

DOI: 10.7652/xjtuxb201311005

采用喷射式热泵提高火电机组给水温度的理论研究

李千军¹, 刘光耀², 韩伟³, 刘继平³

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 510080, 广州; 2. 华电电力科学研究院, 310030, 杭州;

3. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了解决低负荷运行时锅炉给水温度下降的问题,在回热系统中引入喷射式热泵,再利用主蒸汽引射压力回热抽汽,使混合蒸汽进入低负荷加热器后为给水加热,以提高给水温度。研究发现:当引射比增加时,混合蒸汽压力逐渐下降,且存在使机组热效率最高的最佳引射比;对于某 660 MW 超临界空冷机组的 60% 负荷工况,最佳引射比为 0.65,给水温度提高 36.4℃,机组发电煤耗率下降 1.2 g/(kW·h);在最佳引射比附近,当引射比变化时,系统节能效果变化比较平缓。系统设计时,根据脱硝装置的要求,考虑低负荷加热器的成本,合理选择引射比可获得最佳的经济性及节能减排效果。

关键词: 喷射式热泵;回热系统;热经济性

中图分类号: TK262 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)11-0025-04

Heating Feedwater of Thermal Power Units Using Jet Heat Pump

LI Qianjun¹, LIU Guangyao², HAN Wei³, LIU Jiping³

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Grid Corporation of China, Guangzhou 510080, China;

2. China Huadian Electric Power Research Institute, Hangzhou 310030, China; 3. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The feedwater temperature of thermal power units always decreases with the electricity load. In order to solve this problem, an ejector heat pump has been integrated with a regenerative system in this study. The live steam is used to inject the extraction steam of the regenerative system, and then the mixture steam is led to an added heater (low load condition heater) to heat the feedwater. The results of our study show that the pressure of the mixture steam decreases with an increase in the entrainment ratio, and an optimum entrainment ratio exists. For a 660 MW supercritical air cooling unit, when the load ratio is 60%, the optimum entrainment ratio is 0.65 and the feedwater temperature rises by 36.4℃, and the standard coal consumption rate decreases by 1.2 g/(kW·h). When the value of the entrainment ratio approaches the optimum value, the energy-saving effect changes gently with the change in the entrainment ratio. Our results indicate that the requirement of the selective catalytic reduction (SCR) devices and the cost of the low load condition heater should be comprehensively considered in choosing the entrainment ratio so as to achieve the optimum technique-economics and energy-saving effect when the systems are designed.

Keywords: steam jet heat pump; regenerator system; thermo-economy

收稿日期: 2013-01-10。 作者简介: 李千军(1987—),男,博士生;刘继平(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 科技支撑计划资助项目(2011BAA04B03-01);国家自然科学基金资助项目(51176147)。

网络出版时间: 2013-09-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130923.1049.006.html>

据中国电力企业联合会及国家电力监管委员会统计^[1-2],近年来我国火电机组年平均利用小时数在 5 000 左右,机组负荷率多低于 70%,其中大部分机组负荷率常年低于 60%,在全生命周期中机组处于变工况运行的时间比已达 70%。

火电机组低负荷运行时,汽轮机主蒸汽流量下降,各级回热抽汽压力下降,给水温度降低。对于某 660 MW 超临界空冷机组^[3],其热耗率验收(THA)工况的给水温度为 273.3℃,60%负荷时的给水温度为 242.7℃,下降了 30.6℃。给水温度下降时,循环吸热温度下降,机组发电煤耗率升高^[4]。

给水温度下降除了影响热经济性之外,还使得火电机组的 NO_x 排放增加,因为给水温度下降,省煤器出口烟气温度下降,从而影响烟气脱硝(SCR)装置的脱硝效果^[5]。为了解决该问题,将高温烟气与省煤器出口烟气进行混合可保证脱硝效果,但这种方法增加了系统成本,机组运行比较复杂,从而导致发电煤耗率上升^[6]。

蒸汽喷射式热泵是以蒸汽减压前后的能量差为动力,利用高压蒸汽通过喷嘴产生的高速气流来引射低压蒸汽,高压蒸汽在膨胀的同时压缩低压蒸汽,这样通过高压蒸汽的裕压提高了低压蒸汽的品位。经混合室混合后的高压、低压混合蒸汽由扩压室可恢复部分压力损失,使混合蒸汽压力达到要求^[7-8]。这种热泵结构简单,无运动部件,工作过程安全、可靠^[9],已被广泛应用于制冷、海水淡化、天然气开采等领域。

本文提出了一种低负荷给水加热系统,该系统引入了喷射式热泵,利用主蒸汽引射压力回热抽汽,使得混合蒸汽进入低负荷加热器后为给水加热,以提高给水温度。该系统既可保证低负荷时 SCR 装置的脱硝效果,还可提高机组的热经济性,降低低负荷下的发电煤耗率。

