANG

热力发电厂

(第二版)

叶涛 主编

Thermal Energy & Power



中国电力出版社

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

内 容 提 要

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 300、600MW 大型机组以及热力系统。内容有发电厂的热经济性分析方法,给水回热加热系统,热电厂的经济性及供热系统,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,发电厂的除尘及除灰系统,火电厂主厂房布置。书中附有典型计算例题及思考题。

本书为高等学校热能动力工程专业本科“热力发电厂”课程教材,同时兼顾专科学生的需要,也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/叶涛主编. —2 版. —北京:中国电力出版社, 2006. 8

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 7 - 5083 - 4554 - 1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 076843 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

*

2004 年 8 月第一版

2006 年 8 月第二版 2006 年 8 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.5 印张 451 千字 2 插页

印数 6001—10000 册 定价 29.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

本书注重使学生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相联系。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。

本书取材以300、600MW机组及热力系统为主,同时对国家提倡的环保和节能项目:燃气—蒸汽联合循环,燃煤的联合循环等给予一定的关注。

本书由华中科技大学叶涛主编,并分工编写绪论、第二、四章,华中科技大学冯慧雯分工编写第五、八章,南京工程学院陈爱萍分工编写第一、七章,山西大学冯跃武分工编写第三、六章。全书由西安交通大学武学素教授主审,武教授认真仔细的审阅和中肯的意见,我们获益匪浅,也使本书得以增辉,编者在此深表谢意。在编写过程中借鉴了各兄弟院校、锅炉制造厂、汽轮机制造厂、电力设计院和火力发电厂的宝贵经验和材料,作者谨向他们表示诚挚的谢意。

限于编者水平和编写时间短促,不妥和错误之处在所难免,祈使用本书的教师、同学和其他读者不吝指教,编者将不胜感谢!

编者

2006.06

目 录

前言

绪论	1
第一章 热电厂动力循环及其热经济性	4
第一节 热电厂热经济性的评价方法	4
第二节 凝汽式发电厂的主要热经济性指标	14
第三节 发电厂的动力循环	17
思考题	48
第二章 发电厂的回热加热系统	50
第一节 回热加热器的类型	50
第二节 表面式加热器及系统的热经济性	55
第三节 给水除氧及除氧器	63
第四节 除氧器的运行及其热经济性分析	69
第五节 汽轮机组原则性热力系统计算	77
思考题	89
第三章 热电厂的热经济性及其供热系统	90
第一节 热负荷及其载热质	90
第二节 热电联合生产及热电厂总热耗量的分配	95
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	98
第四节 热电厂的热化系数与供热式机组的选型	109
第五节 热电厂的供热系统	112
思考题	119
第四章 发电厂的热力系统	120
第一节 热力系统及主设备选择原则	120
第二节 发电厂的辅助热力系统	123
第三节 发电厂原则性热力系统举例	130
第四节 发电厂原则性热力系统的计算	139
第五节 发电厂的管道阀门	150
第六节 主蒸汽系统	160
第七节 中间再热机组的旁路系统	164
第八节 给水系统	172
第九节 回热全面性热力系统及运行	178
第十节 发电厂疏放水系统	188
第十一节 发电厂全面性热力系统	191
思考题	192

第五章 电厂中的泵和风机	194
第一节 概述	194
第二节 泵与风机的叶轮理论	201
第三节 泵与风机的性能曲线	209
第四节 相似理论在泵与风机中的应用	215
第五节 泵的汽蚀	221
第六节 泵与风机的运行	225
思考题	232
第六章 火电厂输煤系统及供水系统	233
第一节 火电厂输煤系统及煤场设备	233
第二节 火电厂的供水系统	245
思考题	256
第七章 火电厂的除尘和除灰系统	257
第一节 火电厂的除尘设备	257
第二节 火电厂的除灰系统	268
思考题	275
第八章 火电厂主厂房布置	276
第一节 概述	276
第二节 主厂房的布置类型及特点	277
第三节 主厂房内主要设备的布置	281
参考文献	288

绪 论

一、我国电力工业的发展与现状

在新中国成立之后的半个世纪中,中国的电力工业取得了迅速的发展,平均每年以10%以上的速度在增长,到2000年3月全国装机容量已达300GW以上,无论在装机容量还是发电量上都跃居世界第2位。特别是进入上个世纪90年代以来,我国电力平均每年新增装机容量超过17GW,使长期严重缺电的局面得到了基本缓解,国民经济和社会发展对电力的需求得到基本满足。

