

多流量低温省煤器最优设计通用数学模型

谭良红 胡三高 赵艳 汪喆

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院 北京 102206)

摘要: 针对锅炉的低温省煤器,本研究提出一种多流量的连接方式,并对这种连接方式的连接准则以及由此造成的机组经济性影响进行了分析。考虑投资、动力消耗以及燃煤的收益,以纯收益的最大值为目标函数,建立低温省煤器最优设计的数学模型,并以 N200-12.75/535/535 机组为例进行计算,计算结果表明:与单一流量模型相比,多流量模型减少了低参数抽汽的排挤,增多了高参数抽汽的排挤,更好地实现烟气余热的梯级利用,煤耗降低了 0.5 g/(kW·h),并且换热面积降低了 1 000 m²,减小了初始化投资和风机与泵的功耗。

关键词: 电站锅炉;低温省煤器;优化设计

中图分类号: TK224 文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2015.06.021

引言

目前,对于烟气余热的利用,最为广泛的方案是加设低温省煤器利用凝结水回收烟气热量,排挤汽轮机的抽汽,提高机组的做功。在理论研究方面,文献[1]利用等效焓降法对低温省煤器的经济性进行了分析;文献[2]对低温省煤器的设计建立通用数学模型,兼顾投资和节能两方面。在低温省煤器工程应用方面;文献[3]在外高桥三电厂加设低温省煤器,实际运行中煤耗降低 2.71 g/(kW·h),提高了机组的经济性。目前,所使用的低温省煤器均采用单一流量的方式吸收烟气的余热,在排烟温度较高和烟气在低温省煤器中释放的热量较多时,单一流量的连接方式不能充分实现热源和冷源温度的匹配,从而降低了低温省煤器的经济性。为了充分高效地吸收烟气的余热,提高机组的经济性。本研究采用多流量的连接方式吸收烟气余热,此连接方式可以实现烟气和凝结水的高度匹配,达到烟气热量的梯级利用。

1 低温省煤器

低温省煤器所回收的烟气热量,当作汽轮机的

外部热源,不考虑对锅炉效率的影响,只考虑对汽轮机效率的影响。从回热系统中抽取部分或者全部凝结水进入低温省煤器吸收烟气的热量,之后并入回热系统。凝结水吸热后温度升高,排挤本级或者高一级抽汽,更多的抽汽进入汽轮机做功。采用等效焓降的方法计算机组经济性的变化,假设主蒸汽流量保持不变,各级回热加热器的参数不发生改变。

假设对于第 i 级加热器,从外部吸收大小为 Q 的热量,则单位质量新蒸汽的做功增量为:

$$\Delta h = \frac{Q \cdot \eta_i}{D_0} \quad (1)$$

式中: η_i —第 i 级抽汽效率,%; D_0 —主蒸汽流量, kg/s。

机组效率的相对变化:

$$\delta \eta_t = \frac{\Delta h}{h + \Delta h} \quad (2)$$

式中: h —单位质量新蒸汽的做功量, kJ/kg。

机组煤耗的变化:

$$\Delta b_{cp} = \delta \eta_t \cdot b_{cp}^s \quad (3)$$

式中: b_{cp}^s —机组的标准煤耗率, g/(kW·h)。

1.1 普通低温省煤器

对于普通低温省煤器,凝结水从某级加热器的入口处引入,经过在低温省煤器的吸热之后,又并入到某一级加热器的入口,凝结水的抽取点只有一个,并入点也只有一个。低温省煤器可按其进出点在回热系统的位置分为串联连接方式和并联连接方式。定义经过低温省煤器的凝结水流量与主蒸汽流量的比值为分水系数。

