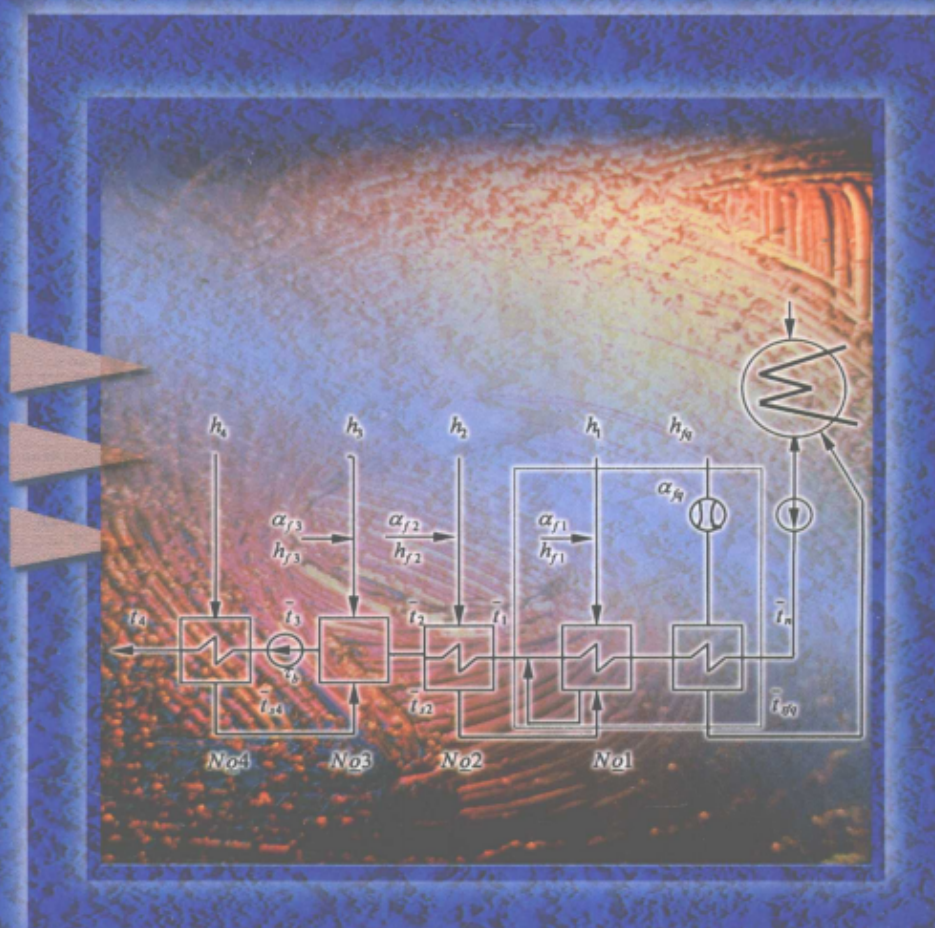


火电厂热力系统

经济性诊断理论及应用

严俊杰 邢秦安 林万超 陈国慧 著



责任编辑 / 侯 军
封面设计 / 伍 胜

ISBN 7-5605-1222-4



9 787560 512228 >



ISBN 7-5605-1222-4/TK · 67 定价: 25.00 元

火电厂热力系统 经济性诊断理论及应用

严俊杰 邢秦安 著
林万超 陈国慧

西安交通大学出版社

·西安·

内容提要

本书系统地介绍了火电厂热力系统经济性诊断理论,其中包括:凝汽机组,供热机组,叠置机组,再热机组热力系统及运行参数的经济性定量诊断方法和数学模型。在此基础上,还介绍了几种利用本书理论研制的经济性诊断系统。为了使读者能将书中的理论应用到实际电厂中去,书中还给出了我国已有的各种机组的热力系统及经济性诊断基础数据。

这是一本研究火电厂热力系统经济性诊断理论的专著,可作为高等院校热能工程专业本科生和研究生选修课教材。对于从事火电厂节能管理、节能改造、热力系统设计和研究的科技工作者,此书也是一本极有价值的参考书。

袁素群 杰俊平
袁国利 袁国利

图书在版编目(CIP)数据

火电厂热力系统经济性诊断理论及应用/严俊杰等著.
西安:西安交通大学出版社,2000.2
ISBN 7-5605-1222-4

I. 火… II. 严… III. 火电厂-热力系统-经济计
量分析 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 03502 号

*

西安交通大学出版社出版发行
(西安市咸宁西路 28 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668316)
西安电子科技大学印刷厂印装
各地新华书店经销

*

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:11.5 字数:272 千字
2000 年 5 月第 1 版 2000 年 5 月第 1 次印刷
定价:25.00 元

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售
部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)2668357,2667874

