

21 世纪高等学校规划教材  
Textbook Series of 21st Century

# 热电联产

刘志真 主 编  
邱丽霞 副主编

1547893468754442213520216  
441  
14423284985322303535487357445  
132412  
234545521374281123457123

130044544455  
0012414645  
2124685355551

00245502687

001  
2146  
3200  
2142



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>



21 世纪高等学校规划教材  
Textbook Series of 21st Century

# 热电联产

主 编 刘志真  
副主编 邱丽霞  
编 写 李 琳  
主 审 武学素



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书阐述了热电联产、热电冷三联产的基本原理,热电厂的热经济性,热经济性指标,热力设备及热力系统等内容。主要内容包括凝汽式发电厂的能量转换及热经济性、热负荷概述、热电厂的热经济性及其指标、给水回热加热及除氧系统、供热设备及系统、水热网供热的调节方法、供热式汽轮机、发电厂的热力系统等。

本书为高等学校“热能工程”、“热电联产与城市集中供热”、“电厂热能与动力工程”、“电厂集控运行”专业本专科“热电联产”课程教材,也可供有关专业师生和相关企业的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

热电联产/刘志真主编. —北京:中国电力出版社,  
2006

21世纪高等学校规划教材

ISBN 7-5083-4640-8

I. 热... II. 刘... III. 热电厂—热能—综合利用  
—高等学校—教材 IV. TM611

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第099278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>)  
三河市德利印刷厂印刷  
各地新华书店经售

\*

2006年11月第一版 2006年11月北京第一次印刷  
787毫米×1092毫米 16开本 9.5印张 228千字  
印数 0001—3000册 定价 16.00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

由于节能工作的需要、环境保护的要求,工业用热需求量增大,民用采暖和生活用热迅速增加,农村小热电的飞速发展,再加上政府的大力支持,中国的热电联产前景广阔。本书根据热电联产的发展现状及前景,结合世界热电联产呈现出的新发展趋势,如机组容量增大,使用天然气、煤层气等清洁燃料,出现主要使用天然气的小型热电冷三联产新型能源系统等,大小容量机组并重,重点阐述了热电联产及热电冷三联产的基本原理、热负荷特性及计算、热电厂的热经济性及其指标、热电厂热力设备的基本结构及工作原理、水热网供热的调节方法、热力系统以及热力计算等内容。

本书由山东电力研究院刘志真任主编,负责全书的统稿,编写绪论、第一、二、三、四、五章;山西大学工程学院邱丽霞任副主编,编写第六、七、九章;山东电力研究院李琳编写第八章。

全书由西安交通大学武学素教授主审。武教授对本书进行了认真仔细地审阅,提出了诸多宝贵意见,使我们获益匪浅,也使本书得以增辉,编者在此深表谢意。

本书在编写过程中借鉴了有关兄弟院校、制造厂、设计院和热电厂的诸多宝贵资料,编者在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限,书中难免存在一些缺点和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2006年3月

## 目 录

前言	
绪论	1
第一章 凝汽式发电厂的能量转换及热经济性	4
第一节 凝汽式发电厂能量转换过程中的损失和效率	4
第二节 凝汽式发电厂的主要热经济指标	7
第二章 热负荷概述	10
第一节 热负荷分类、特性及计算	10
第二节 热负荷图	17
第三节 年耗热量计算	20
第三章 热电厂的热经济性及其指标	22
第一节 热电联产概述	22
第二节 热电厂总热耗量的分配及主要热经济指标	25
第三节 热电厂节煤量的计算及节煤条件	32
第四节 热电厂的热化系数	38
第五节 热电厂的蒸汽参数及其循环	43
第四章 热电冷三联产	52
第一节 热电冷三联产概述	52
第二节 吸收式制冷简介	55
第三节 热电冷三联产的意义和发展动态	61
第四节 制冷机的常用能量性能指标	63
第五章 给水回热加热及除氧系统	66
第一节 给水回热加热器	66
第二节 面式加热器的连接系统	71
第三节 热力除氧工作原理	74
第四节 除氧器的类型和构造	76
第五节 除氧器的运行方式及其热力系统	80
第六节 实际机组回热原则性热力系统	82
第七节 热电厂的辅助热力系统	83
第六章 供热设备及系统	87
第一节 供热载热质及其热源	87
第二节 热网加热器	89
第三节 热力站	93
第四节 减温减压器及其热力系统	94

第五节	尖峰热水锅炉 .....	96
第六节	厂外供热系统 .....	97
第七节	热力网系统的计算 .....	102
<b>第七章</b>	<b>水热网供热的调节方法</b> .....	<b>104</b>
第一节	概述 .....	104
第二节	供暖热负荷供热调节的基本公式 .....	104
第三节	水热网供热调节的方法 .....	106
第四节	采暖调节中的重力压头 .....	111
第五节	供热综合调节 .....	112
<b>第八章</b>	<b>供热式汽轮机</b> .....	<b>115</b>
第一节	供热式汽轮机的型式及其特点 .....	115
第二节	背压式汽轮机 .....	116
第三节	抽汽式汽轮机 .....	117
第四节	凝汽-采暖两用机组 .....	123
第五节	低真空供热凝汽机组 .....	124
<b>第九章</b>	<b>发电厂的热力系统</b> .....	<b>125</b>
第一节	发电厂热力系统的概念和分类 .....	125
第二节	发电厂原则性热力系统 .....	125
第三节	发电厂原则性热力系统计算 .....	131
第四节	发电厂的全面性热力系统 .....	140
<b>参考文献</b>	.....	<b>144</b>