串联连接方式如图 1 所示,凝结水与主蒸汽流量的比值为 β_d ,低温省煤器入口凝结水焓值为 h'_d ,出口凝结水焓值为 h''_d ,则等效焓降增量:

$$\Delta h = \beta_d (h''_d - h'_d) \cdot \eta_i \quad (4)$$

并联连接方式如图 2 所示,凝结水从 m 级加热

收稿日期: 2014-10-14; 修订日期: 2014-11-06

作者简介: 谭良红(1990-),男,湖南茶陵人,华北电力大学硕士研究生。

器入口处引入, 分水系数为 β_d , 低温省煤器入口凝结水焓值为 h'_d , 出口凝结水焓值为 h''_d , 并入到 i 级加热器出口, 则机组等效焓降增量为:

$$\Delta h = \beta_d [(h''_d - h_i) \eta_{i+1} + \sum_{j=m}^i \tau_j \eta_j] \quad (5)$$

式中: h_i — i 级加热器出口焓值; τ_j — j 级加热器凝结水焓升。

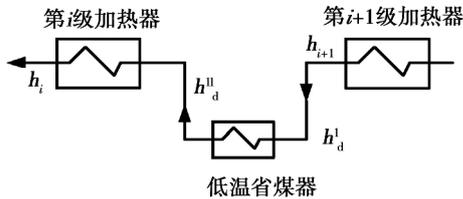


图 1 串联连接方式

Fig. 1 Series connection mode

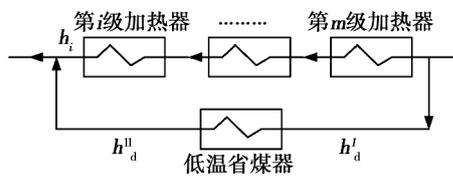


图 2 并联连接方式

Fig. 2 Parallel connection mode

1.2 多流量低温省煤器

对于提高锅炉尾部烟气热量的利用, 学者开展了许多研究。文献 [4] 将空气预热器分成高温和低温两部分, 从而使低温省煤器所利用的烟气温度较高, 排挤更高参数的抽汽; 文献 [5] 通过设置前置液相空气预热器, 提高排烟温度, 扩大了烟气在低温省煤器的放热范围, 提高低温省煤器出口的水温。在低温省煤器入口烟气温度较高, 放热量较多时, 采用单一凝结水流量的方式不能充分高效地利用烟气的这部分热量, 应采用多个引入口和引出口的多流量方式, 使得不同流量与温度的凝结水以对应于不同温度的烟气, 实现热源和冷源温度匹配, 达到梯级利用的目的。多流量方式如图 3 所示。

对于每一级回热加热器都存在两种选择, 串联方式和并联方式, 而连接方式的选择取决于加热器所对应的低温省煤器凝结水出口温度。若低温省煤器出口温度低于该级加热器出口温度, 则应采用串联的方式; 若所对应的低温省煤器出口温度等于或者高于该级回热加热器出口温度, 应采用并联的连

接方式。

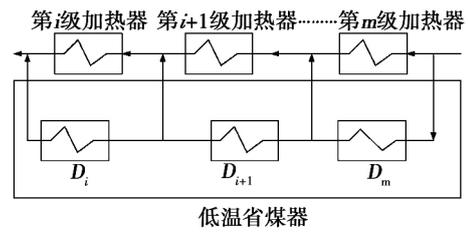


图 3 多流量连接方式

Fig. 3 Multiple traffic connection mode

以图 3 中的 m 级加热器为例进行分析。低温省煤器的入口焓值为 h_{m+1} , 出口焓值为 h''_{dm} , 若 $h''_{dm} < h_m$, 按照前面的分析, 应该是串联的布置方式, 即凝结水的流量为主凝结水流量, 分水系数为 β_m 。

$$\Delta h_m = \beta_m (h''_{dm} - h_{m+1}) \cdot \eta_m \quad (6)$$

若 $h''_{dm} = h_{m+1}$, 则吸收的热量为零, m 级加热器没有凝结水在低温省煤器中吸收热量。

当低温省煤器的出口温度大于或者等于本级加热器出口温度时, $h''_{dm} \geq h_m$, 采用的连接方式是并联。下一级低温省煤器入口温度的选择, 是选择低一级加热器出口的凝结水, 还是采用经过低温省煤器出口的凝结水, 两种方式的经济性是一样的。分析中高一级低温省煤器采用与低一级加热器对应的低温省煤器出口水作为入口水, 故高一级的分水系数应该小于或等于低一级的分水系数。

m 级加热器做功量的增加:

$$\Delta h_m = \beta_m \tau_m \eta_m \quad (7)$$

当 $h''_{dm-1} < h_{m-1}$ 时, $m-1$ 级加热器做功量的增量是:

$$\Delta h_{m-1} = (\beta_m - \beta_{m-1}) (h''_{dm} - h_m) \eta_{m-1} + \beta_{m-1} (h''_{dm-1} - h''_{dm}) \eta_{m-1} \quad (8)$$