随着电力建设规模不断扩大,电力结构也在不断调整,国产火力发电机组容量不断扩大。现在,单机300MW及以上机组已成为运行中的主力机组。600MW、800MW和900MW机组已相继并网发电。单机50MW及以下的纯凝汽式小火电机组已得到有效控制。进入90年代,浙江秦山核电站和广东大亚湾核电站相继建成投入商业化运行,改变了长期以来中国无核电的局面。

但是,我们还应看到目前存在的几个问题,首先是全国发电设备平均年利用小时逐年下降,1998年火电设备已低至4811h。其次是我国人均用电水平低,到1999年,全国人均占有装机容量仅有0.24kW,人均用电量只有979kW·h,这一水平不到世界平均水平的1/2,居世界80位之后,大约是加拿大的1/20,美国的1/4,法国的1/8,全国至今还有几千万人没有用上电。1998年电能在终端能源消费中的比例为9.4%,远低于世界平均水平的17%;电煤消费占煤炭产量的比重为42.1%,也比发达国家70%~80%低得多;2003年1~11月供电标准煤耗率仍在378g/(kW·h),比世界先进国家高出60~70g/(kW·h)。设备相对落后,在200GW的火电机组中,绝大多数是亚临界压力和超高压机组,火电600MW及以上机组的比重较小,超临界压力机组凤毛麟角。线损率高2~3个百分点,环保问题突出。

这些问题反映了我国发电设备相对落后,运行状态和性能水平相对都比较低,电能生产、传输和使用过程中的浪费现象严重,电力企业管理水平仍不高,冗员沉重,电力市场化尚未完全形成,电力工业整体素质和效率不高,效益偏低。

这些问题的存在,既有发展中客观条件制约的因素,也有受投资体制、管理体制等主观认识制约的因素。随着改革开放的深入发展,我国电力工业的发展政策也有了根本性的转变——以集资办电为突破口,充分调动各方面办电的积极性。1979年以云南鲁布革水电站利用世界银行贷款为标志,打开了利用外资办电的大门,逐步形成了多种形式利用外资的格局。一方面弥补了中国电力建设资金的不足和发电设备的缺口;另一方面提高了电力工业的技术含量,电力工业也跨上了新的台阶。

1998年3月九届全国人大会议通过决议撤消电力部,完成政企分开的改革,国家电力公司按照商业化的要求开始运作,各省级电力公司也开始公司化运营。2002年12月29日中国电力新组建了11个集团公司,完成了厂网分开,竞价上网的布署,为电力工业完全市场化奠定了基础。

与此同时,法制环境也在逐渐完善。以《电力法》为龙头,《电力供应与使用条例》、

《电价管理办法》、《农业和农村用电管理办法》、《发电市场运营和监管条例》为骨架,以相关电力配套规章和地方性电力法规为补充的电力法规体系框架,保证了电力生产、建设和经营正常运作。进一步明确电力管理部门和电力企业的权力义务及电力公开、公平、公正调度的有关规定,为形成一个良好的依法管电、依法办电、依法用电的法制和市场秩序提供了保证。

二、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,包括超临界压力机组,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将逐步过渡到 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应能降至 $320\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 以下。超临界压力机组目前主要靠进口,但应加快国内开发、研制的步伐,逐步实现国产化和批量化,并提高其在火电机组中的比重。容量等级可从 600MW 起步,向 1000MW 级发展,机组参数可采用 24MPa、 $566^\circ\text{C}/566^\circ\text{C}$ 。国外超临界压力机组参数已达 30MPa、 $610^\circ\text{C}/610^\circ\text{C}$ 的水平,目标是 1000MW 等级。

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

在研究和总结国内外燃烧无烟煤的各种技术的基础上,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。环保的要求越来越严,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_2 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) 推动洁净煤发电的示范工程,在消化吸收国外技术的基础上,加快国产化的研制步伐,为逐步取代常规火电作技术准备。

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) 3 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 个百分点;环保性能更好,只是常规机组排放量的 $1/5\sim 1/10$ 。

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_2 、 NO_x 及粉尘排放都非常低,技术已基本成熟。我国准备在引进一套设备,建立示范电厂的同时引进部分技术,逐步实现国产化。

