

REDIAN
LIANCHAN

武学素

热电联产

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书从原始热负荷、供热机组的热力特性出发,着重阐述热电联合生产的原理、热力计算及技术经济比较等方面的基本知识。主要内容包括:热电联产节能的基本原理及其计算;热负荷性质及气候特性对采暖热负荷的影响;热电厂热力计算;供热机组的动力特性;热电厂的技术经济比较;热电厂最佳热化系数的选择及各型供热机组的发展。

本书可作为高等学校“电厂热能动力”专业的硕士研究生、本科生以及专科生的教材及教学参考书,也可供其他专业师生和有关企业的工程技术人员自学和参考。

热 电 联 产

作者 武学素
责任编辑 刘 影

西安交通大学出版社出版
(西安市咸宁路28号)

西安电子科技大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经营

开本787×1092 1/32 印张8.5625 插页1字数:181千字

1988年7月第1版 1988年7月第1次印刷

印数:1—5000册

ISBN7-5605-0036-6/TK·6

定价:1.45元

序

能源的合理利用及提高其利用效率不仅关系到资源节约和经济发展，而且影响到生态环境和人类前途，因此世界各国莫不对此极端重视。而热电联产和集中供热乃达到上述利用目的的重要技术规划和措施之一。当然，这种措施，在实行上，涉及到城市总体建设或改造，国民经济的合理安排与协调以及各方面所能达到的水平。一般来说，大型热电站及热网的初投资大、建设周期长，只能根据国家的实际情况，事先规划，逐步实施。但对区域性或联片性供热，如小型热电站、中小型凝汽机组的改造或集中锅炉房等的建立，则应立即考虑，以资节能。

在欧美，区域供热已有百年多历史，后因能源价廉，多数国家发展较慢。70年代以来，各国对此又给予重视，并予以扩展。

在我国，从第一个五年计划开始，在东北、华北、西北等工业城市，筹建了一批热电联产和集中供热系统。当时由于各种资料匮乏，调查又不严格，设计失据，技术研究更不够，致使所建热电站效益殊差。六五期间，中央各部门对集中供热强调从事计划建设。于是技术研究先行一步，国家经委在1982年即提出“热化系数及供热方式优化方案”的专题攻关项目。这里指的热化系数既有其理论意义，又在具体设计上以及建成后的运行上有其经济意义，是热电工程及设备的优化设计和匹配的重要依据。（该项目已在1986年通过

部级鉴定，并获奖)。

本书主要阐述热电联产节能的基本原理及其计算，热负荷性质及气候特性对采暖热负荷的影响，热电站热力计算，供热机组的动力特性，热电站的技术经济比较及最佳热化系数的论述与遴选等方面。

在系统计算和局部分析中，作者采用了新的循环函数法；并在书中适当介绍了科研成果和有关论文。这些方面，可供专业学生阅读和工程人员参考之用。再者，书中述及的技术经济方法及所得出的结论，如能引起有关学术界和工程界的注视、评论及进一步探索研究，以冀在科学性和综合效益性上有助于推进我国热电联产事业的发展，似更具有现实意义。企予望之！

付梓有日，爰为之序。

西安交通大学教授

瞿 钰

一九八八年一月

目 录

第一章 热电联产的能量有效性	1
1-1 热电联产的概念	1
1-2 热电联产能量有效性的评价	3
1-3 供热机组的热化发电率	4
1-4 确定热电厂的煤耗量	8
1-5 确定热电分产的煤耗量	12
1-6 热电厂节煤量的计算	13
第二章 热电厂的热负荷	22
2-1 研究发电厂负荷的任务	22
2-2 各种热负荷的性质、特点和分类	23
2-3 负荷图种类	25
2-4 供暖通风负荷的计算	29
2-5 热负荷持续时间图	35
2-6 全年供热量和最大热负荷利用小时数	42
第三章 供热的调节方法	45
3-1 供热调节方法总论	45
3-2 热网的载热质和水热网设计温度的选择	47
3-3 水热网的连接方式	50
3-4 热网水的温度调节方程	52
3-5 采暖调节中的重力压头	56
第四章 热电厂热力系统的计算	63
4-1 凝汽式汽轮机回热系统的计算	64