当 $h''_{dm-1} \geq h_{m-1}$ 时, $m-1$ 级加热器做功量的增量是:

$$\Delta h_{m-1} = (\beta_m - \beta_{m-1}) (h''_{dm} - h_m) \eta_{m-1} + \beta_{m-1} \tau_{m-1} \eta_{m-1} \quad (9)$$

2 数学模型

2.1 目标函数

对于烟气余热的回收, 目标是获得收益的最大化。在设备的使用寿命期内, 考虑到资金的时间价

值,利用净现值进行分析,以纯收入的净现值作为目标函数^[6]。

$$N_p = T_B - T_C - T_f \quad (10)$$

在低温省煤器使用寿命期内,只考虑通过加设低温省煤器回收烟气余热降低发电煤耗所带来的经济性。

$$T_B = \sum_{j=0}^L \frac{B}{(1+i)^j} \quad (11)$$

其中, B 为每年节省燃煤所带来的经济性:

$$B = C_B \cdot b$$

式中: C_B —燃煤价格; b —每年所节省的燃煤量, t/a ; i —存款利率; L —低温省煤器的使用寿命。

加设低温省煤器,需要购置、运输和安装许多设备。由于设备多,只考虑换热管道、阀门和输送凝结水管道3种主要设备的费用,此部分费用为:

$$T_C = \sum_{n=1}^3 Q_n P_n (1 + \xi_n) \quad (12)$$

式中: Q_n 、 P_n —分别代表第 n 种设备的需求量和单价; ξ_n —为第 n 种设备运输和安装费用系数,一般取为 0.43。

烟气、凝结水在低温省煤器中流动存在阻力,因此加设低温省煤器后,增大了风机和水泵的耗功,新增的动力费用为:

$$T_f = \frac{(1+i)^{L+1} - 1}{i(1+i)^L} (T_{f1} + T_{f2}) C_{fp} \quad (13)$$

式中: C_{fp} 代表电价。

风机所增加的耗电:

$$T_{f1} = \frac{V_1 \cdot \Delta P_1 \cdot \tau}{1000 \eta_f}$$

式中: V_1 —烟气流量, m^3/h ; ΔP_1 —烟气压损, Pa ; τ —一年运行小时数; η_f —风机的效率, %。

对于低温省煤器中凝结水的压损,若采用并联方式连接,凝结水在回热加热器中的阻力损失,足以用于抵消低温省煤器中的压力损失,不需考虑额外的压损;若采用的是串联方式,则必须考虑凝结水的压力损失。

$$T_{f2} = \sum_{k=1}^i \frac{D_k \cdot \Delta P_k \cdot \tau}{1000 \eta_{fp}} \quad (14)$$

式中: D_k 、 ΔP_k —串联方式连接的凝结水流量和压力损失; η_{fp} —水泵的效率; i —多流量方式下,采用串联方式的回热加热器个数。

2.2 约束条件

低温省煤器中烟气和凝结水必须满足一定的条

件才能运行,在设计低温省煤器时,存在普遍的约束条件。

根据能量守恒定律,烟气的放热量与凝结水所吸收的热量相等。

$$V_1 C_{gy} (t_{py} - t_{gy}) = \sum_{m=1}^n D_{dm} (h''_{dm} - h'_{dm})$$

式中: C_{gy} —烟气的定压比热, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$; t_{py} —空气预热器出口烟气温度, $^\circ C$; t_{gy} —低温省煤器出口烟气温度, $^\circ C$; D_{dm} —从 m 级加热器入口抽取的凝结水量; h'_{dm} —与 m 级加热器所对应的低温省煤器入口焓值; h''_{dm} —与 m 级加热器所对应的低温省煤器出口焓值。

低温省煤器中,烟气作为热介质,凝结水作为冷介质,故在任一换热面中,烟气的温度必须大于凝结水的温度。

$$t_y > t_D$$

式中: t_y —烟气温度, $^\circ C$; t_D —低温省煤器中凝结水温度, $^\circ C$ 。

由于低温省煤器在湿法脱硫之前,烟气中含有二氧化硫、三氧化硫,如果管壁温度过低,则会造成严重低温腐蚀,缩短低温省煤器的寿命和影响机组安全运行。为保证机组的安全性和低温省煤器的使用寿命,出口烟气温度 t_{gy} 必须不小于 $90^\circ C$,凝结水入口温度 t'_{dm} 必须大于 $60^\circ C$ ^[7-8]。

从回热系统中抽取的凝结水流量 D_{dm} 必须小于等于凝结水的流量 D_m 。

3 实例计算

以某电厂的 N200-12.75/535/535 机组为例,空气预热器出口的烟气温度为 $160^\circ C$,经过低温省煤器放热后降低为 $90^\circ C$,烟气和凝结水的换热系数为 $37 W/(m^2 \cdot K)$,燃煤价格取为 500 元/t。第 8 级加热器的凝结水量是 432.62 t/h,抽汽效率是 10.17%;第 7 级加热器的凝结水量是 432.62 t/h,抽汽效率是 16.97%;第 6 级加热器凝结水量是 491.14 t/h,抽汽效率是 20.58%;第 5 级加热器凝结水量是 491.14 t/h,抽汽效率 26.59%;第 4 级加热器的抽汽效率 28.26%。依据所建立的数学模型,分别计算单一流量的最优设计方案和多流量的最优设计方案,最优计算结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 单一流量低温省煤器最优设计参数
Tab.1 The optimal design parameters of single flow mode of low temperature economize

参 数	数 值	
烟气入口温度/℃	160	
烟气出口温度/℃	90	
凝结水抽取点	第 7 级加热器入口处	
凝结水并入点	第 5 级加热器入口处	
低温省煤器 凝结水入口温度/℃	68.9	
凝结水出口温度/℃	131.5	
平均换热温差/℃	24.6	
换热面积/m ²	21 968	
烟气流动阻力/Pa	400	
凝结水流动阻力/MPa	0.165	
经济性参数	煤耗降低值/g · (kW · h) ⁻¹	6.3
	节煤量/t · a ⁻¹	6 339
	年收益/万元	316.9

表 2 多流量低温省煤器最优设计具体参数

Tab.2 The optimal design parameters of multiple traffic flow mode of low temperature economize

参 数	数 值	
I级低温省煤器	烟气入口温度/℃	123.4
	烟气出口温度/℃	90
	凝结水抽取点	第 7 级加热器入口
	凝结水并入点	第 7 级加热器入口
	凝结水入口温度/℃	68.9
	凝结水出口温度/℃	87.9
II级低温省煤器	烟气入口温度/℃	160
	烟气出口温度/℃	123.4
	凝结水抽取点	第 6 级加热器入口处
	凝结水并入点	第 5 级加热器入口处
低温省煤器设计参数	凝结水入口温度/℃	103.4
	凝结水出口温度/℃	133.2
	平均换热温差/℃	25.8
	换热面积/m ²	20 946
经济性参数	烟气流动阻力/Pa	381
	凝结水流动阻力/MPa	0.162
	煤耗降低值/g · (kW · h) ⁻¹	6.8
	节煤量/t · a ⁻¹	6 842
年收益/万元	347.6	

由表 1 和表 2 可知,单一流量的连接方案是从第 7 级加热器入口抽取温度为 68.9℃ 的凝结水进入低温省煤器,经过吸热升高到 131.5℃,并在 5 号加热器的入口处。多流量的连接方案是低温省煤器分为两部分,第一部分串联与第 7 级加热器,凝结水温度升高到 87.9℃,第二部分并联与第 6 级加热器,抽取 380 t/h 凝结水,加热后的出口温度为 136.73℃,并在 5 号加热器的入口。

由图 4 所示,与单一流量模型相比,多流量模型减少了第 7 级加热器的吸热量,增大了第 6 级和第 5 级加热器的吸热量,增多了高参数抽汽的排挤,降低了低参数抽汽的排挤,更好地实现了冷热源的温度匹配和能量的梯级利用,使得烟气余热被更为高效地利用。与单一流量相比,煤耗多降低了 0.5 g/(kW · h),并且平均换热温差升高了 1.2℃,换热面积减少了 1 000 m²;烟气阻力和凝结水阻力分别减小了 19 Pa 和 3 kPa,降低了风机和水泵的功耗,节省了厂用电。

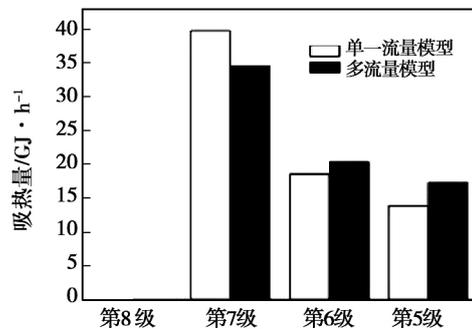


图 4 不同回热加热器的热量分布

Fig. 4 Heat distribution of different regenerative heater

4 结 论

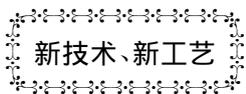
提出了一种多流量的低温省煤器连接方式,并分析了多流量连接准则;依据等效焓降法,分别对单一流量低温省煤器和多流量低温省煤器进行热力学分析,计算机组的经济性变化。兼顾投资、动力消耗和燃料收益,以纯收益为目标函数,建立单一流量和多流量低温省煤器的数学模型,并以实际电厂为例进行计算;与单一流量模型相比,多流量模型减少了低参数抽汽的排挤,增多了高参数抽汽的排挤,更好

地实现烟气余热的梯级利用,煤耗多降低了 $0.5 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 并且换热面积减少了 $1\,000 \text{ m}^2$,减小了初始化投资和泵与风机的功耗。

参考文献:

- [1] 林万超. 火电厂热系统节能理论 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.
LIN Wan-chao. Theory of energy conservation for thermodynamic system in coal-fired power plant [M]. Xi'an: Xi'an Jiao-tong University Press, 1994.
- [2] 黄新元, 王立平. 火力发电厂低压省煤器系统最优设计的通用数学模型 [J]. 电站系统工程, 1999, 05: 20 - 25.
HUANG Xin-yuan, WANG Li-ping. General mathematical model of low pressure economizer systems optimal design on the thermal power plant [J]. Power System Engineering, 1999(9): 20 - 29.
- [3] 赵之军, 冯伟忠, 张玲, 等. 电站锅炉排烟余热回收的理论分析与工程实践 [J]. 动力工程, 2009, 29(11): 994 - 997, 1012.
ZHAO Zhi-jun, FENG Wei-zhong, ZHANG Ling, et al. Theoretical analysis and engineering practice of heat recovery from exhaust gas of power boilers [J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(11): 994 - 997.
- [4] 徐钢, 许诚, 杨勇平, 等. 电站锅炉余热深度利用及尾部受热面综合优化 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(14): 1 - 8.
XU Gang, XU Cheng, YANG Yong-ping, et al. Deep utilization of exhaust heat and comprehensive optimization of the tail heating surfaces of utility boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(14): 1 - 8.
- [5] 陆万鹏, 孙奉仲, 史月涛, 等. 前置式液相介质空气预热器经济性分析及热力系统优化 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(11): 6 - 10.
LU Wan-peng, SUN Feng-zhong, et al. Economic analysis and thermodynamic system optimization of front-located air preheated with liquid mediator [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(11): 6 - 10.
- [6] 王加璇, 张恒良. 动力工程经济学 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
WANG Jia-xuan, ZHANG Heng-liang. Thermo economical of power engineering [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1995.
- [7] 杨勇平, 许诚, 徐钢, 等. 空冷机组空气-烟气余热利用综合分析 [J]. 动力工程学报, 2013, 11: 907 - 912.
YANG Yong-ping, XU Chen, XU Gang, et al. Comprehensive analysis of the air-flue gas waste heat utilization in an air cooled unit [J]. Journal of Power Engineering, 2013, 33(11): 907 - 912.
- [8] 张基标, 郝卫, 赵之军, 等. 锅炉烟气低温腐蚀的理论研究和工程实践 [J]. 动力工程学报, 2011, 10: 730 - 733 + 738.
ZHANG Ji-biao, HAO Wei, ZHAO Zhi-jun, et al. Theoretical and practical research on mechanic of low-temperature corrosion caused by boiler flue gas [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(10): 730 - 734.