## 绪 论

### 一、国内外热电联产的发展概况

热电联产是根据能源梯级利用原理,先将煤、天然气等一次能源发电,再将发电后的余热用于供热的先进能源利用形式。热电联产与热电分产相比具有如下优点:①节约能源;②减轻大气污染、改善环境质量;③增加电力供应;④节约城市用地;⑤提高供热质量;⑥便于综合利用;⑦改善城市形象;⑧减少安全事故等。因此世界各国都在大力发展热电联产。国内外热电联产的发展概况如下。

#### 1. 国外热电联产发展概况

19世纪70年代末期,在欧洲一些人口密集的城区,开始出现了由往复式蒸汽机带动的发电机,并对蒸汽机的乏汽加以利用,这便是早期的热电联产系统。在本世纪早期,由于纯发电开始产生显著的规模效益,热电联产系统没能得到发展。二战后,区域供热在北欧、前苏联以及一些东欧国家得到普遍应用,并带动了热电联产的发展。而在欧洲其他国家,由于燃料丰富、廉价,热电联产发展缓慢。在经历了1973/1974年和1979/1980年两次石油危机后,热电联产开始受到西方国家的重视。特别是美国、俄罗斯、欧洲等国及我国台湾地区对热电联产都很重视。

欧共体在90年代支持了45项热电联产工程,2000年热电联产发电量已占总发电量的9%,计划2010年达到18%。荷兰目前热电联产已占发电市场的40%。丹麦是世界上对热电联产优惠政策最多的国家之一。丹麦积极鼓励发展热电联产,通过制定高能效标准来遏制发展单纯的火力发电机组。在丹麦实现了严格的能源环境税收机制,对于能效不达标的发电系统征收0.1丹麦克朗/(kW·h)的税款,对于达到标准的电力免税,对于可再生能源和超低排放,从该项税收直接进行补贴。这一政策的出台最终导致全国没有一个火电厂不供热,没有一个工业锅炉不发电,全国的能源利用效率超过60%,特别是火力发电系统。2000年丹麦热电联产的发电量占总发电量的61.6%,供热量占区域供热的60%。20年间国民生产总值增长了43%,而能源消耗实现零增长,其中最关键的技术就是大力发展热电联产。美国近年来热电联产发展迅速,热电联产装机容量在1980~1995年的15年间由12000MW增加至45000MW,2000年已占总装机容量的7%,计划2010年占总装机容量的14%,2020年占总装机容量的29%。在日本能源供应领域中,主要以热电联产系统为热源的区域供热(冷)系统是仅次于燃气、电力的第三大公益事业,到1996年共有132个区域供热(冷)系统。俄罗斯早在1993年热电装机已达6530万kW。热电厂的发电量占总发电量的33%以上,1993年热电机组的平均发电标准煤耗率仅为268.5g/(kW·h)。

#### 2. 我国热电联产发展概况

我国政府也越来越重视发展热电联产。1997年制定的《中国21世纪议程》和《中华人民共和国节约能源法》,2000年制定的《中华人民共和国大气污染防治法》等法规,都明确鼓励发展热电联产。2004年国务院转发国家发改委的《节能中长期专项规划》中,已经将热电联产作为重点领域和重点工程。〔2000〕1268号文《关于发展热电联产的规定》是现阶段

段在鼓励发展热电联产方面最全面、最具体的指导我国热电联产发展的纲领性文件，在促进我国热电联产发展中已经发挥并将长期发挥重要指导作用。

我国早在建国初期，学习苏联经验，重视发展热电联产建设。在供热机组占全部火电设备总容量中，从1952年的2%增加到1957年的17%，仅低于苏联，居世界第二位。在经历了70年代的发展低潮后，随着改革开放和经济的发展，我国热电联产又取得了很大进展。截止到2003年底，全国6000kW及以上供热机组共2121台，总容量达4369万kW、6000kW及以上热电机组占全国火电同容量机组的15.7%，占全国发电机组总容量的11.16%，已远远超过核电机组比重。承担了全国总供热蒸汽的65.89%，热水的32.66%。

运行的热电厂中，规模最大的为太原第一热电厂，装机容量1386MW，在北京、沈阳、吉林、长春、郑州、天津、邯郸、衡水、秦皇岛和太原等大城市已有一批20万kW、30万kW大型抽汽冷凝两用机组在运行，星罗棋布的热电厂不仅在中国的大江南北，长城内外迅速发展，就连黑河，海拉尔、石河子和海南岛这些边疆城市也开花结果，区域热电厂从城市的工业区，蔓延到了乡镇工业开发区，苏州地区一些村镇办热电厂也在发挥着重要作用。最近几年由于市场经济的发展，一些大中城市也开始安装大型供热机组。已有一批热电冷三联产的实践经验。

在负责城市集中供热的热力公司中，规模最大的为北京市热力公司，现已有供热管网514km，供热面积7800万m<sup>2</sup>。供应蒸汽105个工业用户897t/h，大小热力站共1317个。已建成的热力管网：蒸汽管直径1000mm，热水管直径1400mm。

城市民用建筑集中供热面积增长较快，并向过渡区发展。全国集中供热面积中，公共建筑占33.12%，民用建筑占59.76%，其他占7.11%，民用建筑集中供热有如下特点：①三北地区集中供热以民用建筑为主，如北京市民用建筑为72.66%，河北为66.54%，辽宁为67.5%，山东为51.97%。②城市集中供热逐步向过渡区发展，如上海、江苏、浙江、安徽等省市均已集中供热，但以公共建筑和工厂为主，如上海为61.72%，江苏为53.35%，安徽为39.55%。城市供热管网的建设也有很大发展。

无论从供热能力上看，还是从供热总量上看，热电联产均占全国蒸汽总供热能力和总供热量的60%~70%。如2002年，全国总供热能力为83346t/h，热电联产为59946t/h，占72%。全国供热总量为57438万GJ，热电联产为37847万GJ，占66%。

### 3. 我国热电联产的发展前景

由于节能工作的需要、环境保护的要求、工业用热需求量大、民用采暖和生活用热迅速增加、农村小热电的发展具有十分广阔的市场，再加上政府的大力支持，中国的热电联产前景广阔。

热、电、冷三联产发展迅速：随着工业的发展和人民生活水平的提高，采暖范围已突破数年前中央的规定范围，由北方向南方的一些地区扩展，在南方的一些省、市，由于银行、宾馆、饭店、商场和文体设施等公用建筑的增加，人民居住条件的变化，对空调制冷的需要也日益迫切，为此，一些地区已发展一批以热电厂为热源的集中供热与制冷系统，溴化锂制冷负荷的增加，使热电厂的综合效益明显提高，现已出现迅速增加热、电、冷三联产的势头。

国家发展改革委员会编制的《2010年热电联产发展规划及2020年远景发展目标》提出：到2020年，全国热电联产总装机容量将达到2亿kW，其中城市集中供热和工业生产



用热的热电联产装机容量都约为 1 亿 kW。预计到 2020 年, 全国总发电装机容量将达到 9 亿 kW 左右, 热电联产将占全国发电总装机容量的 22%, 在火电机组中的比例为 37% 左右。根据上述规划, 2001 年~2020 年期间, 全国每年要增加热电联产装机容量约 900 万 kW, 年增加节能能力约 800 万 t 标准煤。

#### 4. 世界热电联产主要发展趋势

①应用范围普遍化: 世界各国尤其是西方等国都在大力发展热电联产, 热电装机容量占总装机容量的比重越来越大。②机组容量大型化: 台湾已有 60 万 kW 供热机组在运行, 北京、沈阳等中心城市已有 20 万、30 万 kW 大型抽汽冷凝两用机组在运行。③洁净煤技术高新化: 在洁净煤技术系列中, 与热电联产紧密相关的是脱硫、脱尘、脱氮技术。循环流化床锅炉煤种适应性广、燃烧效率高、脱硫率可达到 98%,  $\text{NO}_x$ 、CO 也能低排放, 因此得到大力推广应用。欧洲、美国、日本电站锅炉均配有静电除尘器和布袋除尘器, 除尘效率在 99.9% 以上。④节能技术系统化: 不但围绕供热机组开发应用节能技术, 而且也围绕供热管网、采暖系统和住宅采暖开发应用节能技术。⑤热能消费计量化: 西方各国的经验表明, 采用按热计量收费可节约能源 20%~30%, 北京、天津、青岛、烟台、沈阳等城市在集中供热中按热量收费工作走在了全国的前列。⑥使用燃料清洁化: 世界各国热电联产都在努力降低燃煤比重, 积极开发利用天然气、煤层气、地热等各种清洁燃料。我国《关于发展热电联产的规定》1268 号文就指出鼓励使用清洁能源, 鼓励发展热、电、冷联产技术和热、电、煤气联供, 以提高热能综合利用效率。积极支持发展燃气—蒸汽联合循环热电联产。⑦能源系统新型化: 新型能源系统主要是使用天然气的小型热电冷联产系统, 它具有三个特点, 一是主要使用天然气, 二是热电冷三联产, 三是机组小型化。我国《关于发展热电联产的规定》1268 号文就指出以小型燃气发电机组和余热锅炉等设备组成的小型热电联产系统, 在有条件的地区应逐步推广。⑧投资经营市场化: 西方国家已经实现了供热反垄断, 并扩大国际开放。中国入世有力地推动了供热事业的市场化进程。

## 二、热电厂的类型

热电厂根据能源分为燃煤型、燃气型、核能等热电厂; 根据原动机类型分为汽轮机型、燃气轮机型、内燃机型、燃料电池型、燃气轮机和汽轮机联合循环型热电厂等; 根据热电厂功能分为热电联产型, 热电冷三联产型, 煤气、热力和电力三联产型热电厂等。

## 三、本课程的任务及作用

在已修完工程热力学、锅炉原理、汽轮机原理等课程的基础上, 本课程着重阐述热电联产及热电冷三联产的基本原理、热电厂的热经济性指标、热电厂热力设备的基本结构及工作原理、水热网供热的调节方法、热力系统以及热力计算等内容。

“热电联产”是一门与生产、工程实际紧密相联的综合性课程, 通过本课程的学习将为学生从事这方面的工作打下一定的基础。

## 第一章 凝汽式发电厂的能量转换及热经济性

### 第一节 凝汽式发电厂能量转换过程中的损失和效率

凝汽式发电厂是将燃料化学能转换为电能的生产场所，其能量转换过程为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，蒸汽的热能转换成机械能，机械能通过发电机转换成电能。

在发电厂能量转换及传递过程的不同阶段，存在着大小不等、原因各异的能量损失。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。评价发电厂热经济性的基本方法主要有两种：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（做功能力法）。

热量法以热效率的高低作为评价能量转换过程完善程度的指标。热效率是某一热力循环中装置或设备有效利用的能量占所消耗能量（输入能量）的百分数，其意义是表明能量转换的利用率。热量法的实质是能量的数量平衡，具有直观、计算方便、简捷等优点，目前被世界各国广泛应用于定量计算。本书主要用热量法来研究发电厂的能量转换过程和热经济性。

能量转换及传递过程的热平衡式为

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

$$\text{热效率} = \frac{\text{有效利用热量}}{\text{输入总热量}} \times 100\% = \left(1 - \frac{\text{损失热量}}{\text{输入总热量}}\right) \times 100\%$$

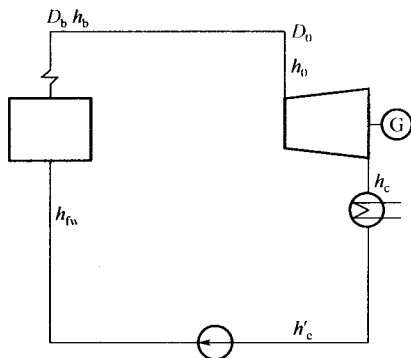


图 1-1 简单凝汽式发电厂热力系统

下面以图 1-1 所示的简单凝汽式发电厂为例，应用热量法阐述凝汽式发电厂的各种热损失和热效率。

#### 一、锅炉的热损失与锅炉效率 $\eta_b$

在锅炉内，燃料的化学能并不是全部转换为蒸汽的热能，主要的热损失有：排烟热损失、化学不完全燃烧热损失、机械不完全燃烧热损失、散热损失以及灰渣热损失等。

锅炉效率  $\eta_b$  等于锅炉的热负荷  $Q_b$  与锅炉消耗燃料热量  $Q_{cp}$  之比，即

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

式中  $D_b$ ——锅炉的蒸发量即每小时生产的蒸汽量，kg/h；

$h_b$ ——过热器出口蒸汽比焓，kJ/kg；

$h'_{fw}$ ——锅炉给水比焓，kJ/kg；

$B$ ——锅炉每小时消耗燃料量，kg/h；

$Q_{net}$ ——燃料的低位发热量，kJ/kg。

锅炉效率的大小反映了锅炉设备的完善程度，其影响因素有：锅炉的参数、容量、结构

特性及燃料种类等。一般大型锅炉  $\eta_b = 0.90 \sim 0.94$ 。

## 二、管道热损失与管道效率 $\eta_p$

锅炉生产的蒸汽通过主蒸汽管道进入汽轮机时，会有一部分热损失，其大小用管道效率  $\eta_p$  表示，它等于汽轮机设备的热耗量  $Q_0$  与锅炉热负荷  $Q_b$  之比，即

$$\eta_p = \frac{Q_0}{Q_b} = \frac{D_0(h_0 - h_{fw})}{D_b(h_b - h_{fw})} \quad (1-2)$$

式中  $h_0$ ——汽轮机的进汽比焓，kJ/kg。

管道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。不计工质损失，一般  $\eta_p = 0.98 \sim 0.99$ 。

## 三、汽轮机的冷源损失与汽轮机内效率

汽轮机的冷源损失包括固有冷源损失和附加冷源损失两部分。

### 1. 固有冷源损失与理想循环热效率 $\eta_i$

固有冷源损失是指理想情况下蒸汽在汽轮机中定熵膨胀时汽轮机排汽在凝汽器内的放热量 (1kg 排汽放热量为  $h_{ca} - h'_c$ )，是理想情况下汽轮机也不可避免的冷源损失。这部分热损失的大小决定于热力循环的类型和参数，通常用理想循环热效率  $\eta_i$  来表示，它等于循环理想功与循环耗热量之比，即

$$\eta_i = \frac{P_{ia}}{Q_0} = \frac{D_0(h_0 - h_{ca})}{D_0(h_0 - h_{fw})} \quad (1-3)$$

式中  $h_{ca}$ ——理想情况下汽轮机排汽比焓。

理想循环热效率  $\eta_i$  说明热力循环类型与参数的先进性，一般  $\eta_i = 0.40 \sim 0.46$ 。

### 2. 附加冷源损失与汽轮机的相对内效率 $\eta_{ri}$

蒸汽在汽轮机中实际膨胀做功时存在进汽节流、排汽及内部 (包括漏汽、湿汽等) 损失，这些损失使蒸汽做功减少，实际排汽比焓  $h_c$  大于理想排汽比焓  $h_{ca}$ ，实际做功过程 1kg 排汽在凝汽器内的放热量 ( $h_c - h'_c$ ) 大于理想情况下 1kg 排汽在凝汽器内的放热量 ( $h_{ca} - h'_c$ )，两放热量之差 ( $h_c - h_{ca}$ ) 即为附加冷源损失。附加冷源损失的大小，用汽轮机的相对内效率  $\eta_{ri}$  来表示，它等于蒸汽在汽轮机中的实际内功率与理想内功率之比，即

$$\eta_{ri} = \frac{P_i}{P_{ia}} = \frac{D_0(h_0 - h_c)}{D_0(h_0 - h_{ca})} \quad (1-4)$$

