

# 用等效热降法确定排汽压力变化对机组经济性的影响

(西安交通大学动力系统工程研究所) 李秀云 严俊杰 林万超

**摘要:** 针对排汽压力变化对机组经济性的影响, 提出一种新的定量方法——排汽压力等效热降算法。该方法以汽轮机变工况为基础, 应用等效热降的理论确定排汽压力变化对机组经济性的定量影响。实例计算表明, 该方法简捷准确, 实用性强, 其计算误差小于工程上现有的计算方法。

**关键词:** 排汽压力; 定量方法; 经济性; 等效热降

中图分类号: T K212.4

## 1 前言

汽轮机组经济性诊断中, 排汽压力是影响机组出力 and 热耗率的重要参数。由于机组负荷、循环水入口温度、循环水量、凝汽器的运行状况等因素的千变万化, 机组的排汽压力在运行中经常偏离基准值, 即使对机组进行校核性热力试验时, 也很难将背压调整到基准值, 因此, 研究排汽压力对机组功率和煤耗的影响就成为经济性分析中的关键课题。目前工程上常用的确定方法: 一种是曲线法<sup>[1]</sup>, 利用汽轮机制造厂给出的特定工况下排汽压力对功率和热耗率的修正曲线, 通过查曲线得到热耗和功率的相对变化量。而当机组热力系统结构发生变化或机组运行年久老化查用原设计提供的曲线将产生较大的误差, 对于通流部分改造后的机组更不适合查用原曲线, 因而限制了曲线法的应用。另一种是热力学方法<sup>[2]</sup>, 它是以汽轮机装置的基本热力循环为基础, 通过对汽轮机循环热效率和内效率的修正, 达到确定机组经济性指标变化的目的。热力学方法忽略机组热力系统的特点和负荷特性, 没有考虑加热器抽汽量变化对做功的影响, 因而使用该方法也产生较大的误差。本文基于工程上使用上述两方法的局限性, 提出一种新的定量计算方法。该方法以汽轮机组变工况计算为基础, 利用常规方法确定背压变化后的排汽点, 根据等效热降理论确定背压变化对经济指标的

影响。它既考虑机组变工况特性, 又考虑了热力系统抽汽量变化对经济性的影响, 是一种物理意义清晰、计算简捷准确的局部定量计算方法。

## 2 排汽压力等效热降定量法的理论分析

汽轮机的变工况计算通常都是逐级进行的详细计算, 其准确性、可靠性较高, 但计算较繁杂, 所需的原始资料繁多。虽然使用电算将使这种计算变得方便, 但与热力系统计算的任务相比仍然繁重, 有时会因为原始资料不足而无法进行计算。研究排汽参数变化对经济性影响只需要各抽汽口和排汽口的热力参数, 不必要了解各级的详细工况。因此, 本文应用文献 [3] 和文献 [4] 介绍的方法确定机组热力系统变工况和背压变化后的排汽参数。在此基础上应用等效热降方法确定排汽压力变化对机组经济性的影响。

在机组流量一定的条件下, 排汽压力偏离基准值是机组运行中经常出现的情况, 寻找准确、简捷的计算方法一直是工程界渴望解决的课题。等效热降法是在常规热平衡基础上发展起来的热力系统定量分析方法, 它借助几个热力分析参量 ( $H$  和  $Z$  等), 使热力参数或局部热力系统的变化通过局部定量计算确定对机组经济性的影响。应用等效热降的基本原理研究排汽压力的定量计算方法是等效热降法的拓展。

汽机排汽压力变化对机组做功的影响可以从两方面来考虑, 其一是排汽焓变化, 引起机组有效焓降做功量的变化, 其二是凝结水温度的改变, 引起最末一个低压加热器抽汽量的变化, 从而影响了做功量。如图 1 所示, 应用等效热降的基本原理定量分析上述两部分做功变化规律。当机组排汽压力升高时, 机

收稿日期: 1998-10-22 修订日期: 1998-11-30

作者简介: 李秀云 (1962-), 女, 副教授, 主要研究电厂热力系统节能理论与诊断技术。通讯处: 710049 西安交通大学动力系统工程研究所

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

组排汽焓变化  $\Delta h_c = h'_c - h_c$ , 因为这部分焓降是  $T$  公斤蒸汽在汽轮机内的有效作功焓降, 它直接导致新蒸汽作功减少:  $\Delta H_{01} = T_n \cdot (h'_c - h_c)$  (1)

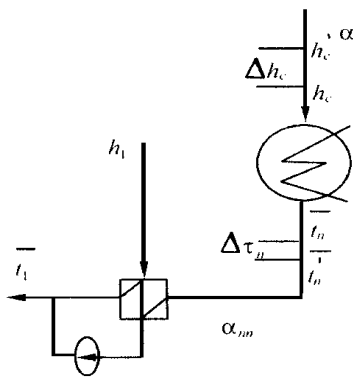


图 1 排汽压力做功分析系统图

另一部分是凝结水温升引起的新蒸汽作功变化, 它类似于凝结水过冷度的分析方法, 由于 No 1 加热器的抽汽压力不变, 加热器的出口水温不变, No 1 加热器的焓升变化  $\Delta t_n = \bar{t}_n - \bar{t}_n$ , 将使 No 1 加热器的热耗量减少  $T_m \cdot \Delta t_n$ , 减少抽汽

量以保证  $\bar{t}_1$  不变, 按等效热降原理, 相当于纯热量  $T_m \cdot \Delta t_n$  进出 No 1 加热器系统, 引起新蒸汽等效热降增加,

$$\Delta H_{02} = T_m \cdot \Delta t_n \cdot Z_1 \quad (2)$$

式中  $T_m$  为通过 No 1 加热器的凝结水流量份额,  $Z_1$  为排汽压力变化后的 No 1 加热器的抽汽效率, 它视 No 1 加热器的型式而定; 当 No 1 加热器是疏水放流式, 由于 No 1 加热器的抽汽压力不变, 其加热器的疏水温度和疏水焓不变, 故

$$q_1 = q'_1 = h_1 - \bar{t}_{s1}, Z_1 \text{ 可由下式表示:}$$

$$Z_1 = \frac{H_1}{q_1} = \frac{h_1 - h_c}{q_1} = \frac{h_1 - h_c - (h'_c - h_c)}{q_1}$$

$$= \frac{H_1}{q_1} \left(1 - \frac{\Delta h_c}{H_1}\right) = Z_1 \left(1 - \frac{\Delta h_c}{H_1}\right) \quad (3)$$

当 No 1 加热器是汇集式加热器时,  $q'_1 = h_1 - \bar{t}_n = h_1 - \bar{t}_n - (\bar{t}_n - \bar{t}_n) = q_1 - \Delta t_n$

$Z_1$  则可由下式确定:

$$Z_1 = \frac{H_1}{q_1} \frac{q_1}{q_1} = Z_1 \left(1 - \frac{\Delta h_c}{H_1}\right) \left(\frac{q_1}{q_1 - \Delta t_n}\right) \quad (4)$$

因此, 排汽压力降低引起的新蒸汽等效热降变化为:

$$\Delta H = \Delta H_{02} - \Delta H_{01}$$

$$= T_m \Delta t_n \cdot Z_1 - T_n \Delta h_c \quad (5)$$

装置效率的相对变化:

$$WZ_1 = \frac{\Delta H}{H \pm \Delta H} \quad (6)$$

由文献 [4] 可知, 热耗率和标准煤耗率的变化为

$$\Delta q_{th} = q_{th} \cdot WZ_1 \quad (7)$$

$$\Delta b_b = b_b \cdot WZ_1 \quad (8)$$

式中  $H, q_{th}, b_b$  均为流量  $D$  对应的运行工况下机组的新蒸汽净等效热降, 机组的热耗率和机组的标准煤耗率, 综上所述, 当已知运行工况的等效热降参数 ( $H, Z_1$ ) 和排汽压力变化引起的  $\Delta h_c, \Delta t_n$  时, 就可以利用式 (5) ~ (8) 定量计算机组效率的相对变化以及热耗率和煤耗率的绝对变化值

### 3 计算实例分析与讨论

应用本文提出的等效热降定量计算方法, 对国产 200 MW 机组进行实例分析, 计算排汽压力变化对机组煤耗率的影响程度, 见表 1 和表 2 为了与其它方法进行比较, 首先表中给出了常规热平衡详细计算方法在各排汽压力下准确计算结果, 并以此为基准, 比较其它三种方法计算精度。同时表中还给出了应用文献 [1] 和文献 [2] 的方法在相同的条件下得到机组标准煤耗率的变化及相对误差, 表 1 为额定工况下排汽压力变化对经济性指标的影响, 表 2 为 80% 负荷工况下排汽压力变化对经济性指标的影响程度。

由表 1 可见, 在额定工况下, 等效热降法的计算值和常规热平衡方法的计算结果非常接近, 以常规热平衡的计算结果为基准, 等效热降方法求得煤耗率的相对误差小于  $\pm 3.9\%$ ; 而曲线法的相对误差的绝对值平均达 48.2%, 个别点相对误差高达 -74.3%; 热力学方法的各项误差更是远大于上述三种方法, 个别点已超出工程允许范围 (在 0.005 MPa 点) 表 2 也揭示了同样的结论, 在 80% 的负荷工况下, 等效热降方法得到煤耗率的最大相对误差只有 1.32%, 在同一压力下应用曲线法查得热耗率相对变化和额定工况相同, 煤耗率的相对误差全部为负值, 说明曲线法求得的煤耗率均小于常规热平衡的计算结果, 特殊点的相对误差高达 -65.2%; 热力学方法由于忽略因素较多, 煤耗率的变化趋势和常规热平衡的计算结果相反, 且相对误差大多数已超出工程允许的范围。计算结果表明, 等效热降方法的计算精度远优于曲线法和热力学方法, 同常规热平衡法的吻合程度达到令人满意的结果, 其误差完全能够满足工程上的需要

表 1 额定工况下排汽压力变化对经济性指标的影响

排汽压力 $P'_c$	0.008MPa		0.007MPa		0.006MPa		0.005MPa		0.004MPa	
	绝对变 化量	相对 误差	绝对变 化量	相对 误差	绝对变 化量	相对 误差	绝对变 化量	相对 误差	绝对变 化量	相对 误差
煤耗率变化 $\Delta b_b$	g/(kW·h)		g/(kW·h)		g/(kW·h)		g/(kW·h)		g/(kW·h)	
	%		%		%		%		%	
常规热平衡法	3.997	0.0	1.993	0.0	0.421	0.0	-0.076	0.0	2.22	0.0
等效热降方法	4.040	1.08	2.009	0.80	0.421	0.0	-0.073	-3.95	2.28	2.70
曲线法	3.497	-12.5	1.423	-28.6	0.65	54.4	-0.13	-71.1	0.57	-74.3
热力学方法	2.284	-28.4	1.158	-41.9	0.048	-88.6	0.354	565.8	4.26	91.89
运行工况	基准值: $P_c = 0.0054 \text{ MPa}, D = 610 \text{ t/h}, b_b = 325.3 \text{ g/(kW·h)}$									

表 2 80% 负荷工况下排汽压力变化对经济性指标的影响

排汽压力 $P'_c$	0.008/MPa		0.007/MPa		0.006/MPa		0.005/MPa		0.004/MPa	
	绝对变 化量	相对 误差	绝对变 化量	相对 误差	绝对变 化量	相对 误差	绝对变 化量	相对 误差	绝对变 化量	相对 误差
煤耗率变化 $\Delta b_b$	g/(kW·h)		g/(kW·h)		g/(kW·h)		g/(kW·h)		g/(kW·h)	
	%		%		%		%		%	
常规热平衡法	8.24	0.0	5.44	0.0	2.73	0.0	0.414	0.0	-0.587	0.0
等效热降方法	8.35	1.32	5.51	1.28	2.76	1.01	0.415	0.24	-0.590	0.51
曲线法	6.701	-18.7	4.846	-10.9	2.656	-2.7	-0.164	-60.3	-0.204	-65.2
热力学方法	2.24	72.8	-0.18	-103.	-2.27	-191.	-4.21	1117.	-4.18	612
运行工况	基准值: $P_c = 0.0046 \text{ MPa}, D = 490 \text{ t/h}, b_b = 327. \text{ g/(kW·h)}$									

由此可以得出,常规热平衡详细计算方法虽然计算精度高,但涉及的变量较多,计算繁琐费时,曲线法虽然能满足工程需要,但随着机组通流部分改造和热力系统变更以及机组老化等因素的影响,该方法的使用受到一定的限制。热力学方法因忽略因素较多,误差已超出工程允许的范围,目前工程上已很少采用。等效热降法在常规变工况的基础上,只采用局部定量计算,就可以获得和常规热平衡详细计算方法相近的计算精度。该方法的实用性强,适用面广,无论是汽机通流部分改造或热力系统设备变动后的机组,还是因运行年久老化机组性能变化较大或无背压变化修正曲线的机组,这时,只要借助汽轮机组的热力试验的数据进行变工况计算,然后,都可以采用该方法确定对经济性的影响。因此,排汽压力的等效热降算法不仅可以避免常规热平衡方法繁琐的计算过程,而且通过简单的计算步骤,就能准确地确定经济性指标的变化,为工程界解决实际问题提供了一种简捷的途径。

#### 4 结论

本文应用等效热降的基本原理,经过理论分析和数学推导,针对机组排汽压力变化,提出了一种新的定量计算方法。这种方法是以前汽轮机变工况为基础,应用等效热降理论确定机组排汽压力变化对经济性影响的一种方法。该方法可用于确定各种工况下排汽压力变化对机组经济性指标的定量影响。计算分析表明,等效热降法的计算结果和常规热平衡计算结果得到了很好的吻合,煤耗率的相对误差小于目前工程上使用的方法。这一方法具有广泛的适用性,为热力系统终参数节能诊断提供了简捷途径。

#### 参考文献

- [1] CC140/N 200-130/535/535型汽轮机热力特性,哈尔滨汽轮机厂,1986.
- [2] 赵伟光. 电厂汽轮机热力试验. 东北电力试验研究院, 1992: 70~75.
- [3] 蔡颐年. 蒸汽轮机. 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 215~218.
- [4] 林万超. 火电厂热力系统节能理论. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.

(复 编)

〔刊,中〕/Huang Jintao, Chen Tingkuan (Xi'an Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 340~ 342

Based on process basic equations, the authors have set up a dynamic characteristics model for single-phase spiral and vertical tube coils. By way of secondary model building obtained is a group of differential equations, which can be solved directly. The comparison of theoretical results and experimental curves attests to the validity of the above-cited model. The results given in this paper may serve as reference data and information during the further study of the dynamic characteristics of once-through boiler spiral tube-coil water walls. **Key words** spiral tube coil, dynamic characteristics, integrated parameters, differential equation group

应用激光多普勒测速仪研究湍流有旋自由射流 = **Research on Turbulent and Swirling Free Jet Stream with the Help of a Laser Doppler Anemometer**〔刊,中〕/Xiao Kejian (East China University of Science & Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 343~ 346

An experimental research is conducted of a movable block swirler-produced velocity field and turbulent flow field of a strongly turbulent and swirling free jet stream. The results of study show that this type of swirler is highly conducive to the formation of a central recirculation zone. The average velocity of the jet stream assumes along the axial direction a rapid decrease with the swirling free jet exhibiting an anisotropic turbulence, especially in the recirculation zone. Also discussed in the paper is the transmission direction of the turbulent flow momentum in the flow field. **Key words** turbulent and swirling free jet, laser Doppler anemometer, average velocity distribution, turbulent flow field

汽轮机通流部分故障诊断的热力判据研究 = **A Study of the Thermodynamic Criteria for the Failure Analysis of Steam Turbine Flow Path Components**〔刊,中〕/Yang Yongping, et al (North China Electrical Power University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 347~ 349

A systematic analysis and study is conducted of the four categories of thermodynamic criteria (i. e., relative inner efficiency, exergy efficiency, equivalent flow path area and included angle of expansion lines) generally applied to the failure diagnosis of steam turbine flow path components. The mechanism of diagnosis and a method of execution are proposed for each kind of criteria. In addition, taking the 200 MW power generating unit of a power plant as a specific example, the authors have performed a quantitative analysis and computation concerning the above-cited criteria. **Key words** steam turbine, flow path components, failure diagnosis, thermodynamic criteria

膜式壁上稳态热流测量技术的误差分析 = **Error Analysis of the Technique for Measuring Steady-State Heat Flux on Membrane Water-walls**〔刊,中〕/Fang Zhaohong, Liu Xiaolei (Shandong Institute of Civil Engineering), Yue Guanxi (Qinghua University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 350~ 352

This paper focuses on a new approach for measuring heat flux density on a solid wall surface by way of solving inverse heat conduction problems. On this basis the authors have by means of a numerical simulation method further discussed from a theoretical perspective the effect of various factors of the heat conduction system itself on the error of this measuring method. Some guidelines concerning the practical use of this method are also presented. **Key words** heat flux measurement, error analysis, number of conditions

用等效热降法确定排汽压力变化对机组经济性的影响 = **Determination of the Impact on Machine unit Economic Performance of Exhaust Steam Pressure Variation by an Equivalent Enthalpy Drop Method**〔刊,中〕/Li Xiuyun, Yan Junjie, et al (Xi'an Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 353~ 355

With regard to the impact on machine unit economic performance of exhaust steam pressure variation a new quantitative method, i. e., exhaust pressure equivalent enthalpy drop calculation method, is expounded in this paper. On the basis of steam turbine off-design operating conditions the proposed method determines