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种效益。

天然气产量的增加和减轻环保压力,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 $1260\sim 1300^\circ\text{C}$,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°C 时简单循环效率 $\geq 40\%$,联合循环效率可达 60% 以上。因此,美国最近 10 年新增装机容量 113GW 中燃机电站就占 44%。

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CO₂、SO₂的排放都具有重大的意义。

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) 按机组或火电厂容量等级分单机容量6MW及以下、全厂容量25MW及以下的小型发电厂，单机容量6~50MW、全厂容量25~250MW的中型发电厂，单机容量100MW及以上、全厂容量250MW及以上的大型发电厂。

(5) 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）电厂和超临界压力（23.54MPa）电厂。

(6) 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。

(7) 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）发电厂和调峰发电厂。

(8) 按机炉组合分为非单元机组发电厂和单元机组发电厂。

(9) 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 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) 锅炉设备的热损失与锅炉效率

锅炉设备中的热损失主要包括有排烟热损失,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 η_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

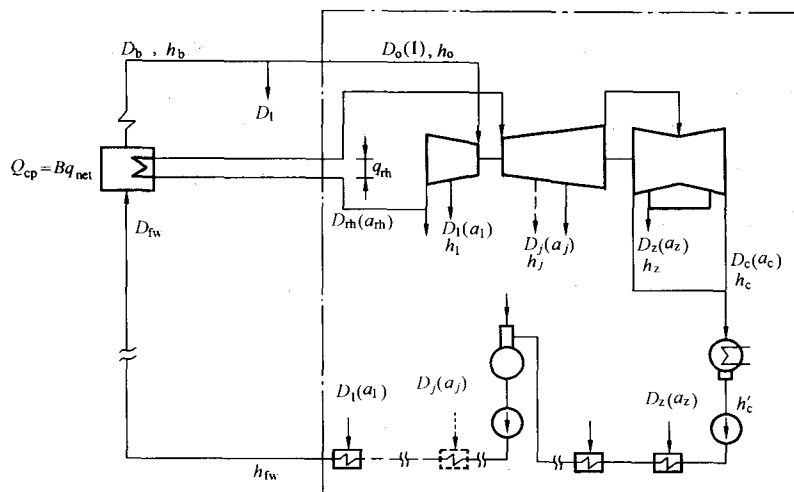


图 1-1 凝汽式发电厂热力系统图

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

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 $Q_b = D_b(h_b - h_{fw}) + D_m q_{rh}$;

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;

ΔQ_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。

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 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, ΔQ_p 为管道热损失。

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 η_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

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

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

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

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;

ΔQ_c ——汽轮机冷源热损失, kJ/h;

η_t ——循环的理想热效率;

η_{ri} ——汽轮机相对内效率。

汽轮机冷源热损失率 ζ_c 为

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

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

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

上式中: $w_i = \frac{W_i}{D_0}$; $q_0 = \frac{Q_0}{D_0}$; $\Delta q_c = \frac{\Delta Q_c}{D_0}$ 。

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 。 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, D_c 为全厂汽水损失量, kg/h; q_{rh} 为每 kg 再热蒸汽吸热量, kJ/kg; Δh_j 为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,则实际内功为

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

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

将式 (1-12) 代入式 (1-11), 整理得

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

从上面表达式 (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

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

式中 $\alpha_j = \frac{D_j}{D_0}$ 。

(3) 用反平衡法求 W_i

$$W_i = Q_0 - \Delta Q_c$$

2. 汽轮机汽耗为 D_0 时机组热耗 (循环吸热量)

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

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

1kg 新蒸汽的热耗 (比热耗)

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

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

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

比热耗 q_0 可写成

$$\begin{aligned} q_0 &= h_0 + \alpha_{th} q_{th} - h_{fw} \\ &= h_0 + \alpha_{th} q_{th} - (\alpha_c h'_c + \sum_1^z \alpha_j h_j) \\ &= \sum_1^z \alpha_j \Delta h_j + \alpha_c (h_0 - h'_c + q_{th}) \quad \text{kJ/kg} \end{aligned} \quad (1-19)$$

以上各式中

D_0 、 D_j 、 D_c 、 D_{fw} ——汽轮机新蒸汽、各级抽汽、排汽和锅炉给水的流量, kg/h;
 h_0 、 h_j 、 h_c 、 h_{fw} 、 h'_c ——新汽、抽汽、实际排汽、锅炉给水和凝结水的比焓, kJ/kg;