(丛敏 编辑)



新技术、新工艺

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.022

安城联合循环电站

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2015年6月刊报道, Siemens及其合伙人韩国 POSCO E & C(POSCO工程 & 建筑公司)从破土到首次商业运行的24个月内建成了安城联合循环电站。该公司报告,这是亚洲商业运行的第四个 Siemens H级燃气轮机联合循环电站,装置净效率超过60%。此外,该电站也将为安城市居民提供区域供热。

安城 CHP(冷热电联产)电站位于首都首尔西部京畿道省安城市。该液化天然气电站是韩国首台 H级(2+1)(2台燃气轮机+1台汽轮机)多轴电站并且装机容量可达834 MW。Siemens交付动力岛主要设备:2台 SGT-8000H型燃气轮机、1台 SST6-5000汽轮机、3台 SGen6-2000H型氢冷发电机和2台韩国 BHI的余热锅炉、全部测量仪表和控制技术以及 SPPA-T3000。Siemens也将提供燃气轮机的长期服务。

(吉桂明 摘译)

provided in the software Fluent ,the distribution characteristics of the temperature ,speed and various constituents inside the furnace before and after the optimization were studied. It has been found that after the optimization and adjustment of the combustion inside the furnace ,the carbon monoxide concentration in the zone of the burners in the upper layer decreases from 0.8% to 0.5% and the speed and temperature distribution region correspondingly reduces ,thus making an outstanding achievement in containing the coking. The method above-mentioned can offer reference for anti-coking operation and modification of boilers burning Zhundong-originated coal. **Key words:** Zhundong-originated coal with a high sodium content ,tangentially-fired boiler ,layered arrangement ,coking ,numerical simulation ,butterfly shape

多流量低温省煤器最优设计通用数学模型 = A General-purposed Mathematical Model for Optimal Design of Multi-flow Low Temperature Economizers [刊 ,汉] TAN Liang-hong ,HU San-gao ,ZHAO Yan ,WANG Zhe (College of Energy Source ,Power and Mechanical Engineering ,North China University of Electric Power ,Beijing , China ,Post Code: 102206) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(6) . -911 -915

For low temperature economizers in boilers ,proposed was a multi-flow connection mode ,of which the connection criteria and the resulting influence on the cost-effectiveness of the unit were analyzed. Under the condition of the total investment ,power consumption and amount of coal burned being taken into account and with the maximal pure income serving as the object of study ,a mathematical model for optimal design of low temperature economizers was established and with a N200-42.75/535/535 unit serving as an example ,a calculation was performed. The calculation results show that compared with a single-flow economizer ,a multi-flow economizer can increase the amount of steam extracted at low parameters and at the same time decrease that at high parameters ,thus better realizing a stepped utilization of waste heat from flue gases ,reducing the coal consumption by 0.5 g/(Kw. h) ,cutting the heat exchange area by 1 000 square meters and minimizing the initial investment and the power consumed by the fans and pumps.

Key words: utility boiler ,low temperature economizer ,optimized design

热电联产机组协调控制系统优化设计 = Optimized Design of a Coordinated Control System for Cogeneration Units [刊 ,汉] GUO Xiao-hong ,CHEN Qi (Inner Mongolia Electric Power Academy ,Hohhot ,China ,Post Code: 010020) ,TIAN Liang (College of Control Science and Engineering ,North China University of Electric Pow-