1 数学模型

本文采用喷射式热泵的低负荷给水加热系统如图 1 所示。该系统包括喷射式热泵、低负荷给水加热器、主蒸汽阀、被引射蒸汽阀、混合蒸汽阀及低负荷给水加热器疏水阀。喷射式热泵所需的主蒸汽来自主蒸汽管道,经主蒸汽阀进入喷射式热泵。被引射蒸汽来自汽轮机压力最高的回热抽汽,其由回热抽汽管引出,经被引射蒸汽阀后进入喷射式热泵。主蒸汽在喷射式热泵内将被引射蒸汽压缩,混合蒸汽经混合蒸汽阀进入低负荷加热器,并为锅炉给水

加热,由此产生的疏水经过疏水管道及疏水阀流入机组热力系统。

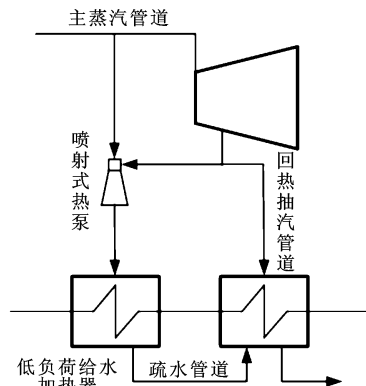


图 1 采用喷射式热泵的低负荷给水加热系统

1.1 喷射式热泵的数学模型

喷射式热泵的结构如图 2 所示。高压蒸汽经高压喷嘴膨胀后形成高速气流,并在混合段与低压蒸汽充分混合,混合蒸汽经扩压段形成的压力介于高压蒸汽与低压蒸汽之间。

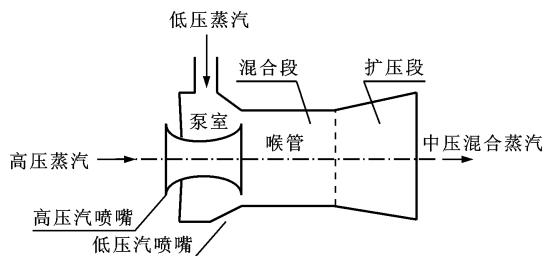


图 2 喷射式热泵的结构

工作蒸汽在喷嘴内的膨胀过程是将蒸汽的焓转化为动能的过程,其能量守恒表达式为

$$h_1 - h_{1et} = \frac{1}{2} u_1^2$$

由此蒸汽喷嘴理论出口速度为

$$u_1 = (2(h_1 - h_{1et}))^{1/2}$$

实际的膨胀过程需要考虑能耗,因此引入喷嘴内的速度系数 ϕ 得到高压蒸汽进入混合段的速度为

$$u_1 = (2\phi(h_1 - h_{1et}))^{1/2} \quad (1)$$

式中: h_1 、 h_{1et} 分别为高压蒸汽进口的焓值及高压蒸汽喷嘴出口的等熵焓值; ϕ 取 0.95。

同理,低压蒸汽进入混合段的速度为

$$u_2 = (2\phi(h_2 - h_{2et}))^{1/2} \quad (2)$$

式中: h_2 、 h_{2et} 分别为低压蒸汽进口的焓值及低压蒸汽通道出口的等熵焓值。

高压蒸汽与低压蒸汽在混合段内的混合过程满足下述质量及动量守恒方程

$$G_3 = G_1 + G_2 \quad (3)$$

理想状况下动量守恒方程

$$G_3 u_3 = G_1 u_1 + G_2 u_2$$

考虑到混合段的不可逆损失,引入混合效率后

$$G_3 u_3 = (G_1 u_1 + G_2 u_2) F \quad (4)$$

式中: G_1 、 G_2 及 G_3 分别为高压蒸汽、低压蒸汽及混合蒸汽的质量流量; u_3 为混合蒸汽的速度; F 与混合段压力分布及壁面摩擦有关^[10]。

获得混合段出口的混合蒸汽速度后,按照实际蒸汽的压缩过程可获得混合蒸汽出口压力。

1.2 低负荷给水加热系统的数学模型

图 1 中喷射式热泵的高压蒸汽为主蒸汽,低压蒸汽为压力最高的一级回热抽汽,为简化分析,可认为喷射式热泵的进口蒸汽来自汽轮机高压缸,压力为喷射式热泵的进口压力,焓值可根据喷射式热泵的能量平衡式计算,即

$$G_3 h_3 = G_1 h_1 + G_2 h_2 \quad (5)$$

假设混合后的蒸汽压力 p_3 来自动量方程与能量方程等式两端的差值的最小绝对值,从而可求得满足混合蒸汽的压力及焓值,同时得到喷射装置的引射比,由此获得低负荷给水加热器的抽汽参数,再由低负荷给水加热器的端差求得该加热器的水侧及疏水参数。低负荷给水加热器位于最高一级加热器上侧,与其他加热器类似,可以将其作为新的一级进行高压加热器处理,采用常规的热力系统热平衡法进行计算^[3]。

1.3 低负荷给水加热系统的节能效益

低负荷加热系统的节能效益采用简捷计算方法计算。本文低负荷加热器被视为新的一级高压加热器,加热器序号重新排列,并按照压力由低到高标记,编号为 #1~#8,共 8 级。回热加热器的各级抽汽份额为

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

式中: τ_j 是 1 kg 水在编号为 # j 的加热器中的焓升值; q_j 是 1 kg 加热蒸汽在编号为 # j 的加热器中的放热量; γ_j 是 1 kg 疏水在编号为 # j 的加热器中的放热量。

采用本文系统,新蒸汽膨胀后的做功

$$N'_{ip} = \sum_{j=1}^8 \alpha_j (h_0 - h_j) + \sum_{j=1}^5 \alpha_j \sigma$$

式中: σ 是 1 kg 蒸汽在再热器中的吸热量。循环吸热量

$$Q' = h_0 + \alpha'_{xr} \sigma - \bar{t}_{gs}$$

式中:再热抽汽份额

$$\alpha'_{xr} = 1 - \sum_{j=6}^8 \alpha_j$$

故本文系统的循环内效率

$$\eta'_i = \frac{N'_{ip}}{Q'}$$

原机组热力系统的循环内效率为 η_i ,原机组发电煤耗率为 b_0 ,则低负荷给水加热系统的节能效益

$$\Delta b = \frac{b_0 (\eta'_i - \eta_i)}{\eta'_i} \quad (6)$$

2 计算结果及讨论

本文对某 660 MW 超临界空冷机组的低负荷给水加热系统的性能进行了研究。该机组为一次再热机组,有 7 段回热抽汽,分别为 3 台高压加热器、1 台除氧器及 3 台低压加热器的汽源加热,其热力系统如图 3 所示。在 THA 工况下,给水温度为 273.3℃;在 60%THA 工况下,给水温度为 242.7℃,锅炉省煤器的出口烟温低于 SCR 装置的要求。本文采用 60%THA 工况数据进行计算,该工况下 #7 高压加热器的抽汽压损为 3%,上端差为 -1.7℃,下端差为 5.5℃。

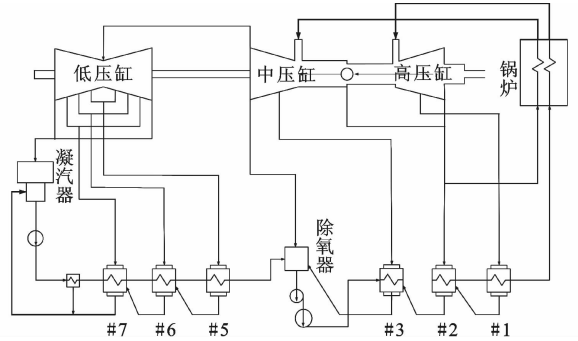


图 3 某 660 MW 超临界空冷机组原则性热力系统

2.1 喷射式热泵的性能

60%THA 工况下,机组主蒸汽的压力为 15.2 MPa,温度为 566.0℃,7 段抽汽的压力为 3.51 MPa,温度为 355.2℃。以主蒸汽作为高压蒸汽,7 段抽汽作为低压蒸汽,采用本文喷射式热泵的数学模型计算了不同引射比(低压蒸汽流量与高压蒸汽流量之比)下混合蒸汽的出口压力,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出:当引射比增加时,混合蒸汽出口压力随之下降,下降速度随引射比的增大而逐渐减小;当引射比小于 0.5 时,增加引射比,混合蒸汽出口压力下降迅速;当引射比大于 1.0 时,增加引射比,混合蒸汽出口压力下降缓慢。