序 言

火电厂热力系统经济性诊断是进行火电厂节能改造的前提,是提高火电机组运行经济性的重要工作。其目的是确定火电机组节能潜力的大小、分布及场所,以便于工程技术人员有的放矢地采取措施,达到经济运行。

西安交通大学动力系统工程研究所从70年代开始从事火电厂热力系统的经济性诊断理论研究,并致力于将理论与现场应用相结合,从而在火电厂热力系统的经济性诊断理论及应用方面取得了显著的成果,获得了多项国家级和省、部级科技成果奖,并得到了火电行业的好评。为了使热力系统经济性诊断理论更好地服务于社会,促进我国火电行业的节能降耗工作,特通过西安交通大学出版社出版该书。

本书汇集了作者们多年的研究成果,包括热力系统计算基础、热力系统经济性诊断理论基础、凝汽机组热力系统经济性诊断、再热机组热力系统经济性诊断理论、供热机组热力系统经济性诊断理论、叠置电厂热力系统经济性诊断理论、回热加热器变工况经济性诊断方法、火电机组经济性诊断系统等内容。

本书的出版得到了西安交通大学出版社的大力支持,电力总公司热工研究院的教授级高工邓世敏同志对本书提出了许多宝贵意见。这里,我们一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中错误之处在所难免,恳请各位读者批评指正。

目 录

序言

第1章 绪论

- 1.1 前言 (1)
- 1.2 国内外发展状况 (1)

第2章 热力系统计算基础

- 2.1 概述 (3)
- 2.2 热力系统简捷计算方法 (3)
- 2.3 热力系统计算结果的检验 (6)
- 2.4 外部余热利用计算 (8)
- 2.5 热经济指标的变化及其关系 (9)

第3章 热力系统经济性诊断理论基础

- 3.1 概述 (13)
- 3.2 等效热降的基本原理 (13)
- 3.3 热力系统经济性诊断的基本法则 (18)
- 3.4 应用等效热降进行经济性诊断的条件 (26)

第4章 凝汽机组热力系统经济性诊断

- 4.1 概述 (28)
- 4.2 轴封渗漏及其利用系统的经济性诊断 (28)
- 4.3 抽气器系统的经济性诊断 (29)
- 4.4 厂用蒸汽系统的经济性诊断 (32)
- 4.5 除氧器联结系统的经济性诊断 (33)
- 4.6 蒸发器系统的经济性诊断 (36)
- 4.7 喷水减温系统的经济性诊断 (38)
- 4.8 排污及其利用系统的经济性诊断 (39)
- 4.9 再循环系统的经济性诊断 (41)

4.10 高加疏水切换的经济性诊断	(42)
4.11 加热器的经济性诊断	(43)
4.12 疏水冷却器的经济性诊断	(50)
4.13 疏水泵的经济性诊断	(52)
4.14 蒸汽冷却器的经济性诊断	(53)
4.15 冷凝器过冷度的经济性诊断	(57)

第5章 再热机组热力系统经济性诊断理论

5.1 概述	(59)
5.2 经济性诊断理论	(60)
5.3 再热机组热力系统经济性诊断理论的应用法则	(63)
5.4 再热机组热力系统经济性诊断	(68)

第6章 供热机组热力系统经济性诊断理论

6.1 引言	(70)
6.2 数学模型	(70)
6.3 λ 的计算方法	(73)
6.4 供热机组的经济性诊断方法	(75)
6.5 实例计算与检验	(76)

第7章 叠置电厂热力系统经济性诊断理论

7.1 引言	(80)
7.2 数学模型	(80)
7.3 多因素的经济性诊断方法	(83)
7.4 计算实例	(85)

第8章 回热加热器变工况经济性诊断方法

8.1 引言	(90)
8.2 运行标准值	(90)
8.3 加热器变工况运行的经济性诊断方法	(96)

第9章 火电机组运行参数经济性诊断的研究

9.1 引言	(99)
9.2 运行参数标准值的研究	(99)
9.3 运行参数经济性的诊断方法	(106)
9.4 滑压运行机组参数经济性诊断方法的研究	(119)

第 10 章 热电厂负荷分配方法的研究

10.1 引言	(126)
10.2 热电厂负荷分配的数学模型	(126)
10.3 热电厂热负荷分配方法的研究	(128)
10.4 热电厂电负荷分配方法的研究	(130)
10.5 热电厂负荷分配的实例	(131)

第 11 章 火电机组经济性诊断系统

11.1 引言	(133)
11.2 离线经济性诊断系统	(133)
11.3 离线经济性诊断系统的应用实例	(135)
11.4 在线经济性诊断系统	(142)
11.5 在线经济性诊断系统的应用	(147)

第 12 章 机组热力系统及经济性诊断的基础数据

12.1 凝汽机组	(152)
12.2 再热机组	(155)
12.3 供热机组	(170)