4-2	供热机组的计算	75
4-3	热电厂的电厂方程式	84
第五章	热力网计算和供热系统局部变化的热经济性分析	104
5-1	基本热网加热器和尖峰供热设备之间的热负荷分配图	104
5-2	热力网系统的计算	112
5-3	减压减温设备	115
5-4	对外界用户的蒸汽供应	116
5-5	热电厂供热系统局部变化的热经济性分析	119
5-6	背压机组热经济性分析	127
5-7	抽汽机和背压机的联合运行	134
第六章	供热汽轮机组的动力特性	144
6-1	节流调节的凝汽式汽轮机组的动力特性	144
6-2	旁通调节凝汽式汽轮机组的动力特性	150
6-3	背压机组的动力特性	158
6-4	一次调节抽汽式汽轮机组的动力特性	164
6-5	有分级加热的抽汽式机组的工况简介	177
第七章	供热汽轮机的工况图	180
7-1	背压机的工况图	181
7-2	一次调节抽汽式汽轮机的工况图	182
7-3	两次调节抽汽式汽轮机的工况图(ΠT型)	185
7-4	有两次调节抽汽的T型汽轮机的工况图	194
7-5	工况图修正曲线的使用	200
第八章	热电厂的技术经济比较	207
8-1	技术经济比较的原则	207

8-2	热电厂技术经济比较的方法	210
8-3	技术经济比较中时间因素的考虑	212
8-4	供热系统各组成部分的基建投资及其 年折旧率	218
8-5	年运行费用	221
8-6	计算实例 ^[10]	223
第九章	热电厂最佳热化系数的确定	228
9-1	热化系数的含义	228
9-2	理论上最佳热化系数的简化数学模型	230
9-3	在经济上考虑的最佳热化系数	236
9-4	应用特性曲线法求热化系数最佳值	239
第十章	供热汽轮机组的发展	250
10-1	国内现有供热机组系列产品的性能简介	250
10-2	冷凝式供暖汽轮机组——冷凝采暖 两用机组	251
10-3	供热汽轮机的发展	258
	主要参考文献	265

第一章 热电联产的能量有效性

电能和热能联合生产称热电联产，它可以节约大量燃料，是建设热电厂，发展“热化”的重要依据之一。本章阐明两种能量联合生产的概念，热电联产能量有效性的评价，热电厂各项热经济指标的计算，热电厂节煤量的计算以及节煤的条件。

1-1 热电联产的概念

热力设备只用来供应一种能量(电能或热能)称为单一能量生产，或称两种能量分别生产。如凝汽式发电厂只供应电能，供热锅炉房只供应热能(蒸汽或热水)，它们都属于单一能量生产。又如凝汽式发电厂中直接由锅炉供应蒸汽给热用户，虽然该电厂同时供应两种能量，但其生产过程仍属两种能量分别生产。

利用汽轮机中做过功的蒸汽对外供热称两种能量联合生产。如热电厂中装背压机、调节抽汽式汽轮机、冷凝采暖两用机(或称冷凝式供暖机组)等，利用排汽或抽汽供给热用户，就属于两种能量联合生产。

由于做了功的那部分排汽热量未传给“冷源”，而供给了热用户，所以电能是在供热基础上生产的，这是两种能量生产的一个基本特征。因此，实现两种能量生产必须具备的基本条件是：

1) 有热用户, 而且要保证热用户所需要的参数(压力和温度)和流量;

2) 在供热同时还要保证必须数量的电能。

两种能量联合生产的电厂通常称为热电厂。

热电联产符合按质用能的原则, 具有较高压力和温度的高品位热工质首先用来生产电能, 排出的低品位蒸汽对外供给热用户。这样的联合能量生产提高电厂经济性, 可用下面理想卡诺循环来分析。图 1-1 为理想卡诺

