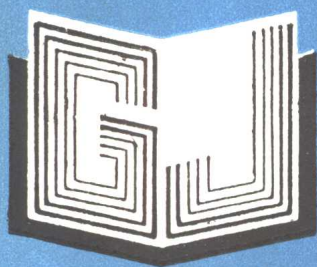


983131



高等学校教材

热 力 发 电 厂

重庆大学 郑体宽 主编



高等学校教材

热 力 发 电 厂

重庆大学 郑体宽 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书以国产大型火电机组为主,着重介绍其实际热功转换的基本原理,热力辅助设备及其系统的安全和经济分析方法,热力系统及其运行的基本知识。主要内容有:发电厂的经济性,给水回热加热系统,给水除氧系统,热电厂的经济性及供热系统,发电厂的原则性热力系统,发电厂的全面性热力系统和发电厂热力设备的安全经济运行。第二、四、五、七章均附有适当的计算例题。

本书为高等学校电厂热能动力工程专业“热力发电厂”课程的基本教材,也可供有关专业师生和工程技术人员参考。

高等学校教材

热 力 发 电 厂

重庆大学 郑体宽 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市京东印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 397 千字 3 插页

1995 年 8 月第一版 1995 年 8 月北京第一次印刷

印数 00001—12580 册

ISBN 7-120-02401-9/TK·358

定价 12.50 元

前 言

本书是根据能源部高等学校热能动力类专业教学委员会热力发电厂教学组制订的热力发电厂课程的基本要求,1989年在湖南大庸召开的热力发电厂教学组第二次扩大会议审定的教学大纲,以及1990年在杭州召开的热力发电厂教学组第三次扩大会议审议的教材编写大纲编写的。

全书共分七章,主要包括:发电厂的经济性,给水回热加热系统,给水除氧系统,热电厂的经济性及供热系统,发电厂的原则性热力系统,发电厂的全面性热力系统,发电厂热力设备的安全经济运行。

本书总结了1980年、1986年前两轮热力发电厂教材的实践经验,保留了原教材注重理论基础和第二轮热力发电厂教材的体系,不与热力学、汽轮机教材有关内容重复的特点;定性分析以熵方法为主,定量计算用常规法,论述时给学生留有适当思考余地,以培养学生智能;在第二、四、五、七章均配有适当的计算例题。鉴于另编有《热力发电厂习题集》,本书未附思考题和习题。取材以国产大型火电厂热力设备及其热力系统为主,适当介绍引进机组和国外资料。

全书由重庆大学郑体宽主编,并分工编写绪论、第四、六、七章;重庆大学常国蓉参编,并分工编写第一、二、三、五章。全书由东南大学汪孟乐主审。在编写过程中,承各兄弟院校、锅炉制造厂、汽轮机制造厂、电力设计院及有关火电厂同仁的大力支持,编者谨向他们表示深切的谢意。

限于编者水平,书中缺点和错误在所难免,请读者批评指正。

编 者

1992年10月

FA008/00

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 发电厂的经济性	5
第一节 发电厂经济性的基本概念	5
第二节 发电厂的热经济性评价	7
第三节 凝汽式发电厂的主要热经济指标	16
第四节 电厂(汽轮机)型式与蒸汽参数对发电厂经济性的影响	22
第二章 给水回热加热系统	51
第一节 热力系统的概念及分类	51
第二节 回热(机组)原则性热力系统分析	52
第三节 回热(机组)原则性热力系统计算	68
第四节 回热全面性热力系统	82
第三章 给水除氧系统	87
第一节 给水除氧的意义及方法	87
第二节 除氧器的原则性热力系统	94
第三节 除氧器的全面性热力系统	102
第四节 不设专用除氧器的热力系统	105
第四章 热电厂的经济性及供热系统	107
第一节 热负荷与载热质	107
第二节 热电联合生产	111
第三节 热电厂的主要热经济指标	118
第四节 热电厂的经济分析	126
第五节 热电厂的对外供热系统	134
第六节 热电厂的热经济指标和节煤量计算举例	143
第五章 发电厂的原则性热力系统	149
第一节 发电厂原则性热力系统的拟定	149
第二节 辅助热力系统	152
第三节 发电厂原则性热力系统举例	159
第四节 发电厂原则性热力系统计算	172
第六章 发电厂的全面性热力系统	195
第一节 管道、阀门和管道技术计算	195
第二节 主蒸汽系统	206
第三节 旁路系统	214
第四节 给水系统	224

第五节 全厂公用汽水系统	233
第六节 发电厂全面性热力系统举例	237
第七章 发电厂热力设备的安全经济运行.....	240
第一节 发电厂的安全管理与可靠性管理	240
第二节 大型火电机组的调峰运行	245
第三节 发电厂热力设备的经济运行	249
第四节 火电厂全厂特性曲线的编制和全厂经济调度	259
第五节 单元机组的运行	267
参考文献.....	274