α_j 、 α_{th} 、 α_c ——汽轮机进汽为 1kg 时抽汽、再热蒸汽和凝汽的份额；
 D_{th} ——再热蒸汽量，kg/h；
 q_{th} ——1kg 再热蒸汽的吸热量，kJ/kg；
 Δq_c ——1kg 新蒸汽热功转换时的冷源热损失，kJ/kg。

3. 凝汽式汽轮机的绝对内效率 η_i

$$\begin{aligned}\eta_i &= \frac{W_i}{Q_0} = \frac{\sum_1^z D_j \Delta h_j + D_c \Delta h_c}{D_0(h_0 - h_{fw}) + D_{th} q_{th}} \\ &= \frac{\sum_1^z D_j \Delta h_j + D_c \Delta h_c}{\sum_1^z D_j \Delta h_j + D_c(h_0 - h'_c + q_{th})}\end{aligned}\quad (1-20)$$

用比内功和比热量来表示，则 η_i 的表达式为

$$\begin{aligned}\eta_i &= \frac{w_i}{q_0} = \frac{\sum_1^z \alpha_j \Delta h_j + \alpha_c \Delta h_c}{(h_0 - h_{fw}) + \alpha_{th} q_{th}} \\ &= \frac{\sum_1^z \alpha_j \Delta h_j + \alpha_c \Delta h_c}{\sum_1^z \alpha_j \Delta h_j + \alpha_c(h_0 - h'_c + q_{th})}\end{aligned}\quad (1-21)$$

表达式 (1-21)：若无再热蒸汽，则 $q_{th}=0$ ，即为回热循环汽轮机绝对内效率；若 $q_{th}=0$ ， $\sum \alpha_j=0$ ，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 0.45~0.47。

扣去给水泵消耗的功率 W_{pu} (kJ/h)，可得汽轮机的净内效率 η_i^n

$$\eta_i^n = \frac{W_i - W_{pu}}{Q_0}\quad (1-22)$$

(四) 汽轮机的机械损失及机械效率

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

$$\eta_m = \frac{3600P_{ax}}{W_i} = 1 - \frac{\Delta Q_m}{W_i}\quad (1-23)$$

式中 P_{ax} ——发电机输入功率，kW；

ΔQ_m ——机械损失，kJ/h。

汽轮机机械损失热损失率 ζ_m 为

$$\zeta_m = \frac{\Delta Q_m}{Q_{cp}} = \eta_b \eta_p \eta_i (1 - \eta_m)\quad (1-24)$$

汽轮机机械效率反映了汽轮机支持轴承、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、调速系统耗功量的大小。机械效率一般为 0.965~0.99。

(五) 发电机的能量损失及发电机效率

发电机的输出功率 P_e 与轴端输入功率 P_{ax} 之比称之为发电机效率 η_g ，其表达式为

$$\eta_g = \frac{P_e}{P_{ax}} = 1 - \frac{\Delta Q_g}{3600P_{ax}}\quad (1-25)$$

式中 ΔQ_g ——发电机损失, kJ/h。

发电机能量损失率 ζ_g 为

$$\zeta_g = \frac{\Delta Q_g}{Q_{cp}} = \eta_b \eta_p \eta \eta_m (1 - \eta_g) \quad (1-26)$$

发电机效率反映了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。

大中型发电机效率一般为 0.95~0.98。

(六) 全厂总能量损失及总效率

对整个发电厂的生产过程而言, 将上述各项损失综合考虑以后, 得出凝汽式发电厂的总效率 η_{cp} 的表达式为

$$\eta_{cp} = \eta_b \eta_p \eta \eta_m \eta_g \quad (1-27)$$

如以发电厂为研究对象, 全厂总效率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, 其表达式为

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

发电厂总能量损失率 ζ_{cp} 为

$$\zeta_{cp} = \frac{\Delta Q_j}{Q_{cp}} = \sum_{cp} \zeta_j \quad (1-29)$$

其中 $\Delta Q_j = \Delta Q_b + \Delta Q_p$
 $+ \Delta Q_c + \Delta Q_m + \Delta Q_g$ (1-30)