汽轮机的相对内效率  $\eta_{ri}$  说明汽轮机内部构造的完善程度。

### 3. 汽轮机的冷源损失与汽轮机的绝对内效率 $\eta_a$

固有冷源损失与附加冷源损失之和为汽轮机总的冷源损失，其大小用汽轮机的绝对内效率  $\eta_a$  来表示。绝对内效率  $\eta_a$  是实际循环热效率，为实际内功率与汽轮机的热耗量之比，即

$$\eta_a = \frac{P_i}{Q_0} = \frac{D_0(h_0 - h_c)}{D_0(h_0 - h_{fw})} = \eta_i \eta_{ri} \quad (1-5)$$

汽轮机的绝对内效率  $\eta_a$  反映汽轮机热经济性的高低，不仅反映热量的利用率，还反映

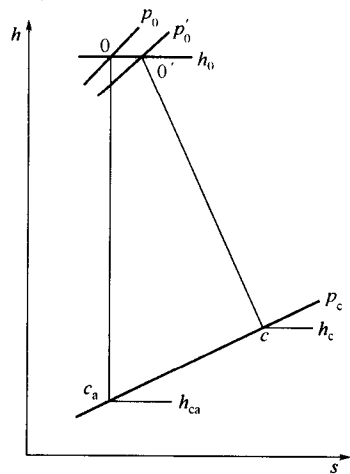


图 1-2 蒸汽膨胀过程线

热功转换的程度，既是数量指标，又是质量指标。

#### 四、汽轮机的机械损失及机械效率 $\eta_m$

汽轮机的机械损失包括汽轮机各轴承的摩擦损失、汽轮机调节系统和油系统的能耗。汽轮机机械损失的大小用汽轮机的机械效率  $\eta_m$  来评价。它等于汽轮机输出给发电机轴端的功率  $P_{ax}$  与汽轮机内功率  $P_i$  之比，即

$$\eta_m = \frac{P_{ax}}{P_i} \quad (1-6)$$

一般  $\eta_m = 0.99$ 。

#### 五、发电机的能量损失与发电机效率 $\eta_g$

发电机的能量损失包括机械方面的轴承摩擦损失、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）造成的耗功。此项损失大小用发电机效率  $\eta_g$  进行评价。它等于发电机输出的电功率  $P_e$  与汽轮机输出给发电机轴端的功率  $P_{ax}$  之比，即

$$\eta_g = \frac{P_e}{P_{ax}} \quad (1-7)$$

大中型发电机效率一般为  $\eta_g = 0.96 \sim 0.99$ 。

#### 六、凝汽式发电厂的能量损失与效率 $\eta_{cp}$

上述能量损失的总和就是整个凝汽式发电厂能量损失，其大小用凝汽式发电厂效率  $\eta_{cp}$  来表示。它等于发电厂发出的电能与燃料供给的热量之比，即

$$\eta_{cp} = \frac{3600P_e}{Q_{cp}} = \frac{3600P_e}{BQ_{net}} \quad (1-8)$$

凝汽式发电厂热效率与各设备的分效率的关系为

$$\eta_{cp} = \frac{3600P_e}{BQ_{net}} = \frac{3600P_e}{Q_{cp}} = \eta_b \eta_p \eta_i \eta_m \eta_g = \eta_b \eta_p \eta_i \eta_m \eta_g \quad (1-9)$$

一般

$$\eta_{cp} = 0.259 \sim 0.42。$$

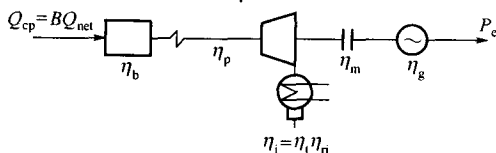


图 1-3 凝汽式发电厂能量转换过程的热效率

式 (1-9) 表明，凝汽式发电厂的总效率决定于各设备的分效率，其中任一设备热经济性的改善，都可能使电厂效率有所提高，两者提高的相对值相等。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。从能量的数量

上讲，汽轮机的固有冷源损失是所有热损失中最大的。在上述效率中，管道效率、汽轮机机械效率、发电机效率再提高的幅度不大，再提高对电厂效率的影响也较小；而理想循环热效率和汽轮机的相对内效率较低，即汽轮机的绝对内效率低，使凝汽式发电厂效率一般低于 40%。因此，提高  $\eta_{cp}$  的主攻方向集中在提高  $\eta_i$  上，即要想提高整个电厂的热效率，除了要提高锅炉效率外，还要提高理想循环热效率和汽轮机的相对内效率，降低数量最大的固有冷源损失和数量较大的附加冷源损失。

与热量法结论不同，嫡方法、焓方法认为：凝汽式发电厂能量转换过程中存在各种做功能力损失，如温差换热、工质膨胀和压缩过程、工质节流等过程中的做功能力损失，其中锅炉的做功能力损失最大，汽轮机内部的做功能力损失次之，而凝汽器中做功能力损失却很小。原因在于锅炉的传热温差很大，引起的做功能力损失很大，凝汽器中虽然热量损失大，

但其品位很低，所以做功能力损失很小。

要提高凝汽式发电厂热经济性，就要降低发电厂能量转换过程中的做功能力损失，具体途径主要有提高蒸汽初参数、降低蒸汽终参数，采用回热、再热、热电联产等。

## 第二节 凝汽式发电厂的主要热经济指标

目前，世界各国均用热量法制定了热经济性指标来定量评价凝汽式发电厂的热经济性。下面介绍凝汽式发电厂常用的几个主要热经济指标。

### 一、汽轮发电机组的主要热经济指标

#### 1. 汽耗量 $D_0$

$$D_0 = \frac{3600P_e}{(h_0 - h_c)\eta_m\eta_g}, \text{kg/h} \quad (1-10)$$

#### 2. 汽耗率 $d_0$

$d_0$  是指汽轮发电机组每生产  $1\text{kW}\cdot\text{h}$  的电能所消耗的蒸汽量，用下式计算：

$$d_0 = \frac{D_0}{P_e} = \frac{3600}{(h_0 - h_c)\eta_m\eta_g}, \text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h}) \quad (1-11)$$

汽耗率不适宜用来比较不同类型机组的经济性，而只能对同类型同参数汽轮机评价其运行管理水平。

#### 3. 热耗量 $Q_0$

$$Q_0 = D_0(h_0 - h_{fw}) = \frac{3600P_e}{(h_0 - h_c)\eta_m\eta_g} = \frac{3600P_e}{\eta_i\eta_m\eta_g} = \frac{3600P_e}{\eta_e}, \text{kJ/h} \quad (1-12)$$

式中  $\eta_e$  —— 汽轮发电机组的绝对电效率， $\eta_e = \eta_i\eta_m\eta_g$ 。

#### 4. 热耗率 $q_0$

$q_0$  是指汽轮发电机组每生产  $1\text{kW}\cdot\text{h}$  电能所消耗的热量，用下式计算：

$$q_0 = \frac{Q_0}{P_e} = d_0(h_0 - h_{fw}) = \frac{3600}{\eta_i\eta_m\eta_g} = \frac{3600}{\eta_e}, \text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h}) \quad (1-13)$$

式中  $\eta_e$  —— 汽轮发电机组的绝对电效率。

汽轮发电机组的热耗率和绝对电效率都是衡量汽轮发电机组热经济性的主要指标，不同的是：热耗率以热量形式表示，绝对电效率以效率形式表示。由于热耗率物理概念明确，便于人们理解，所以国内外电力行业都习惯用它作为汽轮发电机组的主要热经济指标。热耗率的大小，不仅与热力循环类型、汽轮机设备的完善程度有关，还与运行、维修的工作质量有关。

### 二、全厂性的主要热经济指标

#### 1. 发电厂热效率 $\eta_{cp}$

$$\eta_{cp} = \frac{3600P_e}{BQ_{net}} = \frac{3600P_e}{Q_{cp}} = \eta_b\eta_p\eta_t\eta_r\eta_m\eta_g \quad (1-14)$$

#### 2. 发电厂净热效率 $\eta_{cp}^n$

发电厂效率  $\eta_{cp}$  没有考虑发电厂厂用电 ( $P_{ap}$ ) 的消耗，衡量电厂的热经济性应以电厂对外供多少电为依据， $\eta_{cp}$  是发电的热效率，或称发电厂的毛热耗率，扣除厂用电容量  $P_{ap}$  (kW)

的全厂热效率称发电厂的净热效率  $\eta_{cp}^n$ ，用下式计算：

$$\eta_{cp}^n = \frac{3600(P_e - P_{ap})}{BQ_{net}} = \frac{3600P_e \left(1 - \frac{P_{ap}}{P_e}\right)}{Q_{cp}} = \eta_{cp}(1 - \zeta_{ap}) \quad (1-15)$$

式中  $P_{ap}$ ——厂用电功率，kW；

$\zeta_{ap}$ ——厂用电率， $\zeta_{ap} = P_{ap}/P_e$ 。

2001年，我国火力发电厂平均厂用电率为7.25%，水电为0.46%。

3. 发电厂热耗量  $Q_{cp}$

$$Q_{cp} = BQ_{net} = \frac{3600P_e}{\eta_{cp}} = \frac{3600P_e}{\eta_b \eta_p \eta_i \eta_m \eta_g} = \frac{1}{\eta_b \eta_p} \cdot \frac{3600P_e}{\eta_i \eta_m \eta_g} = \frac{Q_0}{\eta_b \eta_p}, \text{kJ/h} \quad (1-16)$$

4. 发电厂热耗率  $q_{cp}$

$q_{cp}$ 是指发电厂每生产1kW·h电能所消耗的燃料总热量，用下式计算：

$$q_{cp} = \frac{Q_{cp}}{P_e} = \frac{3600}{\eta_{cp}} = \frac{q_0}{\eta_b \eta_p}, \text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h}) \quad (1-17)$$

5. 发电实际煤耗量  $B_{cp}$

$$B_{cp} = \frac{3600P_e}{\eta_{cp} Q_{net}}, \text{kg/h} \quad (1-18)$$

6. 发电实际煤耗率  $b_{cp}$

$b_{cp}$ 是指发电厂每生产1kW·h电能所消耗的煤量，用下式计算：

$$b_{cp} = \frac{B_{cp}}{P_e} = \frac{3600}{\eta_{cp} Q_{net}}, \text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h}) \quad (1-19)$$

发电实际煤耗率  $b_{cp}$ 受实际煤的低位发热量  $Q_{net}$ 影响。为便于各电厂横向比较，消除此影响，引入标准煤，标准煤的  $Q_{net} = 29270 \text{kJ/kg}$ ，采用发电标准煤耗率  $b_{cp}^s$ 作为通用的热经济性指标。

7. 发电标准煤耗率  $b_{cp}^s$

$b_{cp}^s$ 是指发电厂每生产1kW·h电能所消耗的标准煤量，用下式计算：

$$\begin{aligned} b_{cp}^s &= \frac{B_{cp}^s}{P_e} = \frac{3600}{29270 \eta_{cp}} \approx \frac{0.123}{\eta_{cp}}, \text{kg 标准煤}/(\text{kW} \cdot \text{h}) \\ &= \frac{123}{\eta_{cp}}, \text{g 标准煤}/(\text{kW} \cdot \text{h}) \end{aligned} \quad (1-20)$$

2001年，我国平均发电标准煤耗率为357g/(kW·h)。

8. 供电标准煤耗率  $b_{cp}^{s,n}$

$b_{cp}^{s,n}$ 是指发电厂每向外供出1kW·h电能所消耗的标准煤量，用下式计算：

$$\begin{aligned} b_{cp}^{s,n} &= \frac{B_{cp}^s}{P_e - P_{ap}} = \frac{B_{cp}^s}{P_e(1 - \zeta_{ap})} = \frac{b_{cp}^s}{1 - \zeta_{ap}} \approx \frac{0.123}{\eta_{cp}(1 - \zeta_{ap})}, \text{kg 标准煤}/(\text{kW} \cdot \text{h}) \\ &= \frac{123}{\eta_{cp}(1 - \zeta_{ap})}, \text{g 标准煤}/(\text{kW} \cdot \text{h}) \end{aligned} \quad (1-21)$$

表 1-1 我国火力发电厂历年平均供电标准煤耗率 g/(kW·h)

年 份	1950	1960	1970	1980	1990	1998	1999	2000	2001	2002	2003
全国平均供电标准煤耗率	909	600	502	448	427	404	399	392	385	381	377

表 1-2 国产燃煤汽轮发电机组的主要技术参数

单机容量 (MW)	蒸汽参数		$\eta_{\text{re}}$	$\eta$	$d$ [kg/(kW·h)]	$q$ [kJ/(kW·h)]	供电标准煤耗与效率		
	压力 (MPa)	温度/再热温度 (°C)					煤耗 [g/(kW·h)]	平均煤耗 [g/(kW·h)]	供电效率 (%)
6~25	3.43	435	0.82~0.85	0.31~0.33	4.7~4.1	12414~11250	500~510	505	24.33
50~100	8.83	535	0.85~0.87	0.37~0.40	3.9~3.5	10000~9231	391~429	409	30.04
125	13.24	550/550	0.86~	0.43~	3.1~2.9	8612~8238	382~386	384	31.99
200	12.75	535/535	0.89	0.45			376~388	382	32.16
300	16.18	550/550	0.88~	0.45~	3.2~2.8	8219~7579	376~382	379	32.42
600	16.67	537/537	0.90	0.48			320~342	331	37.12

表 1-3 根据中国电力企业联合会的资料, 2004 年全国大中型火力发电厂供电煤耗

g/(kW·h)

容量等级	统计台数	全国平均	国产机最好水平	进口机最好水平
100~110MW	70	395	382.06	404.2
120~199MW	96	374.24	344.39	384
200~220MW	143	367.39	345.1	352
250~330MW	186	342.43	319.2	319.93
350MW	53	328.76	312.8	314.4
500~600MW	31	330.05	331.5	304.3
660MW 以上	7	321.81	无	312

## 第二章 热 负 荷 概 述

### 第一节 热负荷分类、特性及计算

#### 一、热负荷概念

随着社会的进步,生产的发展,人民生活水平的提高,人们不仅需要电能,还需要消耗越来越多的热能。热能也与电能一样,几乎不能大量储存。热能生产过程必须随时保持产、供、销平衡,并应保证热能供应的可靠性和经济性。

从集中供热系统获得热量的用热单位称为该系统的热用户。若热量从热电厂来,用热单位称为热电厂的热用户。热用户单位时间内消耗的热量称为热负荷。由热电厂通过热网向热用户供应的不同用途的热量,称为热电厂的热负荷。

#### 二、热负荷分类

无论是住宅建筑、社会公用建筑、还是工业企业建筑物等都有各种目的的热消耗。当热量用于达到不同目的时,它的需要量(单位时间供应的热量 GJ/h,或流量 t/h)、负荷随时间变化的规律(即热负荷特性)、对载热质的种类(蒸汽或热水)及参数(压力、温度)的要求都是不同的,这就要求把不同种类的热负荷分别研究。

根据热负荷用途,可以将各种各样的热负荷分为采暖热负荷、通风热负荷、空调热负荷(空调冬季采暖热负荷、空调夏季制冷热负荷)、热水供应热负荷、生产工艺热负荷等。

根据热用户的不同,可以将热负荷分为两大类:民用热负荷和工业热负荷。民用热负荷包括采暖、通风、空调及生活热水热负荷。工业热负荷包括生产工艺热负荷、生活热负荷和工业建筑的采暖、通风、空调热负荷。

根据热负荷随时间变化的特性,可以将热负荷分为两大类:全年性热负荷和季节性热负荷。全年性热负荷与气候条件及室外温度基本无关,一年四季变化不大,而一昼夜内变化可能较大,但在全年和每昼夜的变化规律大致相同。属于全年性热负荷的主要有生产工艺热负荷和热水供应热负荷。生产工艺热负荷直接取决于生产状况,热水供应热负荷与生活水平、生活习惯以及居民成分等有关。季节性热负荷与室外空气温度、空气湿度、风向、风速、太阳辐射等气候条件密切相关,其中对它的大小起决定性作用的是室外温度,它在全天中相对比较稳定而在全年中变化很大。属于季节性热负荷的有采暖、通风、空调热负荷等。为了增加热电厂的热经济性,提高供热机组供热设备的利用率,应努力发展反季节性热负荷,如已有采暖热负荷,就应谋求发展溴化锂制冷热负荷。

各类热负荷特点如表 2-1 所示。

#### 三、热负荷特性及计算

确定热负荷是热电厂建设项目在可行性研究阶段的工作重点之一,要根据热负荷的大小等条件来决定建设的规模,并使建成的热电厂,在已知热负荷的条件下,热经济指标符合《关于发展热电联产的若干规定》(急计基础[2000]1268号文)的要求,达到节约能源的目的。因此热电厂的计算都是从确定热负荷开始,经过热负荷的调查、核实、计算整理,最



终确定设计热负荷。确定热负荷的主要内容有：

表 2-1 各类热负荷特点

类别 特点	生产工艺热负荷	热水供应热负荷	采暖及通风热负荷
用途	用于生产工艺过程的加热、干燥、蒸馏等。用作动力，如驱动汽锤、压气机、水泵等	印染、漂洗等生产用热水，城市公用设施及民用热水	生产、城市公用事业及民用的采暖及通风
主要用户	石油、化工、轻纺、橡胶、冶金等	生产及人民生活	生产及人民生活
负荷特性	全年性，昼夜变化大，全年变化小	全年性，昼夜变化大，全年变化小	季节性，昼夜变化小，全年变化大
介质及参数	一般为 0.15~0.6MPa，也有高于 1.4~3.0MPa 的蒸汽	60~70℃ 热水	70~150℃ 或更高温度的热水或 0.07~0.28MPa 蒸汽
工质损失率	直接供汽 20%~100% 间接供汽 0.5%~2%	100%	水网循环水量的 0.5%~2%

- (1) 确定计算热负荷，即每小时的最大热负荷；
- (2) 确定热负荷随时间的变化规律（绘制热负荷图）及确定所需的全年热负荷；
- (3) 确定载热质的种类及其参数。

利用热负荷的最大值以及载热质的种类和参数可以选择热电厂的设备，再加上热负荷随时间的变化规律的资料，即可计算热电厂的热经济指标，以及确定其运行方式。

当缺少有关热用户用热资料时，采暖、通风、空调及生活热水热负荷可采用概略计算方法。

### (一) 采暖热负荷

采暖的目的是补偿房屋向外界的散热损失，以使室内空气温度维持在规定标准上。采暖热负荷主要包括围护结构的耗热量和门窗缝隙渗透冷空气耗热量。采暖热负荷是城市集中供热系统中最主要的热负荷，其设计热负荷占全部设计热负荷的 80%~90% 以上（不包括生产工艺热负荷）。采暖设计热负荷的近似计算，可采用体积热指标法或面积热指标法等。设计选用热指标时，总建筑面积大，围护结构热工性能好，窗户面积小，采用较小值；反之采用较大值。

#### 1. 体积热指标法

冬季采暖系统的热负荷应包括加热由门窗缝隙渗入室内的冷空气的耗热量。

$$Q_h = (1 + \mu) q_{h,v} V_o (t_i - t_{o,h}^d) \times 10^{-3}, \text{kW} \quad (2-1)$$

式中  $Q_h$ ——采暖设计热负荷，kW；

$\mu$ ——建筑物空气渗透系数，一般民用建筑物取  $\mu = 0$ ，对于工业建筑物必须考虑  $\mu$  值，不同建筑物的  $\mu$  值是不同的， $\mu$  值可从有关手册中查得；

$q_{h,v}$ ——建筑物的采暖体积热指标，W/( $\text{m}^3 \cdot \text{℃}$ )，它表示各类建筑物，在室内外温差 1℃ 时，每  $1\text{m}^3$  建筑物外围体积的采暖热负荷，它的取值大小与建筑物的构造和外形有关；查设计规范获得；