参考文献	(173)
------	-------

第 1 章 绪论

1.1 前言

能源工业是国民经济的基础产业,是实现现代化的物质基础,世界各国都把建立可靠、安全、稳定的能源供应保障体系作为国民经济的战略问题之一。我国是世界上能源蕴藏和能源生产大国,我国的一次能源生产居世界第三位,但人均能源占有量仅为世界人均值的 36% 左右。同时我国的能源利用率较低,目前仅为 32% 左右,与发达国家的能源利用率 40%~50% 相比,存在着较大的差距,而单位国民生产总值能耗却是发达国家的 3~4 倍。这就使得我国的能源供需矛盾十分突出。因此迫切需要加强能源管理,合理开发和有效利用能源。我国政府对能源问题十分重视,提出了“节约与开发并重,近期把节约放在优先地位”的能源方针政策,同时加强了节能工作的法制建设,大力推广节能降耗的先进技术,使我国的节能工作走向了法制化、科学化的轨道。

火力发电行业是一个不断将一次能源转化为二次能源的场所,是消耗一次能源的大户。每年我国都有 1/4 的煤炭用于发电。因此,在当前国家能源供应十分紧张的情况下,提高火力发电行业的节能意识,加强能源管理,降低煤耗具有十分重要的意义。1995 年我国总装机容量突破 2 亿 kW,位居世界前列,而火力发电平均供电煤耗率为 $410\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,比发达国家高出近 $80\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,由此可见节能潜力巨大。为此,原电力部制定了节能降耗规划和目标。降低煤耗率的方法有:新建高参数大容量机组,以替代低效的小机组;提高现有机组的运行水平,挖掘节能潜力,达到经济运行、节能降耗之目的等等。为了正确指导现行火电厂的节能降耗工作,必须有完整的经济性诊断理论和方法,才能有的放矢地采取措施,提高机组的运行经济性。

1.2 国内外发展状况

火电机组经济性诊断就是确定其主、辅机及热力系统运行参数和运行方式的经济性;定性分析运行方式、运行参数是否合理;定量分析运行参数标准值及偏离标准值对机组经济性指标的影响大小,以及各种运行方式、系统不合理的节能潜力大小。为确保火电机组的经济运行,对其经济性进行诊断是必不可少的重要环节,为此国内外在火电机组经济性诊断领域进行了大量研究和实践。

最早采用的经济性诊断方法是“小指标分析法”。该方法以其简单、方便等特点得到了广泛应用,但其定量结果粗糙,准确性不够。60 年代加拿大学者提出了“热偏差分析法”,在西欧、北美得到广泛应用。美国 EPRI 编写的“火电厂降低热耗率工作导则”中,将热偏差法作为定量分析诊断方法。80 年代起,该方法在我国也开始大量应用。热偏差法与小指标分析法相比,是一种“点”与“线”的关系。热偏差法在定量分析中,针对运行标准和定量偏差对经济指标

的影响大小考虑了不同负荷的情况,但其缺点是其数据大多来源于经验数据。80 年代我国基于等效热降理论提出的火电厂热力系统经济性诊断方法,已迅速得到推广应用,并取得了很大的经济效益。该方法是采用“等效热降”理论对经济性指标发生的偏差进行逐级分解,最后得出各项运行偏差对经济性的影响大小。它的特点是在进行热力系统经济性诊断时,考虑了热力系统各影响因素之间的相互影响。

火电机组热力系统定量分析是火电机组经济性诊断的重要组成部分和进行汽轮机组经济性诊断的有效手段。最早的火电机组热力系统计算方法是“常规热平衡法”,后经简化计算,改进发展为“简捷热平衡法”,这是热力系统计算的经典方法。此方法的特点是计算可靠,但计算过程繁琐、速度慢,在热力系统的局部变化经济性定量分析时需进行热力系统全面计算,计算工作量大。50 年代美国 Salisbury 提出的加热单元概念,由马芳礼教授创立了“循环函数法”,大大简化和方便了热力系统计算和分析。在 60 年代后期,苏联学者库兹涅佐夫 (A. M. Кузнецов) 首先提出了“等效热降法”,70 年代传入我国后,经西安交通大学的研究,得到了拓展,使其作为一种新的热工理论得以创造和完善。该方法以其快速、准确、简捷的特点成为火电厂热力系统局部定量分析的主要工具(参见文献[1])。“循环函数法”和“等效热降法”已成为目前我国火电机组热力系统定量计算的两种主要方法,并得到了广泛的应用,为我国火电行业节能工作作出了巨大贡献。20 世纪 30 年代初,焓的诞生及以后几十年的研究,使焓分析逐渐成熟。60 年代发展的一门新学科——焓经济学,在热力系统分析中也得到了一定程度的应用。