$$Q_{cp} = 3600P_e + \Delta Q_b + \Delta Q_p$$

$$+ \Delta Q_c + \Delta Q_m + \Delta Q_g \quad (1-31)$$

根据式(1-31)的计算结果, 可绘制相应的热流图, 图 1-2 为凝汽式发电厂的热流图, 该机组有三级回热抽汽。

发电厂的各项损失与发电厂的蒸汽参数和设备容量有关, 其数据如表 1-1 所示。

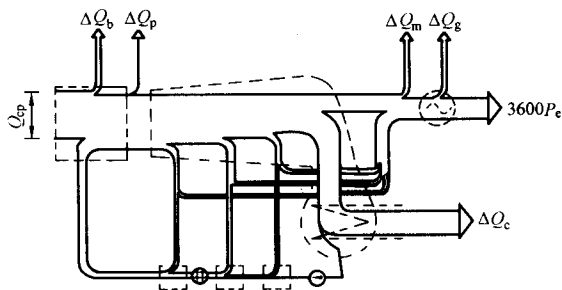


图 1-2 凝汽式电厂能量转换过程的热量利用和热量损失

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
汽轮机的机械损失	1	0.5	0.5	0.5
发电机损失	1	0.5	0.5	0.5
总能量损失	75.5	69.5	63	60
全厂效率	24.5	30.5	37	40

三、熵方法

熵方法以热力学第二定律为理论基础, 着重研究各种动力过程中做功能力的变化。实际的动力过程都是不可逆过程, 必然引起系统的熵增(熵产), 引起做功能力的损失。熵

方法通过熵产的计算来确定做功能力损失,并以此作为评价电厂热力设备热经济性的指标。

在温度为 T_{en} 的环境里,某一热力过程或设备中的熵产 Δs 引起的做功能力损失 I 为

$$I = T_{en} \Delta s \quad \text{kJ/kg} \quad (1-32)$$

热力发电厂的全部能量转换过程是由一系列不可逆过程组成,各设备或过程的做功能力损失之和即为发电厂的总损失,即总损失 I_{cp} 为

$$I_{cp} = \sum_{cp} I \quad \text{kJ/kg} \quad (1-33)$$

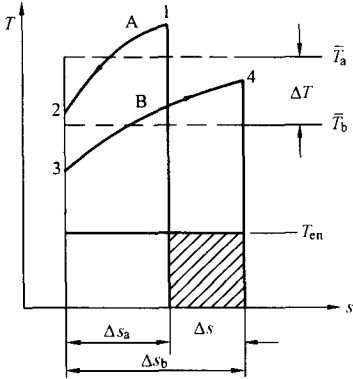


图 1-3 有温差换热过程的 $T-s$ 图

(一) 典型不可逆过程的做功能力损失

在发电厂能量转换的各种不可逆过程中,存在温差换热、工质节流及工质膨胀(或压缩)三种典型的不可逆过程。

1. 有温差换热过程的做功能力损失

如图 1-3 所示,工质 A 经过 1-2 过程被冷却,其平均放热温度为 \bar{T}_a ,放热量为 dq ,其熵减少了 Δs_a ;工质 B 经过 3-4 过程被加热,其平均吸热温度为 \bar{T}_b ,其熵增加了 Δs_b 。它们的平均换热温差为 ΔT 。

根据放热量与吸热量相等的能量平衡方法,有如下

关系:

$$dq = \bar{T}_a \Delta s_a = \bar{T}_b \Delta s_b \quad (1-34)$$

换热过程的熵增为

$$\Delta s = \Delta s_b - \Delta s_a = \frac{dq}{\bar{T}_b} - \frac{dq}{\bar{T}_a} = dq \frac{\Delta T}{\bar{T}_a \bar{T}_b} \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (1-35)$$

换热过程的做功能力损失见图 1-3 中阴影部分面积,其表达式为

$$I = T_{en} \Delta s = T_{en} \frac{\Delta T dq}{\bar{T}_a \bar{T}_b} = T_{en} \left(\frac{\Delta T}{\Delta T + \bar{T}_b} \right) \left(\frac{dq}{\bar{T}_b} \right) \quad \text{kJ/kg} \quad (1-36)$$

由式(1-36)可知:环境温度 T_{en} 一定时,换热温度差愈大,熵增和做功能力损失也愈大。 dq 愈大,因 ΔT 引起的做功能力损失也愈大。若 ΔT 一定,工质 B 的平均温度 \bar{T}_b 愈高,做功能力损失愈小,即高温换热的做功能力损失较低温换热时小。