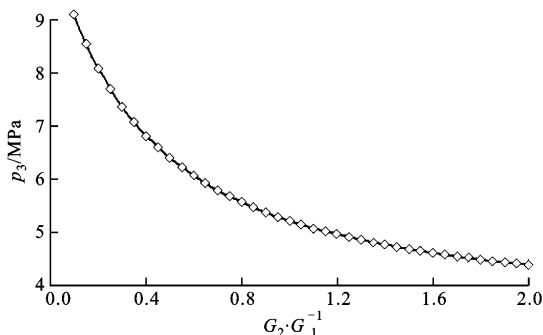


图 4 混合蒸汽压力随引射比的变化

2.2 低负荷加热器的性能

取不同引射比,计算了低负荷加热器的加热温升及出口给水温度,结果如图 5、图 6 所示。

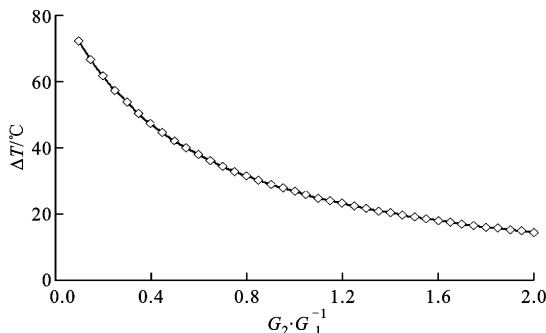


图 5 低负荷加热器加热温升随引射比的变化

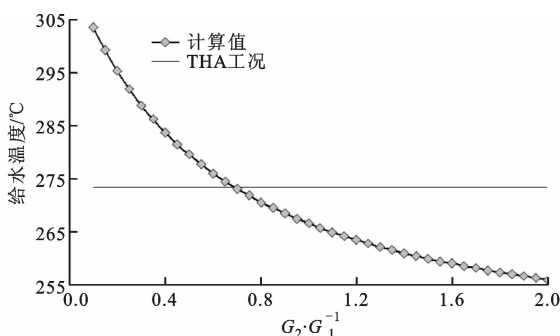


图 6 给水温度随引射比的变化

从图 5 可以看出:当引射比增加时,低负荷加热器的加热温升随之减小,减小的速度随引射比的增大而逐渐减缓;当引射比小于 0.5 时,增加引射比,加热温升迅速减小;当引射比大于 1.0 时,增加引射比,加热温升缓慢减小。加热温升决定着低负荷加热器的换热量,加热温升越大,加热器的造价越高。大型火电机组高压加热器的加热温升一般在 20~40 °C 之间,当引射比在 0.5~1.5 之间时,低负荷给水加热器的加热温升在该范围之内。

从图 6 可以看出:当引射比增加时,给水温度随之下降,下降速度随引射比的增大而减缓;当引射比

小于 0.5 时,增加引射比,给水温度下降迅速;当引射比大于 1.0 时,增加引射比,给水温度下降减缓。给水温度影响 SCR 装置脱硝效率,该机组 THA 工况下的给水温度为 273.3 °C,当引射比小于 0.7 时,给水温度高于设计值;在 60% THA 工况下,原系统给水温度为 242.7 °C,由图 6 可知,当引射比小于 1.2 时,该工况下的给水温度至少比原系统提高了 20 °C,从而大大改善了 SCR 脱硝装置的脱硝效果。

2.3 节能效益分析

取不同引射比,计算了系统的节能效益,结果如图 7 所示。从图 7 可以看出:在 60% THA 工况下,当引射比增加时,节能效益先增加后减小;当引射比为 0.65 时,发电煤耗率下降出现最大值,此时机组的发电煤耗率下降 1.2 g/(kW·h),机组的给水温度提高 36.4 °C。由于该系统利用主蒸汽引射 7 段抽汽来作为低负荷加热器的汽源,其节能效益取决于进入喷射式热泵的 7 段抽汽流量,所以该流量越大,节能效益越大。低负荷加热器的加热蒸汽流量为混合蒸汽的出口流量,与低负荷加热器的加热温升成正比,由图 5 可知,该加热温升随引射比的增加而减小,从而导致节能效益在引射比变化时出现最大值。

从图 7 还可以看出:在煤耗率最低点附近,节能效益随引射比的变化比较平缓;当引射比在 0.3~1.5 之间时,节能效益均在 1.0 g/(kW·h) 以上。因此,在系统设计时可根据 SCR 装置的要求,考虑低负荷加热器的成本,合理选择引射比,以获得最佳的技术经济性及节能减排效果。

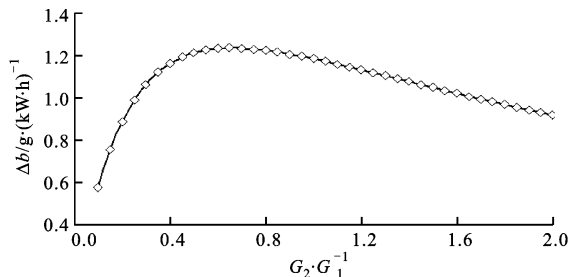


图 7 节能效果随引射比的变化

3 结 论

本文针对火电机组低负荷运行时给水温度下降而影响机组热经济性及 SCR 装置脱硝效果的问题,提出了采用喷射式热泵的低负荷给水加热系统,建立了该系统的数学模型,研究了引射比对系统性能

(下转第 47 页)