热力系统分析方法中,焓分析法是从能量“质”的角度进行分析,热平衡法和循环函数法是从能量“量”的平衡角度进行分析。而“等效热降法”的抽汽效率 η_j 的概念则有机地结合了能量的“质”和“量”,使其在热力系统的定量分析中显示了突出的优点。经过几十年的研究,该方法在解决凝汽、再热、供热机组的热力系统分析中已很完善,但对供热机组(尤其是最近十几年我国发展起来的再热供热机组)的热力系统还没有建立起如凝汽机组那样方便快速的定量分析模型,有待进一步完善。叠置机组在我国火电行业也占有一定比例,其热力系统较单元机组复杂得多,而到目前为止,还没有发现有关仔细研究其热力系统的局部定量分析方法的文献,因此有必要对此开展研究,以便叠置电厂的工程技术人员进行热力系统的分析和改进。

第2章 热力系统计算基础

2.1 概述

热力系统计算的目的在于确定热力系统各部分汽水的参数及流量、机组的功率和热经济性指标(汽耗率、热耗率、热效率和煤耗率等)。它是火电厂设计、运行和技术改造的一项基本运算,是热力工程的一件重要的技术工作,同时也是热力系统经济性诊断理论的基础。

热力系统计算最基本的方法是常规计算方法(具体计算过程可以参见文献[2])。热力系统常规计算方法比较繁琐,后经不断的改进,逐渐形成了热力系统简捷计算方法,这两种计算方法是热力系统的基本计算方法。本章主要介绍简捷计算方法的计算技巧和火电机组热经济指标之间的关系与计算方法。

2.2 热力系统简捷计算方法

热力系统简捷计算方法是在改进常规计算的过程中逐步形成的。它在计算方法和计算技巧上,对常规计算做了一些改进和加工。首先在原始数据整理上进行改进,把热力系统中繁多的热力参数整理为三类:第一类是给水在加热器中的焓升,以 τ_j 表示,按编号有 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_z$ (加热器编号方法是按加热器抽汽压力由低到高的顺序进行);第二类是蒸汽在加热器中的放热量,用 q_j 表示,按加热器编号有 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_z$, 以及其他汽源在加热器中的放热量 q_{fj} 等;第三类是疏水在加热器中的放热量,用 γ_j 表示,按加热器编号有 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_z$ 。其次,把加热器分成两类:一类是疏水放流式加热器,它们属于面式加热器,其疏水方式为逐级自流,如图 2.1 中的 No2, No4 加热器;另一类称汇集式加热器,包括混合式加热器和带疏水泵的面式加热器,其特点是疏水汇集于本加热器的进口或出口,如图 2.1 中的 No1, No3 加热器。在此需特别说明的是:如果 No1 加热器不带疏水泵,疏水自流入冷凝器,则属疏水放流式加热器(如图 2.2);但如果疏水自流并汇集于冷凝器热井或冷凝水泵的入口时由于疏水热量得以返回系统,则属于汇集式加热器(如图 2.3)。在整理原始数据时,根据加热器的类型不同,其加热器的 τ_j, q_j, γ_j 计算规定也各不相同。

对疏水放流式:

$$\left. \begin{aligned} \tau_j &= \bar{t}_j - \bar{t}_{j-1} \\ q_j &= h_j - \bar{t}_{sj} \\ \gamma_j &= \bar{t}_{s(j+1)} - \bar{t}_{sj} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

显然,其规定与常规计算完全相同。

对汇集式加热器:

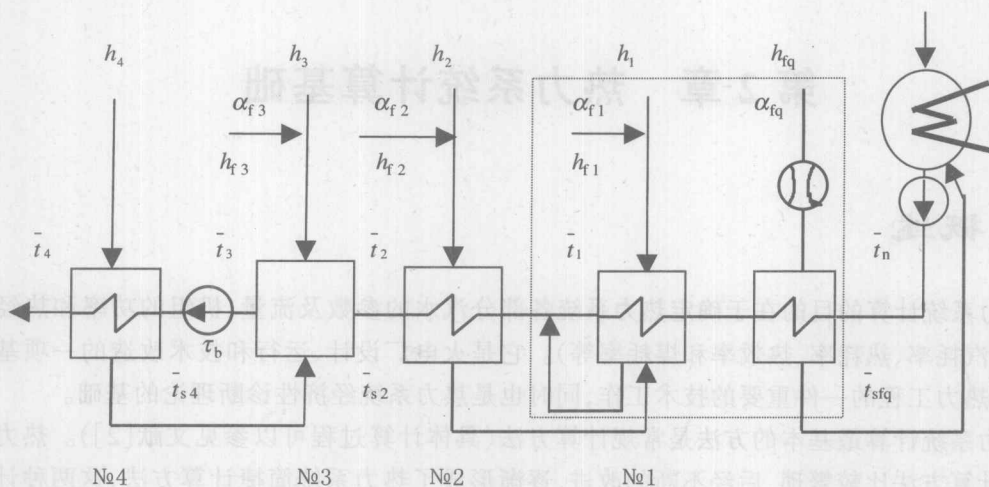


图 2.1 热力系统局部图

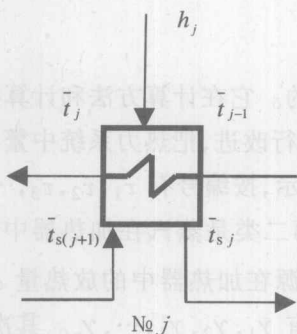


图 2.2 疏水放流式加热器

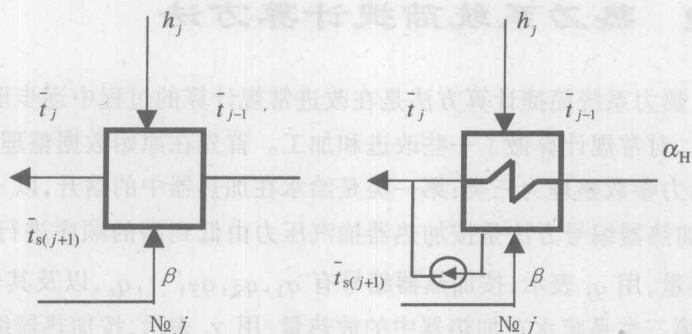


图 2.3 汇集式加热器

$$\left. \begin{aligned} \tau_j &= \bar{t}_j - \bar{t}_{j-1} \\ q_j &= h_j - \bar{t}_{j-1} \\ \gamma_j &= \bar{t}_{s(j+1)} - \bar{t}_{j-1} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

显然,这样的规定不同于常规方法。其特点在于将加热蒸汽与疏水在加热器中的放热,虚构过度地放到加热器的入口水焓。

- 上二式中: τ_j ——1kg 水在 No $_j$ 加热器中的焓升 [kJ/kg];
 q_j ——1kg 加热蒸汽在 No $_j$ 加热器中的放热量 [kJ/kg];
 γ_j ——1kg 疏水在 No $_j$ 加热器中的放热量 [kJ/kg];
 q_{tj} ——1kg 其他蒸汽在 No $_j$ 加热器中的放热量 [kJ/kg];
 $\bar{t}_j$ ——No $_j$ 加热器的出口水焓 [kJ/kg];
 h_j ——No $_j$ 加热器的抽汽焓 [kJ/kg];

$\bar{t}_{sj}$ ——No j 加热器排出疏水的焓 [kJ/kg];

h_{fj} ——其他蒸汽进No j 加热器的焓 [kJ/kg]。

根据以上规定,以图 2.1 系统为例,可将各种原始参数整理为:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \bar{t}_1 - \bar{t}_n & q_n &= h_n - \bar{t}_n & q_{f1} &= h_{f1} - \bar{t}_n & \gamma_1 &= \bar{t}_{s2} - \bar{t}_n \\ \tau_2 &= \bar{t}_2 - \bar{t}_1 & q_1 &= h_1 - \bar{t}_n & q_{f2} &= h_{f2} - \bar{t}_{s2} & \gamma_3 &= \bar{t}_{s4} - \bar{t}_2 \\ \tau_3 &= \bar{t}_3 - \bar{t}_2 & q_2 &= h_2 - \bar{t}_{s2} & q_{f3} &= h_{f3} - \bar{t}_2 & & \\ \tau_4 &= \bar{t}_4 - \bar{t}_2 & q_3 &= h_3 - \bar{t}_2 & q_{fq} &= h_{fq} - \bar{t}_{sq} & & \\ & & q_4 &= h_4 - \bar{t}_{s4} & & & & \end{aligned}$$

简捷计算中对疏水汇集式加热器的虚构处理,并不影响加热器的热平衡和物质平衡,却人为地造成了加热器进出口工质相等的条件,因而消除了一个未知数 α_H 。这样就简化了计算,避开了联立方程组的问题,使抽汽份额 α_j 的计算能由高到低(加热器编号采用低压向高压依次编排为 1,2,3,...,Z 的顺序)逐个地解出。关于虚构处理能减少一个未知数问题,可由图 2.3 混合式加热器证明如下:

该加热器的热平衡方程为:

$$\bar{t}_j = \alpha_j h_j + \beta \bar{t}_{s(j+1)} + \alpha_H \bar{t}_{j-1} \quad (2.3)$$