2. 工质节流过程的做功能力损失

根据热力学第一定律可知

$$dq = dh - v dp \quad (1-37)$$

如图 1-4 所示,蒸汽在汽轮机进汽调节机构中的节流过程,节流前后工质焓不变,即 $dh=0$,即

$$ds = -\frac{v}{T} dp \quad (1-38)$$

节流过程的熵产 Δs_p

$$\Delta s_p = -\int_0^1 \frac{v}{T} dp = s_1 - s_0 \quad (1-39)$$

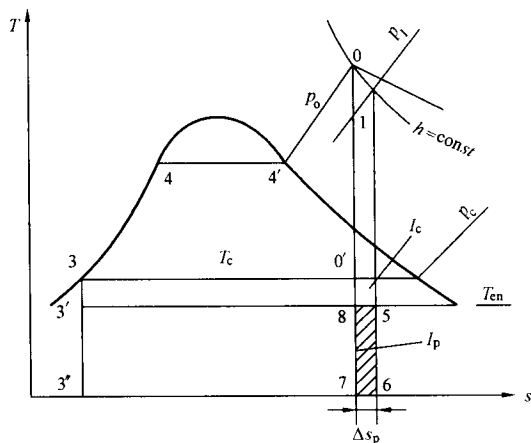


图 1-4 工质绝热节流过程 T-s 图

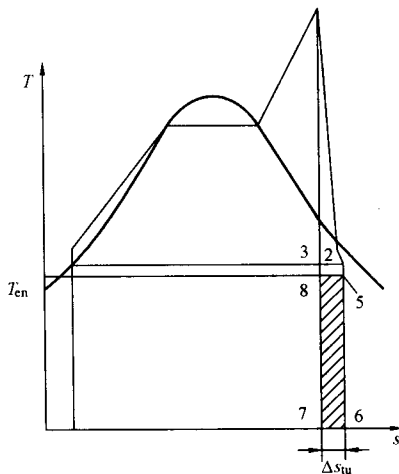


图 1-5 工质膨胀做功过程 T-s 图

做功能力损失见图 1-4 中阴影部分面积 5-6-7-8-5 所示，其表达式为

$$I_p = T_{en} \Delta s_p = -T_{en} \int_0^1 \frac{v}{T} dp = T_{en}(s_1 - s_0) \quad \text{kJ/kg} \quad (1-40)$$

式中 v 、 T ——工质的比容和温度， m^3/kg ， K ；

dp ——工质的压降， MPa 。

3. 工质膨胀做功（或压缩）过程的做功能力损失

蒸汽在汽轮机中不可逆热膨胀，水在水泵中被不可逆绝热压缩等都属于有摩擦的绝热过程，膨胀时其做功能力损失如图 1-5 中阴影部分面积 5-6-7-8-5 所示，其表达式为：

$$I_t = T_{en} \Delta s_{tu} = T_{en}(s_5 - s_8) \quad \text{kJ/kg} \quad (1-41)$$

(二) 凝汽式发电厂各种损失及全厂总效率 η_{cp}

1. 锅炉的做功能力损失

以燃料的化学能（生产 1kg 蒸汽需要燃料提供的热量） q' 为基准， T_g 为燃料燃烧时烟气的温度。锅炉设备的做功能力损失由三部分组成：①锅炉的散热引起的做功能力损失 I_b^I ，见图 1-6 中面积 6-7-3''-6''-6 面积；②化学能转变为热能引起的做功能力损失 I_b^{II} ，见图 1-6 中 3'-8'-8''-3''-3' 的面积；③工质温差传热引起的做功能力损失 I_b^{III} ，见图 1-6 中 8'-0'-0''-8''-8'。

(1) 锅炉的散热损失 Δq

$$\Delta q = q'(1 - \eta_b)$$

锅炉散热引起的做功能力损失 I_b^I

$$I_b^I = q'(1 - \eta_b) \quad \text{kJ/kg}$$

(2) 化学能转变为热能引起的熵产 Δs_b^{II}

$$\Delta s_b^{II} = \frac{q_0}{T_g} = \frac{h_0 - h'_3}{T_g} = s_{g'} - s_{3'} \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