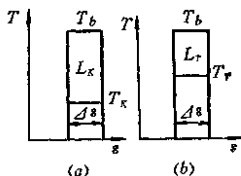


图 1-1 理想卡诺循环 T-S 图

循环 T-S 图, a) 为凝汽循环, b) 为供热循环。两个循环加入的热量相等, 均为 $q_b = T_b \Delta s$, 得到的功:

凝汽循环

$$L_k = (T_b - T_k) \Delta s$$

供热循环 $T_r = (T_b - T_r) \Delta s$

T_b ——循环的吸热温度, K; T_k ——环境温度, K;

T_r ——供热循环排汽供热用户的温度, K。

做了功的蒸汽可为热用户利用的热量:

凝汽循环 $q_r = 0$

供热循环 $q_r = T_r \Delta s$

生产电能的热耗率:

$$\text{凝汽循环 } HR_k = \frac{q_b}{L_k} = \frac{T_b \Delta s}{(T_b - T_k) \Delta s} \quad (1-1)$$

$$\text{供热循环 } HR_r = \frac{q_b - q_r}{L_r} = \frac{(T_b - T_r) \Delta s}{(T_b - T_r) \Delta s} = 1 \quad (1-2)$$

两种能量生产方式热耗率之差

$$\Delta HR = HR_K - HR_T \quad (1-3)$$

公式(1-3)表明热电联产与热电分产相比,生产电能的热耗率是减少的。

1-2 热电联产能量有效性的评价

评价热电联产能量有效性有两个指标:

(1) 燃料的节约量 B_j 是在发相等的电能和供相等的热量条件下,用联产比用分产的不同方式而节约的燃料量。

$$B_j = B_f - B_T \quad (1-4)$$

(2) 热电厂的燃料热量利用系数 η_T 是热电厂输出的总能量与所消耗能量之比。

$$\eta_T = \frac{Q + W}{B_T Q_L} \quad (1-5)$$

上两式中 B_f 和 B_T ——分产和联产的燃料消耗量; Q ——热电厂供给外部热用户的热量; W ——热电厂的发电量; Q_L ——燃料的低位发热量。

热电厂燃料热量利用系数 η_T 是一个单纯的平衡指标,它并不能分别地表明电能和热能这两种生产过程的经济性。当热电厂经过减压减温器供热时,尽管从锅炉直接供给用户热量在能量有效使用上是不经济的,可是在燃料热量利用系数中把这部分热量计算在内以后,这个指标反而有所提高。显然,这是不合理的。

因此,不能用这个指标来定量地评价热电联产的能量有效性,而应根据发相等电能和供相等热能条件下的节煤量 B_j ,

来评价热电联产的效益。只是在与凝汽式发电厂比较燃料有效利用程度，或在热电厂设计中用来估算燃料时，才用 η_T 这个指标。

1-3 供热机组的热化发电率

1. 热化发电率的概念

热化发电率以 ω 表示，它只与联产部分的热、电有关。它是供热汽轮机组供热汽流的发电量(称联产发电量) W_T 与该汽流对外供热量(称联产供热量) Q_T 之比值

$$\omega = \frac{W_T}{Q_T} \quad \text{kW} \cdot \text{h/GJ} \quad (1-6)$$

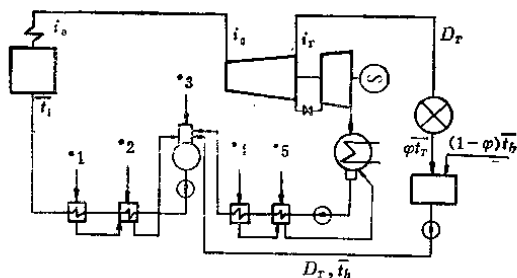


图 1-2 供热汽轮机组给水回热系统简图

图 1-2 是某供热汽轮机组给水回热系统简图。图中供热汽流的回热循环(或称供热循环)包括锅炉、汽轮机的高压缸、热用户以及*1、*2、*3 回热加热器。对外的供热抽汽的焓值