加热器的质量方程为:

$$\alpha_j + \alpha_H + \beta = 1 \quad (2.4)$$

将式(2.4)代入式(2.3)并化简,得:

$$\alpha_j = \frac{(\bar{t}_j - \bar{t}_{j-1}) - \beta(\bar{t}_{s(j+1)} - \bar{t}_{j-1})}{h_j - \bar{t}_{j-1}} \quad (2.5)$$

式中 β ——进入加热器No j 的疏水份额。

由(2.5)式看出,若令

$$\left. \begin{aligned} \tau_j &= \bar{t}_j - \bar{t}_{j-1} \\ q_j &= h_j - \bar{t}_{j-1} \\ \gamma_j &= \bar{t}_{s(j+1)} - \bar{t}_{j-1} \end{aligned} \right\} \text{即简捷计算的规定} \quad (2.2)$$

则:

$$\alpha_j = \frac{\tau_j - \beta \gamma_j}{q_j}$$

这就是说,这样规定 τ_j, q_j, γ_j 后,求汇集式加热器的抽汽份额 α_j 就不必联立方程组而能直接求得。

在简捷计算中应当指出的是:计算中所用的加热器出口水焓,对带疏水泵的汇集式加热器,是指混合后的焓值,即图 2.3 中的 $\bar{t}_j$,而不是混合点前的 $\bar{t}'_j$ 。 $\bar{t}_j$ 焓值是一个未知数,通常比 $\bar{t}'_j$ 高出 1~3.5kJ/kg,计算时可用逼近法渐次接近,即预先假定一个 $\bar{t}_j$,然后反复迭代逼近到满意的近似程度为止;其次,为了使整个计算更为简明,计算时把系统的各种附加成分,如轴封蒸汽的利用、抽汽加热器、轴封加热器、泵的焓升以及外部热源的利用等,分别归并入相应的加热器内,一律不再单独处理,也就是说,把加热器及其附加成分视为一个加热整体。其归并的原则是以相邻两个加热器的水侧出口为界限,凡在此界限内的一切附加成分都归并到界限内的加热器中。如图 2.1 中的No1 加热器,就应当把包括附加成分的虚线方块视为一个加热

整体,以减少热平衡方程,使 τ_j 的含义明确而有规律。这样,无论对手算或编程计算都很有利。

应当注意,附加成分的脚步标注应与加热器一致。如图 2.1 中的 No1 加热器轴封来汽和抽汽器来汽采用 $\alpha_{f1}, \alpha_{f4}, h_{f1}, h_{f4}$ 表达。它们在加热器中的放热量,因汽流在加热器中放热方式不同而异:

当附加成分与加热器蒸汽混合而直接放热时,其放热量与该加热器的 q_j 规定相同,以图 2.1 为例,有:

$$q_{f3} = h_{f3} - \bar{t}_2 \quad q_{f2} = h_{f2} - \bar{t}_{s2} \quad q_{f1} = h_{f1} - \bar{t}_n$$

当附加成分间接放热,即不与加热蒸汽混合时,其放热量就是该汽流的真实放热量,即图 2.1 中 α_{f4} 的放热为:

$$q_{f4} = h_{f4} - \bar{t}_{sf4}$$

经过上述加工处理的计算,其本质与热力系统的常规计算并无区别,但在计算形式和方法上做了一些技巧性的改进,从而收到了简单、明了的效果,且特别适宜于用计算机编程。

2.3 热力系统计算结果的检验

热力系统计算结果的检验包括两方面:一方面通过计算结果检验热力系统能否正常工作;另一方面要检验计算结果本身是否正确。这两方面的检验在热力发电厂类书籍中都有叙述,这里就不重复了。本节主要讲述计算结果检验的其他方法。

计算结果的正确性有两个含义。一是指计算的数字结果是正确的,即求解计算正确,精度符合要求。这可以通过回代方法得到检验,就是把求解得出的结果代回热平衡式、功率方程式或物质平衡式进行验算。二是指计算的热力结果是正确的,即计算的方法和过程在热力学上正确无误。后一检验往往更为重要,因为这方面的错误比较难于发现。比如计算中由于计算公式、计算方法或原始数据整理有误,但只要运算正确,其计算的数字结果是可以验证通过的。显然,此时数字结果虽然正确,但热力结果可能是错误的。因此,还应进行热力结果是否正确的检验。

计算结果的热力检验可以用热耗率平衡进行检验。根据热力学第一定律有:

$$q = 3600 + q_{on} + q_{jd} + q_{sz} - q_{ob} \quad [\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$$