化学能转变为热能引起的做功能力损失 I_b^{II}

$$I_b^{II} = T_{en} \Delta s_b^{II} = T_{en} \frac{q_0}{T_g} \quad \text{kJ/kg}$$

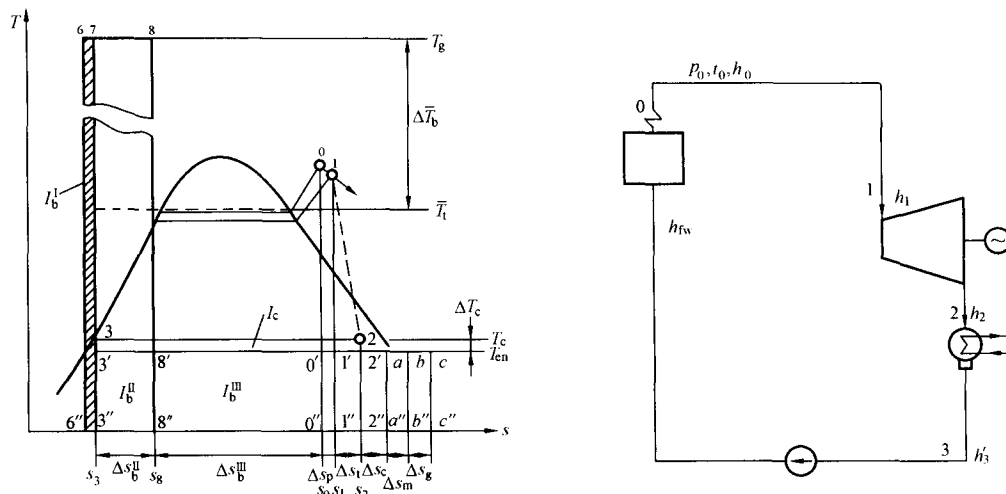


图 1-6 纯凝汽式发电厂热力系统图及做功能力损失分布图

(3) 工质温差传热引起的熵产 Δs_b^{II}

$$\Delta s_b^{\text{II}} = s_0 - s_3 - \frac{q_0}{T_g} = s_{0'} - s_{g'} \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

工质温差传热引起的做功能力损失 I_b^{II}

$$I_b^{\text{II}} = T_{\text{en}} \Delta s_b^{\text{II}} = T_{\text{en}} (s_{0'} - s_{g'})$$

锅炉中总的做功能力损失为

$$I_b = I_b^{\text{I}} + I_b^{\text{II}} + I_b^{\text{III}} \\ = (1 - \eta_b) q' + T_{\text{en}} (s_{3'} - s_{3'}) + T_{\text{en}} (s_{0'} - s_{g'}) \quad \text{kJ}/\text{kg} \quad (1-42)$$

2. 主蒸汽管道的做功能力损失

蒸汽流过主蒸汽管道时,既有沿程压力损失,又有沿程散热损失,因压损而引起的做功能力损失见图 1-6 中面积 $0'-1'-1''-0''-0'$,其表达式为

$$I_p = T_{\text{en}} (s_1 - s_0) = T_{\text{en}} \Delta s_p \quad \text{kJ}/\text{kg} \quad (1-43)$$

3. 汽轮机内部做功能力损失

汽轮机中由于蒸汽膨胀过程有摩阻使熵增加而产生的做功能力损失见图 1-6 中面积 $1'-2'-2''-1''-1'$,其表达式为

$$I_t = T_{\text{en}} (s_2 - s_1) = T_{\text{en}} \Delta s_t \quad \text{kJ}/\text{kg} \quad (1-44)$$

4. 凝汽器中的做功能力损失

$$I_c = (T_c - T_{\text{en}}) (s_2 - s_3) = T_{\text{en}} \Delta s_c \quad \text{kJ}/\text{kg} \quad (1-45)$$

5. 汽轮机的机械摩擦损失产生的做功能力损失

$$I_m = (h_1 - h_2) (1 - \eta_m) = T_{\text{en}} \Delta s_m \quad \text{kJ}/\text{kg} \quad (1-46)$$

6. 发电机的做功能力损失

$$I_g = (h_1 - h_2) (1 - \eta_g) \eta_m = T_{\text{en}} \Delta s_g \quad \text{kJ}/\text{kg} \quad (1-47)$$

7. 凝汽式发电厂的做功能力损失及全厂效率

每生产 1kg 蒸汽凝汽式发电厂做功能力损失