绪 论

一、我国火力发电燃料资源

能源是社会发展的物质基础。自然界存在的煤、石油、天然气、水力、风力、地热、核能等均是人类借以获取动力和能量的来源，称之为天然能源。由于它们没有经过加工和转换，所以又称为一次能源。一次能源中，煤、石油、天然气、水力在近代社会发展进程中得到了较普遍的开发利用，统称为常规能源。由一次能源加工转换而获得的电能、热能（蒸汽、热水）、焦炭、煤气、各种石油制品、酒精、沼气等则统称二次能源，也叫人工能源。

我国能源资源丰富，是能源生产大国，也是能源消费大国。我国常规能源的储量及其消费量如表 0-1 所示。

表 0-1 我国常规能源的储量及其消费量

类别	能源资源		1949 年产量	1991 年产量	1989 年产量 世界名次	2000 年预计产量
	储 量	世界名次				
煤 炭	6425 亿 t	3	3200 万 t	10.64 亿 t (原煤)	1	14.6 亿 t (原煤)
石 油	600 亿 t	8	12 万 t	1.396 亿 t	6	1.7 亿 t
天然气	7000 亿 m ³	16	700 万 m ³	153 亿 m ³	20	300 亿 m ³
水 电	680GW	1	7 亿 kW·h	1230.90 亿 kW·h		3200 亿 kW·h

建国 40 余年来，我国火力发电量一直占总发电量的 80% 左右，水力发电量约占 20%。石油、天然气是宝贵的化工原料，也是重要的战略物资。所以，我国火电厂以燃煤为主（约占 85%），油或天然气仅作为燃煤电厂锅炉点火或低负荷助燃的燃料。

火电厂是全国三大耗能户之一。1989 年火电厂耗煤 20071 万 t 标准煤，耗油折合标准煤 1710 万 t，耗气 94.16 亿 m³，约为全国能源总产量的 20%。以 4×200MW 的火电厂为例，若燃用低位发热量为 4.1816×5000kJ/kg 的煤，则日耗煤量达 8000t，设备年利用小时数按 7000h 计，年耗煤量达 300 万 t，相当于一个大型矿井的年产量。若以载重 60t 的敞车运煤，每天就需三列各 50 节的运煤火车。此外，电厂还要有相当大面积的煤场供贮存一定的煤量。据统计，燃料费占火电厂总成本的 60%~80%。煤中灰分、含硫量对环保设施及其投资有决定性影响。总之，燃煤火电厂的煤源及其质量，对火电厂的安全、经济运行有很大关系。

目前我国燃煤电厂的燃料构成大体为：烟煤占 90%，无烟煤占 5%，褐煤占 4%，其他占 1%。为合理利用动力资源，火电厂应尽量燃用低质煤，将优质煤供化工、钢铁等部门用。但是燃用低质煤也是有一定条件的，主要是挥发分、灰分和低位发热量，均应有一定合适范围，否则不但没有经济效益，反而对安全发电不利。

二、我国火力发电工业的成就及其技术发展动向

建国 40 多年来,我国电力工业有很大的发展:到 1991 年建成 500kW 以上火电厂 2453 个,总容量 108.59GW,过去 90% 的电厂建于东北和沿海地区的布局也已发生重大变化;1991 年装机量突破 10000MW,是历史性的突破,在世界上也为数不多;火电机组由中参数 6MW 发展到亚临界参数 300MW、600MW 的大机组,到 1990 年为止,300MW 及以上机组 91 台,共 72330MW,已占发电容量的 52.5%;1000MW 以上的大型火电厂 15 个,目前全国最大火电厂是容量为 1625MW 的江苏谏壁发电厂;建成 1000MW 以上电网 13 个,其中东北、华北、华东、华中四电网的容量超过 20000MW;运行水平也有很大提高,解放前的供电标准煤耗率在 $1.130\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 以上,解放后不断降低,1991 年的全国供电标准煤耗率已降至 $0.424\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,现规定新装大机组的供电标准煤耗率不能超过 $0.330\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$;全国 2300 多个县已有 99.65% 的县,74.56% 的农户近六亿农民用上了电;解放前火力发电所用的主要设备完全依赖进口,目前全国的国产发电设备占全国发电设备总容量的 80%,现在已能勘测、设计总容量 2000~3000MW 火电厂,已能制造、施工单机容量 600MW 的大型火电机组,并能出口成套 210MW 火电设备,承包国外的电力工程。表 0-2 的几个数据,即能反映我国电力工业的成就。1992 年 5 月 23 日全国日发电量突破 20 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,相当于一个 500MW 电厂一年的发电量,或相当于 1949 年全年发电量的一半,为有史以来最高记录。1953~1980 年我国的电力弹性系数(电力消费的年平均增长率与国民经济总产值的年平均增长率之比)平均为 1.73。

表 0-2 我国 1949 年、1991 年、2000 年电力工业的几个数据

年份	装机容量 (MW)	世界名次	发电量 ($\text{GW}\cdot\text{h}$)	世界名次	年人均用电量 ($\text{kW}\cdot\text{h}$)	供电标准煤耗率 [$\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$]
1949	1848.6	21	4310	25	8	1.130
1991	150000	4	671600	4	422	0.424
2000*	220000~240000		13000		1000	0.380

* 2000 年数据为预测数据。

但是,我国幅员大,人口多,解放前的电力工业基础薄弱,与工业发达国家相比,以及按照至本世纪末工农业产值翻两番的要求来衡量,还有较大差距。人均能耗仅 0.7t 标准煤(全世界人均能耗为 2.3t,工业发达国家为 5.5t),人均发电量、用电量也处于世界落后地位。缺电严重,“四五”以后电力弹性系数开始小于 1 (“五五”为 0.99,“六五”为 0.96,“七五”为 0.91),目前约少装机 19GW,缺电 850 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,已成为发展国民经济的薄弱环节。火力发电设备制造和运行水平仍较低,供电标准煤耗率较国外同类机组高 60~100g/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。现有火力发电设备负荷过重,全年设备利用小时数是世界上最高的,潜伏着设备损坏的危险。机组可用率差,大型机组较国外的低 5%;大修周期仅两年左右,国外平均为 4~5 年。此外还存在电力工业内部的发、送、变电配套比例失调,自动化水平不高等问题。

我国能源资源虽然丰富,但人均资源占有量仅为世界平均数的 1/2,美国的 1/10。我

国的一次能源利用率仍较低,1989 年仅为 22.7% (1989 年总耗煤 9.69 亿 t 标煤,用于发电为 2.2 亿 t 标准煤),工业发达国家多在 40%以上,日本已高至 50%以上。国内同一工业产品的单位能耗也不平衡,有的竟相差将近一倍。国内外的情况对比说明我国在节能方面是大有潜力可挖的。至本世纪末,工农业总产值翻两番,按能源平衡估算需年产 24 亿 t 标准煤,但能源资源的开发要巨额资金,周期也较长,估计实际增长只能满足一半,这就更突出了节能任务的长期性、艰巨性。根据我国经济建设的需要和可能,我国的能源政策是“开发和节约并重,近期把节能放在优先地位”,而且节能是发展国民经济的一项长期战略任务。

能源开发要以电力为中心:①采用高效能大容量火电机组,以 300,600MW 亚临界和超临界参数的大机组为主力机组,以降低单位造价和煤耗率,提高劳动生产率。每个火电厂装 4 台或 6 台 300MW 或 600MW 机组。②推行火电环保技术。燃煤电厂产生的粉尘、SO_x、NO_x严重污染环境,若以预测的 2000 年火电厂耗原煤 4 亿 t,含硫量以 1%计,一年排放 SO_x达 800 万 t。火电厂防止污染的措施,应与主体工程同时设计、同时施工、同时投运。③积极发展坑口电厂,变运煤为输电,以减轻铁路运输压力(现在铁路运输量的 40%是煤),减轻对大城市的污染。已批准的伊敏煤电联营电厂为 2000MW,一期为 2×500MW,相应露天煤矿按年产 1000 万 t 设计。④发展发电用沸腾锅炉。国外现投运的沸腾炉为 100MW 级,400t/h,可发展为 250MW 级,即 800~900t/h。⑤推广热电联产和集中供热,以节能和改善环境。⑥适当发展核电,我国自行设计制造单机容量为 300MW 的秦山核电站、引进的单机容量 900MW 的大亚湾核电站均已先后投运。⑦提高自动化水平,200MW 及以上机组均将装设电子计算机进行监测和控制,主要实现数据采集与处理,CRT 屏幕显示,制表打印及事故追忆,性能计算,自动控制等。

节能既可缓和能源供需矛盾,又是改善环境,提高经济效益的有力措施。要大力节煤、节电、节油。火电厂节能的主要措施为:①实现电网统一调度,按全网经济上最合理要求调整电网出力,推行火电厂的经济运行,并保持供电质量。根据能源部颁布的《发电厂调峰技术和安全导则》,要提高火电机组的调峰能力,推行多种电价制,鼓励火电厂在电网高峰时多发电,用户在低谷时多用电。②现有约 20000MW 中低压机组,每年多耗 130 万 t 标准煤,有条件的应改为供热式机组,有的应予淘汰。③单机容量为 50,100,125,200MW 机组共约 80000MW 也要进行技术改造,以提高效率降低能耗。特别是要做好辅助设备和用电设备的技术改造或更新工作。④全国还有 40 万台小锅炉,一年烧 3 亿 t 煤,既浪费能源,又严重污染环境。有条件的要改为热电联产或集中供热。

资金短缺是我国经济建设中突出的问题之一,过去新建火电厂全靠国家拨款,一年仅能新建二、三百万千瓦装机容量。实行经济改革和开放政策后,打破独家办电的传统,调动了多方办电的积极性,1985 年创一年新增 5871MW 的历史记录,1987 年创一年投产 10000MW 的历史最高记录,其中有相当比重为集资办电。仅华能国际电力开发公司成立五年多来,集资建了 40 个电厂,装机容量共达 12000MW。

三、热力发电厂的类型及应满足的要求

热力发电厂可有多种不同的分类方法:按能源利用情况分化石燃料发电厂、原子能发

电厂、新能源（地热、太阳能等）发电厂等。按能量供应情况分只供电的凝汽式发电厂、热电联供的热电厂。按原动机类型分内燃机发电厂、汽轮机发电厂、燃气轮机发电厂、燃气-蒸汽联合装置发电厂。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。按进入汽轮机的蒸汽初参数分中低压（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。按电厂位置特点分：坑口（路口、港口）发电厂、负荷中心发电厂。按电厂承担电网负荷的性质分基本负荷发电厂、中间负荷（腰荷）发电厂、调峰发电厂。按机炉组合情况分非单元机组发电厂、单元机组发电厂。按服务范围分区域性发电厂、企业自备发电厂、移动式（如列车）发电厂、未并入电网的孤立发电厂。

对热力发电厂的基本要求是：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，运行电厂的煤耗、水耗、厂用电率要低，以节约能源；考虑技术的先进性和适用性，注意提高机械化、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；要便于施工，便于运行维护，便于扩建。

四、本课程的任务与作用

本课程以热力发电厂整体为对象，重点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，分析热力发电厂的经济效益，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。

通过本课程学习，培养学生树立安全、效益（经济效益、社会效益、环境效益）相统一的观点，以提高其分析、研究、解决热力发电厂课程业务范围内生产实际问题的独立工作能力。

* 机组容量、电厂容量等级的划分是一个发展变化的概念，根据我国情况，现阶段把容量 6MW 及以下的机组定为小机组，6~50MW 机组称为中型机组，100MW 及以上机组称为大型机组，相应地装机 25MW 及以下的为小型火电厂，装机 25~250MW 的为中型火电厂，装机 250MW 及以上的为大型火电厂。

第一章 发电厂的经济性

第一节 发电厂经济性的基本概念

一、发电厂的经济效益和社会效益

发电厂的经济效益和社会效益具有极重要的意义，这首先是由于火电厂是一次能源用能大户：估计到 2000 年，火电厂全年将耗原煤达 4 亿 t，提高火电厂热经济性（即减少能耗）就不仅是降低本身成本的需要，更是影响全国一次能源生产、运输和节约的大事。如 1990 年比 1980 年全国火电厂平均供电煤耗率下降 $19\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，就累计为国家节约了标准煤 5526 万 t。其次是由于火电厂是技术、资金密集性企业，需耗费大量的资金和钢材：我国火电厂平均造价，“七五”期间为：1746 元/kW（1985 年）和 3000 元/kW（1990 年）。对于资金短缺的我国这无疑是可观的。同时火电厂以投资少、建设快而优于水电和核电，必须在这方面发挥优势才能使火电更好地满足社会的需要。

1. 电力工业的社会效益。

电能是所有能源中最方便、最节约、最干净的能源，是现代社会的科技、生产发展和人民生活不可缺少的，所以，可以说电能是建设现代社会的物质基础。电气化程度（一次能源转换成电能的比重，终端能源消费中电能的比重等）已被视为一个国家工业化、现代化的重要标志。

由于电能的宏观经济效益远大于微观（电厂本身）经济效益，电厂的经济效益直接影响社会效益。据我国 1983 年资料统计，全国平均电价 6.7 分/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，而相应的工业平均产值为 2.8 元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，即使用电力的社会产值约 40 倍于生产电力（发电和供电）的自身。目前我国由于缺电，每年将减少财政收入数百亿元。我国的统计数字还表明，电厂停电造成的损失将 20~30 倍于供电成本。又如，缩短火电厂建设工期尽早发电，也会对国民经济有较大影响。以新建国产 200MW 机组为例，若将现在的平均工期 58.3 个月缩短成要求的 29 个月，一台 200MW 机组以每年发电 10 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 计，则可增加发电量 20 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，电费收入增加 1.36 亿元，国民经济产值增加 56 亿元，约为电费的 42.7 倍。

及时、充分（保质保量）地满足社会对电力的需求，是提高电力工业社会效益的可靠保证。

火电厂生产过程产生的污染物排放，对社会环境会造成不利影响，应控制在国家规定的排放标准内。

2. 发电厂的经济效益

评价发电厂经济效益时，会涉及到热经济性、经济性和综合经济效益等不同提法。它们在说明发电厂经济性时起着不同的作用，涉及到不同的范围。

热经济性用来说明火电厂燃料能量利用程度，以及热力过程中各部分的能量利用情况，

这些均直接影响到火电厂的发电成本、利润和燃料节约量，一般用热经济指标来表示。如电厂热效率，汽轮发电机组热效率，发 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电、供 1GJ 热所耗用的煤 $[\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h}), \text{kg}/\text{GJ}]$ ，热电厂全年的燃料节约量等。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评价的基础，也是本书重点讨论的内容之一。

火电厂的热经济性、安全可靠性和环境治理和工程资金投入的合理性，是通过所谓经济性来评价的。经济性是技术先进性和经济合理性的综合评价，故经济性又被称为技术经济性。发电厂的经济比较又被称为技术经济比较。

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予以说明。它包括热经济性、安全可靠性和投资、建设工期、土地占用、物资消耗、人员配置等。

火电厂的经济效益可通过一系列单项指标来评价。如总投资，单位容量投资（元/ kW ），年供电量，年利用小时数，全厂热效率，供、发电标煤耗率，全厂人员指标，土地占用（公顷），发、供电成本，贷款偿还年限，投资回收年限，投资利润率，资金利润率，资金利税率和内部收益率等。

二、发电厂的技术经济比较

为科学地寻求最佳经济效果，工程上普遍采用通过多个方案的技术经济比较的方法来进行选择。发电厂亦然。

1. 技术经济比较原则——方案的可比性

为正确进行比较，对比方案必须满足一定的条件——方案的可比条件。它们一般是：

（1）使用价值的可比：就进行能量生产的发电厂而言，它是指能量供应的种类（如电能，或电能与热能）、数量（电量、热量）和质量（如供热参数）的相等。如热电厂的全年燃料节约量，就是在热电厂与同一电网中先进凝汽式电厂供应相同电量、热电厂与地区分散或集中供热锅炉房供应相同参数、相同热量的条件下，进行比较计算出来的。

（2）消耗费用的可比：这是指消耗费用计算要全面，计算原则和方法要一致。如进行发电厂技术经济比较时，不仅要考虑电厂本身的直接费用，还要从全社会角度考虑与电厂直接相关的部门，如煤矿和交通运输建设所消耗的费用。

（3）时间因素的可比：方案比较时，应该考虑时间因素的影响。但技术经济指标中有静态指标（或计算）和动态指标（或计算）两类。不考虑资金的时间价值，也不考虑电厂或设备的整个寿命期所进行的经济效益计算，称静态计算或静态分析，广泛用于粗略比较。但详细比较时，必须对资金的时间价值等予以考虑，即在动态条件下计算各方案的经济效果。

另外还有价格指标的可比等。

2. 技术经济比较的基本方法

技术经济比较方法很多，主要有：专家评价法；经济论证法；综合评价法；系统分析法和不确定分析法几大类。它们各具特点，有专门课程予以讲述。以下仅以经济论证法为例，简单介绍技术经济比较的基本方法和思想。

经济论证法是通过一套技术经济指标的对比来指导选择或决策的。技术经济指标包括

静态和动态两种。

静态指标不考虑资金的时间价值和工程的整个寿命期，简单易算。如“投资回收年限”和“资金利税率”：

$$\text{投资回收年限} = \frac{\text{发电厂工程总投资} + \text{建设期发电工程贷款利息}}{\text{年发电利润} + \text{年发电税金} + \text{年发电厂折旧}} \text{ 年} \quad (1-1)$$

$$\text{资金利税率} = \frac{\text{年发电利润} + \text{年发电税金}}{\text{发电工程总投资} + \text{建设期贷款利息} + \text{生产流动资金}} \times 100\% \quad (1-2)$$

其中，“发电利润”主要决定于热经济性，因此这类指标实际上是热经济性高低、资金投入多少、建设期长短等的综合静态指标。

当用投资回收年限来比较不同方案时，首先看发电利润回收投资所需年限是否高于国家规定的年限 7 年，如高于，则根本不可取；其次，在不同方案中找到低于国家规定年限，且年限又是最短的可供选择方案。由于电厂技术经济比较是个极复杂的过程，只有经过多个指标和一些不能用指标表示的方面的综合权衡后才可作出最后的选择。

动态指标虽较静态指标复杂，但能较全面和准确地反映真实的经济效益。所以对于发电厂技术经济的比较，一般既有若干静态指标，也一定要有动态指标。常用的动态指标是“内部收益率”。内部收益率的计算公式是：

$$\sum_{t=t'}^{t=m+n} \frac{B_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^{t=m+n} \frac{C_t}{(1+i)^t} = 0 \quad (1-3)$$

式中 m ——建设期年数；

n ——投产后经济使用期年数（一般火电厂取 25 年）；

t ——工程开始开工算起的年数；

t' ——部分机组投产年数；

C_t ——各年投资、运行费等（即各年的投入）；

B_t ——各年收益（利润+折旧）；

i ——内部收益率，我国火电一般内部收益率为 10%。

上式表明了项目从开始建设到经济寿命期全部过程的经济活动。第一项为收入（资金流入）现值，第二项为支出（资金流出）现值， i 反映它们相等时（即项目不亏不盈时）的利率，故内部收益率 i 是项目能承受的最高贷款利率。当内部收益率 i 低于贷款利率时，项目应被否定；只有 i 值大于贷款利率、且具有更高值的项目，在经济上才是可取的。内部收益率就这样来动态地反映项目的预期经济效益。

第二节 发电厂的热经济性评价

一、评价发电厂热经济性的主要方法

火力发电厂将燃料的化学能最终转换成对外供应的电能和热能，其热经济性评价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的。

两种不同的观点——能量的数量利用和能量的质量利用，导致了评价的两种不同方法：

以热力学第一定律为基础的热量法（热效率法），和以热力学第一、二定律为基础的做功能力法（或称焓方法）与熵方法。

热量法从现象看问题，只以燃料产生热量被利用的程度来对电厂进行评价。由于它直观、计算方便，目前被世界各国广泛用于定量分析。

做功能力法透过本质看问题，能发现在能量转换过程中引起做功能力损失的根本原因。它以燃料化学能的做功能力被利用程度来评价电厂。由于能量的合理利用既包含数量、更注重质量，故该法对利用热功转换进行能量生产的火电厂更具特殊意义。但它的定量计算复杂，使用起来不方便、不直观，目前主要用于定性分析，起着从本质上指导技术改进方向的作用。

以下仅以凝汽式电厂为例，说明两种方法应用的特点。热电厂两种方法的应用，将突出表现在第四章关于热电厂总能耗对热、电两种产品的分摊上。

二、凝汽式电厂能量转换过程中的损失及利用

（一）热量法

热量法进行热经济分析时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的。

在热量转换及传递过程中，热平衡式为：

$$\text{供给热量} = \text{有效利用热量} + \text{损失热量}$$

1. 热效率（热量利用率） η

$$\text{热效率} = \frac{\text{有效利用热量}}{\text{供给热量}} \times 100 = \left(1 - \frac{\text{损失热量}}{\text{供给热量}} \right) \times 100\% \quad (1-4)$$

凝汽式电厂的能量转换全过程由以下部分组成：燃料在锅炉中燃烧，烟气将热量传递给工质，工质通过主蒸汽管道将热能输送至汽轮机，热能在汽轮机中进行热功转换，再由机械传动与发电机将机械能转换成电能（图 1-1，a）。

上述每一过程对应着相应的热力设备及其（相对）热效率，它们是锅炉效率 η_b 、管道效率 η_p 、汽轮机（内）效率 η_i 、机械效率 η_m 和发电机效率 η_g 。而整个能量转换过程的热量利用程度，则由全厂热效率 η_{cp} 表示。表 1-1 列出了凝汽式发电厂各热力生产过程及全厂的热量损失及利用。表中燃料供给电厂的热量为 $Q_{cp} = Bq_1$ 。

表 1-1 凝汽式发电厂的热量利用与热损失

项 目 范 围	有效利用热量 (kJ/h)	热量损失 (kJ/h)	热效率 (%)	热损失率 (%)
锅炉	$Q_b = Q_{cp} - \Delta Q_b$	$\Delta Q_b = Q_{cp} \zeta_b$	$\eta_b = \frac{Q_b}{B_{q_1}} = \frac{Q_b}{Q_{cp}}$ $= 1 - \frac{\Delta Q_b}{Q_{cp}}$	$\zeta_b = \frac{\Delta Q_b}{Q_{cp}} = 1 - \eta_b$
主蒸汽管道	$Q_0 = Q_b - \Delta Q_p$	$\Delta Q_p = Q_{cp} \zeta_p$	$\eta_p = \frac{Q_0}{Q_b} = 1 - \frac{\Delta Q_p}{Q_b}$	$\zeta_p = \frac{\Delta Q_p}{Q_{cp}} = \eta_b (1 - \eta_p)$

续表

项 目 范 围	有效利用热量 (kJ/h)	热量损失 (kJ/h)	热效率* (%)	热损失率 (%)
汽轮机	$W_i = Q_0 - \Delta Q_c$	$\Delta Q_c = Q_{cp} \zeta_c$	$\eta_i = \frac{W_i}{Q_0} = 1 - \frac{\Delta Q_c}{Q_0}$	$\zeta_c = \frac{\Delta Q_c}{Q_{cp}} = \eta_b \eta_p (1 - \eta_i)$
机械传动	$3600 P_{ax} = W_i - \Delta Q_m$	$\Delta Q_m = Q_{cp} \zeta_m$	$\eta_m = \frac{3600 P_{ax}}{W_i} = 1 - \frac{\Delta Q_m}{W_i}$	$\zeta_m = \frac{\Delta Q_m}{Q_{cp}} = \eta_b \eta_p \eta_i (1 - \eta_m)$
发电机	$3600 P_e = 3600 P_{ax} - \Delta Q_g$	$\Delta Q_g = Q_{cp} \zeta_g$	$\eta_g = \frac{P_e}{P_{ax}} = 1 - \frac{\Delta Q_g}{3600 P_{ax}}$	$\zeta_g = \frac{\Delta Q_g}{Q_{cp}} = \eta_b \eta_p \eta_i \eta_m (1 - \eta_g)$
发电厂	$3600 P_e = Q_{cp} - \sum_{cp} \Delta Q_j$	$\sum_{cp} \Delta Q_j = Q_{cp} \sum_{cp} \zeta_j$	$\eta_{cp} = \frac{3600 P_e}{Q_{cp}} = \eta_b \eta_p \eta_i \eta_m \eta_g = 1 - \frac{\sum_{cp} \Delta Q_j}{Q_{cp}} = 1 - \sum_{cp} \zeta_j$	$\zeta_j = \frac{\Delta Q_j}{Q_{cp}}$

* 除 η_b 、 η_{cp} 为绝对热效率外，其余均为相对热效率。

注 表中公式的符号为：

B ——锅炉煤耗，kg/h；

q_l ——煤的低位发热量，kJ/kg；

Q_b ——锅炉热负荷，kJ/h；

Q_0 ——汽轮机热耗，kJ/h；

W_i ——汽耗 D_0 时汽轮机的实际内功率，以热量计，kJ/h；

P_{ax} 、 P_e ——汽耗 D_0 时汽轮机传给发电机的机械功率和发电机发出的电功率，kW。

表 1-1 中的热损失率 $\zeta_j = \frac{\Delta Q_j}{Q_{cp}}$ ，因是相对于全厂的供热量 Q_{cp} ，故是绝对热损失率；而 $(1 - \eta_j) = \zeta'_j$ ，则是对应于该设备的供热量，而非全厂，故称相对热损失率。

对于现代发电厂，上述热效率值分别为： $\eta_b = 0.90 \sim 0.92$ ； $\eta_p = 0.98 \sim 0.99$ ； $\eta_i = 0.45 \sim 0.47$ ； $\eta_m = 0.99$ ； $\eta_g = 0.98 \sim 0.99$ ； $\eta_{cp} = 0.389 \sim 0.42$ 。可以看出，发电厂的主要设备——实现热功转换的汽轮机，其内效率 η_i 最低，是影响 η_{cp} 的关键。

2. 冷源热损失 ΔQ_c 与汽轮机内效率 η_i

由上述热效率的数值中可得出，与汽轮机内效率 η_i 对应的热损失 ΔQ_c ，是发电厂中各项热损失中最大的。它是由于汽轮机排汽的汽化潜热被凝汽器中冷却水所带走，最终损失于大气所致。因为热力学第二定律指出，热功转换中不可避免地存在冷源损失，故称 ΔQ_c 为冷源热损失。

由表 1-1 中看出，冷源热损失 $\Delta Q_c = Q_0 - W_i = Q_0 (1 - \eta_i) = Q_0 \zeta'_c = Q_{cp} \zeta_c$ 。对于中参数电厂，当 $\eta_b = 0.87$ ， $\eta_p = 0.98$ 时，若 $\eta_i = 0.3$ ，则冷源热损失率高达 $\zeta'_c = 0.7$ ， $\zeta_c = 0.6$ 。即使对于超临界参数机组，设 $\eta_b = 0.92$ ， $\eta_p = 0.99$ ，若 $\eta_i = 0.47$ ，则冷源热损失率也为 $\zeta'_c =$

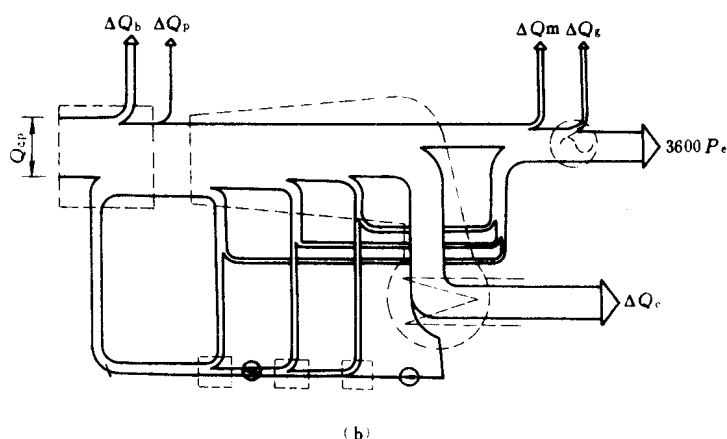
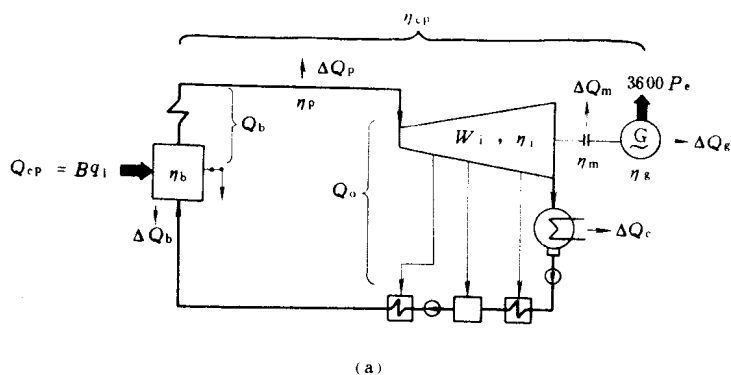


图 1-1 凝汽式电厂能量转换过程的热量利用和热损失

(a) 生产过程中的热效率、热量利用及热损失；(b) 热流图

0.53, $\zeta_c = 0.48$ 。

热量法根据 $\Delta Q_c = D_c (h_c - h'_c) = D_c \Delta q_c$ 认为，只有设法减少汽轮机排汽量 D_c ，才能降低冷源热损失，提高 η_i 和 η_{cp} 。式中 h_c 和 h'_c 分别指汽轮机排汽及其凝结水的焓。

3. 热流图

以热能数量利用评价凝汽式电厂热经济性时，表 1-1 中电厂热量的利用（利用量 $3600 P_e$ 或利用率 η_{cp} ），和各过程的热量损失（ ΔQ_i 或损失率 ζ_i ）的反平衡关系，可以形象地用“热流图”表示出来

$$3600 P_e = Bq_l - \sum_{cp} \Delta Q_i = Q_{cp} - \sum_{cp} \Delta Q_i \quad \text{kJ/h} \quad (1-5)$$

或

$$\eta_{cp} = 1 - \frac{\sum_{cp} \Delta Q_i}{Q_{cp}} = \left(1 - \sum_{cp} \zeta_i \right) \times 100 \quad \% \quad (1-6)$$

图 1-1 (b) 是根据式 (1-5) 绘制的。

从热流图中可明显看出，汽轮机的冷源热损失 ΔQ_c 是所有热损失中最大的。

(二) 做功能力法

1. 焓效率与焓损

用做功能力法评价电厂能量的质量利用时,采用焓效率(可用能利用率)和焓损(做功能力损失)来衡量。

根据能量平衡有

供给的可用能 = 有效利用的可用能 + 焓损

则焓效率 η_{ix} 的通式为

$$\eta_{ix} = \frac{\text{有效利用的可用能}}{\text{供给的可用能}} \times 100 \quad \% \quad (1-7)$$

根据焓方程,可得焓损的通式

$$\Delta E = (e_{in} + e_q) - (w_i + e_{out}) \quad (1-8)$$

$$= T_{amb} \Delta s \quad \text{kJ/kg} \quad (1-9)$$

其中

$$e_q = w_{max} = q \eta_c = q \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_1} \right) \quad \text{kJ/kg} \quad (1-10)$$

上二式中 T_{amb} ——环境温度, K;

Δs ——不可逆过程的熵产, kJ/(kg · K);

e_{in} 、 e_{out} ——分别为流入和流出设备的比焓, kJ/kg;

e_q ——进入设备的热流焓, kJ/kg;

T_1 ——热源放热过程的平均温度, K;

q ——进入设备的热量, kJ/kg;

w_i ——以热量计的实际比功, kJ/kg;

η_c ——卡诺循环效率, %。

电厂中各典型热力设备的焓效率和焓损如表 1-2 所示。

电厂的焓效率,牵涉到实际能量转换全过程中的所有不可逆过程,它们主要是:①燃料在锅炉里由化学能转换成热能时的能量贬值;②锅炉、回热加热器、凝汽器中有温差的换热(图 1-2, a);③工质在汽轮机中的不可逆绝热膨胀,和水泵中的不可逆绝热压缩(图 1-2, b、c);④管道中输送工质过程的绝热节流,或有摩阻的流动及散热(图 1-2, d、e)等。

表 1-2 电厂典型热力设备的焓损及焓效率

设 备	特 点	比焓损 ΔE (kJ/kg)	焓效率 η_{ix} (%)
汽轮机	$e_q = 0$	$\Delta E_t = e_{in} - w_i - e_{out}$	$\eta_{ex}^t = \frac{w_i}{e_{in} - e_{out}}$
锅炉、换热器	$w_i = 0$	$\Delta E_b = e_{in} + e_q - e_{out}$	$\eta_{ex}^b = \frac{e_{out}}{e_{in} - e_q}$
管 道	$e_q = 0, w_i = 0$	$\Delta E_p = e_{in} - e_{out}$	$\eta_{ex}^p = \frac{e_{out}}{e_{in}}$

图 1-2 中的焓损均可用通式 $\Delta E = T_{amb} \Delta s$ 计算。但对于图 (a) 的有温差换热,亦可用与