式中 q ——热耗率 $[\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$;

q_{on} ——在冷凝器表现出来的冷源损失 $[\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$;

q_{jd} ——汽轮发电机组的机械损失和电机损失 $[\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$;

q_{sz} ——各种热力设备和管道的散热损失 $[\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$;

q_{ob} ——给水在泵内焓升的热量 $[\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$ 。

它们的计算公式分别是:

$$q_{on} = d(\alpha_n q_n + \sum \alpha_i q_{in}) \quad [\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$$

$$q_{jd} = 3600 \left(\frac{1}{\eta_{ix} \eta_d} - 1 \right) \quad [\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$$

$$q_{sz} = d \left(\sum_{r=1}^z \alpha_r q_r \zeta + \sum q_i \right) \quad [\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$$

$$q_{ob} = d\tau_b \quad [\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$$

式中 α_n ——汽轮机的纯凝汽流份额;
 q_n ——汽轮机 1kg 排汽在凝汽器的放热量 $[\text{kJ}/\text{kg}]$;
 α_i ——进入冷凝器的其他汽、水流份额;
 q_{in} ——1kg 其他汽、水流在凝汽器中的放热量 $[\text{kJ}/\text{kg}]$;
 η_{jx}, η_d ——机械效率和电机效率;
 ζ ——散热损失系数, $\zeta = 1 - \eta_m$, η_m 为加热器利用系数;
 $\sum q_i$ ——其他散热损失;
 d ——汽轮机的汽耗率 $[\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$ 。

这样计算出的 q 应与热力系统计算的热耗率一致(由于计算误差可能不会完全相符,包括有效数字和四舍五入等原因导致),这不仅表明数字计算是正确的,而且表明计算的热力结果也是正确的,即计算方法和计算公式在热力学上都完全正确。

计算结果热力检验的另一种方法是反平衡计算。热力系统的反平衡计算系指机组的作功和热经济指标采用反平衡方法计算。这种反平衡计算的理论依据是热力学第一定律,即循环加入的热量扣除各种损失后所剩余的就是循环作功。据此,1kg 工质的循环作功,用反平衡方程表达为:

$$N_i = Q - \sum Q_n \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

式中 Q ——循环的吸热量 $[\text{kJ}/\text{kg}]$;
 $\sum Q_n$ ——各种损失的总和 $[\text{kJ}/\text{kg}]$ 。

$$Q = h_0 - \bar{t}_{gs} \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

式中 h_0 ——蒸汽初焓 $[\text{kJ}/\text{kg}]$;
 $\bar{t}_{gs}$ ——锅炉给水焓 $[\text{kJ}/\text{kg}]$ 。

若用正平衡计算,则循环功等于汽轮机膨胀功减去水泵耗功,即:

$$N_i = N_{ip} - \tau_b \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

式中 N_{ip} ——汽轮机的膨胀功 $[\text{kJ}/\text{kg}]$;
 τ_b ——给水泵的压缩功,等于给水泵的焓升 $[\text{kJ}/\text{kg}]$ 。

给水在泵内的焓升可按下式计算:

$$\tau_b = \frac{\nu_p(P'_b - P''_b) \times 10^3}{\eta_b} \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

式中 ν_p ——水在泵内的平均比容;
 P'_b ——水泵入口压力;
 P''_b ——水泵出口压力。

按各股汽流实际焓降计算膨胀功,则循环功为:

$$N_i = \sum_{r=1}^z \alpha_r H_r + \sum \alpha_i H_i - \tau_b \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

式中 α_r ——汽轮机任意回热抽汽流的份额;
 H_r ——任意回热抽汽在汽轮机中的实际焓降 $[\text{kJ}/\text{kg}]$;
 z ——回热加热级数;

α_i ——回热抽汽以外的其他汽流的份额；

H_i ——其他汽流在汽轮机中的实际焓降 $[\text{kJ/kg}]$ 。

显然,如果热力系统计算结果正确,则:

$$Q - \sum Q_n = \sum_{r=1}^z \alpha_r H_r + \sum \alpha_i H_i - \tau_b$$

对实际循环效率,用正、反平衡计算也应相等,即:

$$\eta_i = \frac{Q - \sum Q_n}{Q} = \frac{\sum_{r=1}^z \alpha_r H_r + \sum \alpha_i H_i - \tau_b}{Q}$$

否则正、反平衡计算结果不能相符。应当指出,反平衡计算中, $\sum Q_n$ 是一个广义的冷源损失,它不仅包括排汽 α_n 的冷源损失,还应包括各加热器和管道的散热损失,疏水自流在冷凝器中的放热损失,轴封汽的散热损失以及漏入冷凝器的热损失等。其他汽流的作功 $\sum \alpha_i H_i$,包括直达冷凝器的凝汽流的作功,各种轴封漏汽在渗漏前的作功,以及暖风器、抽汽加热燃料和其他厂用汽的作功等。

2.4 外部余热利用计算

火电厂热力循环的外部存在各种余热,如冷却发电机的热量、冷油器带走的热量等,均属热力循环外部余热。把外部余热引入热力系统,加以合理的利用是提高电厂经济性、节约能源的一条有效途径。