为 i_T ，经热用户以后返回到除氧器。返回凝结水的百分率 φ 。当 $\varphi=1$ 时，返回水焓 $\bar{t}_s = \bar{t}_T$ ；当 $\varphi \neq 1$ 时， $\bar{t}_s = \varphi \bar{t}_T + (1-\varphi)\bar{t}_b$ 。

联产发电量指供热循环产生的发电量，它应为

$$W_T = [D_T(i_0 - i_T) + D_1^T(i_0 - i_1) + D_2^T(i_0 - i_T) + D_3^T(i_0 - i_s)] \frac{\eta_i \eta_d}{3600} \text{ kW} \cdot \text{h}$$

$$\text{或 } W_T = D_T(i_0 - i_T) \frac{\eta_i \eta_d}{3600} + \sum_1^3 D_j^T(i_0 - i_j) \frac{\eta_i \eta_d}{3600} \text{ kW} \cdot \text{h}$$

$$W_T = W_0 + W_n \quad \text{kW} \cdot \text{h} \quad (1-6a)$$

式中 D_T ——对外供热的抽汽量，kg/h； D_1^T ， D_2^T ， D_3^T ——供热返回水经*1，*2，*3加热器加热的抽汽量，kg/h； $\eta_i \eta_d$ ——汽轮发电机组的机电效率。

由式(1-6a)看到，供热循环产生的电能由两部分组成，一部分是供热汽流本身在汽轮机膨胀产生的 W_0 ，称外部联产发电量；另一部分是各级回热抽汽加热供热汽流的返回水(由返回的凝结水和补充水组成)所形成的发电量 W_n ，称内部联产发电量。

联产的供热量 $Q_T = D_T(i_T - \bar{t}_s)/10^6 \text{ GJ}$ ，热化发电率为

$$\omega = \frac{W_T}{Q_T} = \frac{W_0}{Q_T} + \frac{W_n}{Q_T} = \omega_0 + \omega_n \quad \text{kW} \cdot \text{h/GJ} \quad (1-7)$$

式中 ω_0 ——外部热化发电率； ω_n ——内部热化发电率。

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \frac{D_T(i_0 - i_T) \eta_i \eta_d \times 10^6}{D_T(i_T - \bar{t}_s) \cdot 3600} \\ &= 278 \frac{H_T \eta_i \eta_d}{i_T - \bar{t}_s} \text{ kW} \cdot \text{h/GJ} \end{aligned} \quad (1-8)$$

$$\text{令 } e_T = \frac{\omega_n}{\omega_0} \text{ 那么 } \omega = \omega_0(1 + e_T) = 278H_T\eta_i\eta_d / (i_0 - \bar{t}_s) \times (1 + e_T) \quad (1-8a)$$

$H_T = i_0 - i_T$ 是 1 公斤对外供汽的实际焓降。

2. 热化发电率的简化计算

由于供热汽轮机组的实际回热系统相当复杂，而供热汽流的回水又不是固定进入某一级加热器，因此用加热器热平衡的方法求各级抽汽量 $D_1^r, D_2^r \dots D_z^r$ (回水引到第 z 级) 很复杂，可以用简化的方法，这就是用假想回热循环法。如图 1-3 所示。用一级假想的混合式加热器代替回水所经过的各级加热器，在此加热器中，回水从 t_h 加热到给水温度 t_1 ，这股假想抽汽的饱和温度和可用加热器进出口的算术平均温度求得：

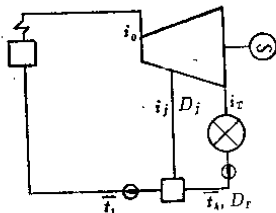


图 1-3 供热汽流的假想回热系统

$$t_j = \frac{t_1 + t_h}{2} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1-9)$$

式中 t_j ——是假想抽汽压力的饱和温度，由此从水蒸汽表中查得对应的饱和压力 p_j ，再由汽轮机的过程线上与 p_j 压力线的交点查得假想抽汽焓 i_j 。

根据加热器的热平衡

$$\begin{aligned} D_j(i_j - \bar{t}_1) &= D_r(\bar{t}_1 - \bar{t}_s) \\ D_j &= \frac{\bar{t}_1 - \bar{t}_s}{i_j - \bar{t}_1} D_r \end{aligned} \quad (1-10)$$

热化发电率

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{[D_T(i_0 - i_T) + D_j(i_0 - i_j)]\eta_j\eta_d}{D_T(i_T - \bar{t}_k)} \times 278 \\ &= \frac{278\eta_j\eta_d}{i_T - \bar{t}_k} \left[(i_0 - i_T) \right. \\ &\quad \left. + \frac{(i_0 - i_j)(\bar{t}_1 - \bar{t}_k)}{i_j - \bar{t}_1} \right] \text{ kW}\cdot\text{h/GJ} \quad (1-11)\end{aligned}$$

内部热化发电率所占的份额

$$e_T = \frac{D_j(i_0 - i_j)}{D_T(i_0 - i_T)} = \frac{H_j}{H_T} \frac{\bar{t}_1 - \bar{t}_k}{i_j - \bar{t}_1} \quad (1-12)$$

式中 H_j , H_T ——假想回热汽流和供热汽流的实际焓降。

由此看到，所谓简化计算是对内部热化发电率而言，实质上是将复杂的回热系统进行简化。系数 e_T 也是各级回热做功占供热汽流做功的百分数。在已知供热机组初参数和供热系统参数时，不需要回热系统详细资料，利用式(1-11)就可计算热化发电率，这就是此方法的方便之处。现代的供热汽轮机组 ω 和 e_T 值大致是： $\omega = 111 \sim 167 \text{ kW}\cdot\text{h/GJ}$ ， $e_T = 0.15 \sim 0.20$ 。

用假想回热系统计算热化发电率与实际回热系统得出的结果相比是有误差的。以国产 C50—90/1.2 供热机组的计算为例，当热电厂回水率为 100%，相对误差约 1.0%。当热电厂回水率减小，补充水和回水不在同一地点引入时，相对误差会增大到约 10%。因此，只在进行热电厂初步方案比较时可用简化方法。

分析式(1-11)可以看出，热化发电率 ω 与供热汽轮机的初参数、供热抽汽压力、回热系统的完善程度、供热汽流

经通流部分的相对内效率、返回水率及返回水温度、机组的机电效率有关。当蒸汽初参数及供热抽汽压力已定时，汽轮发电机组热转换为功的实际过程愈完善，不可逆损失愈小，热化发电率就愈高。所以 ω 是用来评价供热机组热电联产部分技术完善程度的指标。

1-4 确定热电厂的煤耗量

1. 热电厂生产电能的煤耗量

热电厂生产电能和热能，总的煤耗量 B_T ，其中生产电能的为 B_T^e ，而生产热能的为 B_T^q

$$B_T = B_T^e + B_T^q \quad (1-13)$$

装有调节抽汽式汽轮机的热电厂中，电能的生产一部分是供热汽流完成的，它取决于外界热负荷的大小；另一部分是由凝汽流完成的，它取决于排向凝汽器的热量

(1) 供热汽流生产电能的煤耗率 $b_{T^e}(T)$ ，供热汽流因无“冷源”损失，它的循环绝对内效率为 1，煤耗率(以标准煤 $Q_L = 29310 \text{ kJ/kg}$ 计，以下均为标准煤耗率)

$$b_{T^e}(T) = \frac{0.123}{\eta_{g1} \eta_{gd} \eta_i \eta_d} \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h}) \quad (1-14)$$

式中 η_{g1} 、 η_{gd} ——热电厂锅炉效率和管道效率。

在理想情况下 $\eta_{g1} \eta_{gd} \eta_i \eta_d = 1$ ， $b_{T^e}(T) = 0.123 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，但实际上在这些设备中都是有能量损失的，因此 $b_{T^e}(T) > 0.123 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

(2) 凝汽流生产电能的煤耗率 $b_{T^e}(K)$ ，供热汽轮机进入凝汽器的那股汽流称凝汽流，它以凝汽器出口的凝结水焓 \bar{t}_K

进入到各级加热器，组成了凝汽流的回热循环。为了简化计算凝汽循环的实际回热系统，同样可以用假想回热系统来研究，即以一个假想的混合式加热器把凝结水从焓值 \bar{t}_K 加热到给水焓 \bar{t}_1 。它的假想系统如图 1-4。与供热蒸汽相同，可求得凝汽流内部热化发电率份额

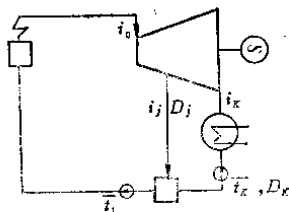


图 1-4 凝汽流的假想回热系统

$$\begin{aligned}
 e_K &= \frac{D_j(i_0 - i_j)}{D_K(i_0 - i_K)} \\
 &= \frac{H_j}{H_K} \frac{\bar{t}_1 - \bar{t}_K}{i_j - \bar{t}_1} \quad (1-15)
 \end{aligned}$$

i_j 的求法和供热循环相似，首先求假想压力的饱和水温度

$$t_i = \frac{\bar{t}_1 + \bar{t}_K}{2} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1-16)$$

由 t_i 查水蒸汽表得 p_i ，以此在汽轮机的过程线上可查得 i_j 。

该凝汽循环的绝对内效率

$$\begin{aligned}
 \eta_i^K &= \frac{D_j(i_0 - i_j) + D_K(i_0 - i_K)}{(D_j + D_K)(i_0 - t_1)} \\
 &= \frac{D_j(i_0 - i_j) + D_K(i_0 - i_K)}{D_j(i_0 - i_j) + D_K(i_0 - t_K)} \\
 &= \frac{D_K(i_0 - i_K)e_K + D_K(i_0 - i_K)}{D_K(i_0 - i_K)e_K + D_K(i_0 - t_K)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{D_K(i_0 - i_K)}{D_K(i_0 - t_K)} \cdot \frac{1 + e_K}{1 + \frac{D_K(i_0 - i_K)}{D_K(i_0 - t_K)} \cdot e_K} \\
 &= \eta_i \cdot \frac{1 + e_K}{1 + e_K \eta_i} \quad (1-17)
 \end{aligned}$$

式中 $\eta_i = \frac{i_0 - i_K}{i_0 - t_K}$ 朗肯循环的绝对内效率, H_j, H_K ——

假想抽汽流和凝汽流的实际焓降, 因相对内效率 η_{oi} 相同, 也可用理想焓降。

凝汽流生产电能的煤耗率

$$b_{T(K)}^d = \frac{0.123}{\eta_{g1} \eta_{gd} \eta_i^k \eta_i \eta_d} \quad \text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h}) \quad (1-18)$$

(3) 热电厂生产电能的煤耗量 B_T^d 热电厂一年生产的电能为 W_T , 汽轮机的联产供热量 Q_T , 那么联产的发电量为 $W_{T(T)} = \omega \cdot Q_T \quad \text{kW} \cdot \text{h}$, 凝汽流的发电量为 $W_{T(K)} = W_T - W_{T(T)}$, 总的发电煤耗量为

$$B_T^d = b_{T(T)}^d \cdot W_{T(T)} + b_{T(K)}^d \cdot W_{T(K)} \quad \text{kg/a} \quad (1-19)$$

2. 热电厂生产热能的煤耗量 B_T^q

用户处所需的热量为 Q , 热电厂中供热汽轮机的抽汽供热量为 $Q_T = \frac{Q}{\eta_{rw}}$, η_{rw} 为热力网效率。此处认为用户所需的全部热量由联产供给, 热电厂联产的热耗量 Q_c 用下式计算

$$Q_c = \frac{Q}{\eta_{g1} \eta_{gd} \eta_{rw}} = \frac{Q_T}{\eta_{g1} \eta_{gd}} \quad (1-20)$$

热电厂生产热能的煤耗率