以发电机冷却热量利用为例进行计算。在发电机损失功率 ΔN_d 或电机效率 η_d 已知时,冷却发电机时带走的热量可按下式计算:

$$Q_{dy} = \Delta N_d \zeta \quad [\text{kW}]$$

式中 ζ ——电机损失热量的利用系数,可取 0.85~0.9。

外部余热引入热力系统时,在正平衡计算中自然反映了它的作功,在反平衡计算中,该余热利用产生的冷源损失也自然反映在冷源损失的计算中了。这时,如果把余热利用视为加入热量的一部分,则循环吸热量为:

$$Q' = Q + \sum Q_y \quad [\text{kJ/kg}]$$

式中 Q ——循环加入热量,即锅炉加入的热量;

$\sum Q_y$ ——循环外部加入的各种余热。

这时循环效率的计算:

$$\text{对反平衡} \quad \eta_i = \frac{Q' - \sum Q_n}{Q'} = \frac{Q + \sum Q_y - \sum Q_n}{Q + \sum Q_y}$$

$$\text{对正平衡} \quad \eta_i = \frac{\sum_{r=1}^z \alpha_r H_r + \sum \alpha_i H_i - \tau_b}{Q'} = \frac{\sum_{r=1}^z \alpha_r H_r + \sum \alpha_i H_i - \tau_b}{Q + \sum Q_y}$$

由此求得的循环效率 η_i 一般是降低的,原因是余热一般属于低能级热量,可转变为功的部分不大,其份额比原循环小,大部分变成了冷源损失,因此冷源损失相对增大,循环效率降

低。如果把余热作废热处理,即只计它的功,而不计循环热量的增加,这时循环效率就会表现为增加,这是由于只计做功收益而不计热量支出的缘故。显然,这样带来的好处在于余热利用后的经济指标提高,有利于节能的开展和促进余热利用。其循环效率的计算如下:

$$\text{正平衡计算} \quad \eta_i = \frac{\sum_{r=1}^n \alpha_r H_r + \sum \alpha_i H_i - \tau_b}{Q}$$

$$\text{反平衡计算} \quad \eta_i = \frac{Q + \sum Q_y - \sum Q_n}{Q + \quad}$$

2.5 热经济指标的变化及其关系

热力设备的完善程度,电厂热经济性的好坏,通常用热经济指标来表征。常用的热经济指标有:实际循环效率 η_i 、汽轮机装置的热耗率 q 和电厂标准煤耗率 b 。

2.5.1 热经济指标变化之间的关系

热力设备经济性的变化可以用上述指标的绝对变化和相对变化来表示。

$$\text{绝对变化:} \quad \left. \begin{aligned} \Delta \eta_i &= \eta_i - \eta_i' \\ \Delta q &= q' - q \\ \Delta b &= b' - b \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

它表示这些指标变化的绝对量,即通常所说的煤耗降低了多少克,热耗降低了多少千焦。

$$\text{相对变化是:} \quad \delta \eta_i = \frac{\Delta \eta_i}{\eta_i} \times 100 \quad \text{或} \quad \delta \eta'_i = \frac{\Delta \eta_i}{\eta_i} \times 100 \quad [\%]$$

$$\delta q = \frac{\Delta q}{q} \times 100 \quad \text{或} \quad \delta q' = \frac{\Delta q}{q} \times 100 \quad [\%]$$

$$\delta b = \frac{\Delta b}{b} \times 100 \quad \text{或} \quad \delta b' = \frac{\Delta b}{b} \times 100 \quad [\%] \quad (2.7)$$

它表示这些变化的相对量,即变化的百分数。这就是工程中常说的经济性提高了百分之几,热耗下降了百分之几,煤耗降低了几个百分点等。

在经济性变化不大时,有:

$$\left. \begin{aligned} \delta \eta_i &\approx \delta \eta'_i \\ \delta q &\approx \delta q' \\ \delta b &\approx \delta b' \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

其中带“'”者表示变化后的值。

讨论热经济性问题时,有些地方用 $\delta \eta_i$,有些地方用 δq 或 δb 表达经济性的变化。在各种文献中也有同样情况,甚至讨论同一问题,有的文献说热耗降低了百分之几,有的说燃料节省了百分之几或热耗率提高了百分之几等等。这种情况的出现,是由于有时用 $\delta \eta_i$ 表示较方便,有时用 δq 计算较容易等原因,甚至有些纯系作者的习惯所致。所有这些,对热经济性的分析都无妨碍,重要的是搞清它们之间的关系究竟怎样。这是在生产实践、技术经济比较中需要了

解和明确的问题。下面对此问题进行理论推导和讨论。

根据热经济分析的基本知识,各种热经济指标之间的变化关系,可推导如下: