

汽包锅炉过热器蓄热能的分析与计算

刘吉臻, 秦志明, 张栾英, 谷俊杰

(华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室 河北 保定 071003)

摘 要: 过热器是电站锅炉的重要部件, 通过对过热器的机理分析, 建立了过热器的集总参数模型, 得出了过热器蓄热能的理论计算方法, 并通过实际机组运行数据进行了计算, 对 3 种集总参数模型进行了比较, 采用链式结构的集总模型更能反映工质蓄热能跟随压力的变化情况。机组在 50% ~ 100% 负荷滑压运行时, 过热蒸汽的蓄热能随着压力的降低而降低, 金属的蓄热能随压力的降低而增加; 过热蒸汽的蓄热能要远大于金属的蓄热能。

关 键 词: 汽包锅炉; 过热器; 蓄热能; 热力性能

中图分类号: TK223 文献标识码: B

引 言

随着电网容量扩大和对电能质量要求的提高, 对电力系统自动发电控制(AGC)的要求日益迫切, 圆满解决 AGC 问题的基础在于单元机组负荷控制。目前, 大多单元机组采用直接能量平衡(DEB)的控制策略, 锅炉蓄热能在机炉协调控制系统中起着关键的作用, 获取准确的锅炉蓄热能可使机组在不同负荷压力工况下能得到更好的控制品质。Mello 认为在锅炉系统中过热器的蓄热占锅炉总蓄热能的 10%^[1]。国内学者计算锅炉蓄热时沿用此方法^[2], 只计算了汽包的蓄热能, 而没有考虑过热器的蓄热能。文献[3]从汽包锅炉的物理结构出发, 将整个锅炉的蓄热能分为 3 个部分(水冷壁、汽包、和过热器)分别进行分析计算, 不同容量的锅炉在不同负荷下, 水冷壁、汽包和过热器蓄热占有的比例也不相同, 其中过热器的蓄热最大。该文采用以出口参数为代表点的集中参数模型对过热器工质的蓄热进行了计算, 但是没有考虑过热器的金属蓄热。

过热器是电站锅炉的重要部件, 由许多管子并联组成, 布置在炉膛上部、水平烟道以及竖井当中, 体积庞大。当机组负荷变化时, 过热器内工质的物性参数和外部环境都发生很大变化, 因此, 有必要对

过热器的蓄热能进行深入的分析与计算。

1 研究对象

锅炉过热器系统包括顶棚包墙管、前屏过热器、后屏过热器、一级对流过热器、二级对流过热器、一级喷水减温器和二级喷水减温器。在低温段, 通过调节烟气挡板来改变流经过热器的烟气量的方法来调节过热蒸汽温度; 在高温段, 采用二级喷水减温的方法来调节过热蒸汽温度, 第一级喷水减温器布置在屏式过热器之前, 调节屏式过热器出口的温度, 喷水水量稍大于总喷水量的 1/2, 作为过热器蒸汽温度的粗调; 第二级喷水减温器布置在末级过热器之前, 作为过热器出口汽温的细调。通过对温度的调节控制, 过热器出口汽温能很好地保持在额定温度下。

过热器的蓄热能可以认为是工质(过热蒸汽)蓄热能和受热面金属蓄热能的总和。锅炉运行工况改变时, 各状态下工质的体积、温度、压力以及密度和比焓等物性参数随之改变, 过热器工质的蓄热能为:

$$\Delta Q_g = \frac{d}{dt}(\rho_g h_g V_g) \quad (1)$$

式中: V_g 、 ρ_g 和 h_g —体积(m^3)、密度(kg/m^3)和比焓(kJ/kg); 下标 g 表示工质。

对于金属, 当其温度发生变化时要吸收或释放热量。受热面金属的蓄热能为:

$$\Delta Q_m = MC_p \frac{dT_m}{dt} \quad (2)$$

式中: M 、 C_p 、 T —金属的质量(kg)、金属的定压比热($kJ/(kg \cdot ^\circ C)$)和温度($^\circ C$); 下标 m 表示金属。

除减温器外, 过热器其它环节的焓温通道数学模型都可归属于单相介质焓温通道的数学模式。在锅炉运行中, 过热器内工质的压力、温度、密度和比焓等物性参数均随时间和空间的变化而变化。是典

收稿日期: 2011-12-12; 修订日期: 2012-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50776030); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12MS115)

作者简介: 刘吉臻(1951-), 男, 山西岚县人, 华北电力大学教授, 博士生导师。

型的分布参数环节。在实际应用中,一般不对分布参数模型进行直接求解,而是将每一环节的受热面用一根等效的受热管来代表,并在空间位置上选定一个具有代表性的点,用该点介质的参数作为本环节的集总参数模型来近似描述分布参数对象的特性。

由于过热器管路很长,在实际建模过程中,一般采用多段集总参数化模型^[4]。多段集总参数模型在精度上有所提高,但随着分段数增加计算量成倍增长,并不是所分的段数越多精度就越高,因此通常将增加分段数与其它模型改进方法结合使用。从单相管段的分段方式或传热过程出发,国内已有一些学者基于集总参数建模思想,提出了嵌套式、链式结构集总参数模型^[5~6],为单相区的建模开辟了新的途径。

2 集总参数模型的建立

设建模对象的长度为 L ,将管路分为 3 个环节,如图 1 所示。环节 I 的代表点取为环节 II 的入口点,其长度为 $L - b$;环节 II 的代表点取为环节 I 的出口点,其长度为 $L - a$;环节 III 的代表点取为整个环节的出口点,其长度为 b 。

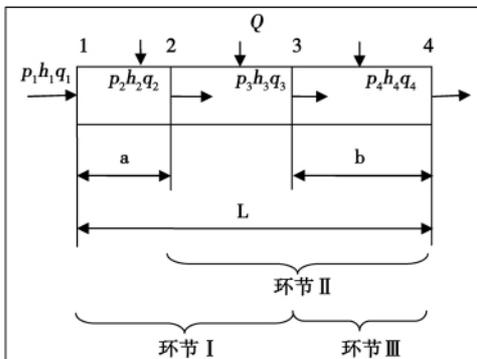


图 1 集总参数模型

Fig. 1 Lumped parameter model

将每一环节的受热面用一根等效的受热管来代表,为建立模型做以下假设:

(1) 沿管长方向工质吸热均匀,管外热流密度沿管长方向均匀分布;

(2) 各截面的流量变化相等。

所建立模型能量平衡方程为:

环节 I:

$$\frac{d}{dt}(V_I \rho_2 h_2) + M_I C_p \frac{dT_{m2}}{dt} = q_1 h_1 - q_3 h_3 + Q_I \quad (3)$$

环节 II:

$$\frac{d}{dt}(V_{II} \rho_3 h_3) + M_{II} C_p \frac{dT_{m3}}{dt} = q_2 h_2 - q_4 h_4 + Q_{II} \quad (4)$$

环节 III:

$$\frac{d}{dt}(V_{III} \rho_4 h_4) + M_{III} C_p \frac{dT_{m4}}{dt} = q_3 h_3 - q_4 h_4 + Q_{III} \quad (5)$$

其中 $Q_I = (1 - b/L) Q$, $Q_{II} = (1 - a/L) Q$, $Q_{III} = Qb/L$, $M_I = (1 - b/L) M$, $M_{II} = (1 - a/L) M$, $M_{III} = Mb/L$, $V_I = (1 - b/L) V$, $V_{II} = (1 - a/L) V$, $V_{III} = Vb/L$ 。式中: V 、 Q —整段管路的体积(m^3)和吸热量(kW);下标 I、II 和 III 表示整个管路的 3 个环节; q —管内工质流量(kg/s);下标 1、2、3 和 4 表示 3 个环节的出、入口。

参数 a 、 b 的选择可以改变集总参数模型的形式。当 $a = L$, $b = 0$ 或者 $a = 0$, $b = L$ 时,该模型相当于以出口参数为参考点的集总参数模型;当 $a = b = L/2$ 时,该模型相当于嵌套式集总参数模型;当 $a = L/4$, $b = L/3$ 时,该模型为链式结构集总参数模型。

联立式(3)和式(5),即可得到整段管路的能量平衡方程:

$$\Delta Q_g + \Delta Q_m = q_1 h_1 - q_4 h_4 + Q \quad (6)$$

$$\Delta Q_g = \frac{d}{dt}(V_I \rho_2 h_2) + \frac{d}{dt}(V_{III} \rho_4 h_4) = V_I (\rho_2 \frac{\partial h_2}{\partial p_2} + h_2 \frac{\partial \rho_2}{\partial p_2}) + V_{III} (\rho_4 \frac{\partial h_4}{\partial p_4} + h_4 \frac{\partial \rho_4}{\partial p_4}) \quad (7)$$

$$\Delta Q_m = M_{mI} C_p \frac{dT_{m2}}{dt} + M_{mIII} C_p \frac{dT_{m4}}{dt} \quad (8)$$

$$\rho_2 = f(h_2, p_2) \quad (9)$$

过热器的蓄热能主要由过热蒸汽 ΔQ_g 和管壁金属 ΔQ_m 的蓄热能组成。

3 金属蓄热

当金属温度发生变化时要吸收或释放热量。受热面金属的蓄热能为^[7]:

$$\Delta Q'_m = M C_p \frac{dT'_m}{dt} \quad (10)$$

根据锅炉机组热力计算标准方法,对于锅炉受热面外壁温度在设计额定工况下,炉内某一区段的管壁温度计算式为:

$$T'_m = T_g + \mu q_m (\frac{\delta}{\lambda} \frac{\beta}{1 + \beta} + \frac{1}{\alpha_2}) \quad (11)$$

式中: T_g —管内工质温度, $^{\circ}\text{C}$; β —受热面管子外径与内径之比; q_m —管壁热负荷, W/m^2 ; μ —均流系数; δ —管子壁厚, m ; λ —管壁金属导热系数, 与钢材和温度有关, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; α_2 —工质对管内壁金属表面的放热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

对于工质为水、汽水混合物及超临界压力的过热蒸汽, 由于其放热系数 α_2 足够高, 在传热计算中, 热阻 $1/\alpha_2$ 可以忽略不计^[8~9]。

该段管子的质量 $M = 2\pi r \cdot \delta \cdot l \cdot \rho$, 受热面积 $F = \pi r \cdot l$, 其中 r 为管壁的内径, m 。该段管子的蓄热能:

$$\begin{aligned} \Delta Q'_m &= MC_p \frac{dT_g}{dt} + MC_p \mu \left(\frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{\beta}{1+\beta} \right) \frac{dq}{dt} \\ &= MC_p \frac{dT_g}{dt} + \frac{\beta}{1+\beta} \cdot \frac{2\mu C_p \rho \delta^2}{\lambda} \frac{dQ_m}{dt} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: δ 、 β 、 ρ 和 C_p 一定值; μ 、 λ —变量, 且工况一定时可视为常数, 令:

$$k_m = \frac{\beta}{1+\beta} \cdot \frac{2\mu C_p \rho \delta^2}{\lambda}$$

则:

$$\Delta Q'_m = MC_p \frac{dT_g}{dt} + k_m \frac{dQ'_m}{dt} \quad (13)$$

式中: $MC_p \frac{dT_g}{dt}$ —工质工况变化时金属蓄热能的变化;

$k_m \frac{dQ'_m}{dt}$ —燃料量变化时金属蓄热能的变化, 其主要表现在燃烧系统对象特性的动态响应时间上, 在本研究中暂不考虑。

式(8)可转换为:

$$\begin{aligned} \Delta Q_m &= M_{\text{ml}} C_p \frac{dT_2}{dt} + M_{\text{mlll}} C_p \frac{dT_4}{dt} \\ &= M_{\text{ml}} C_p \frac{\partial T_2}{\partial p_2} \frac{dp_2}{dt} + M_{\text{mlll}} C_p \frac{\partial T_4}{\partial p_4} \frac{dp_4}{dt} \end{aligned} \quad (14)$$

$$T_2 = f(h_2, p_2) \quad (15)$$

4 计算与分析

在大唐盘山电厂 3 号机组上进行了实验研究。锅炉为哈锅 HG-2023/17.6-YM4 型亚临界压力一次中间再热汽包锅炉。过热器的容积约为 310 m^3 , 过热器金属的质量约为 $3.2 \times 10^6 \text{ kg}$ 。从 EDNA 实时数据库内提取机组运行的数据计算过热器的蓄热能。过热蒸汽的特性参数 ρ 、 h 、 $\partial h/\partial p$ 、 $\partial \rho/\partial p$ 、

$\partial T/\partial p$ 可以通过文献[10]的方法计算得出。过热蒸汽在机组 50%~100% 负荷滑压运行时的蓄热能趋势如图 2 所示。图中曲线 1 为链式结构模型计算结果; 曲线 2 嵌套式集总参数模型的计算结果; 曲线 3 为出口参数集总参数模型的计算结果。

由于过热器内各受热面管路很长, 以出口参数为代表参数的集总参数模型的蓄热能随压力的变化很小, 不能反映在受热面中工质状态变化的情况。链式结构模型和嵌套式模型的蓄热能的变化很明显, 从结构上来看, 链式结构模型可视为不规则的两段嵌套式模型, 链式结构模型的计算精度要更高一些。

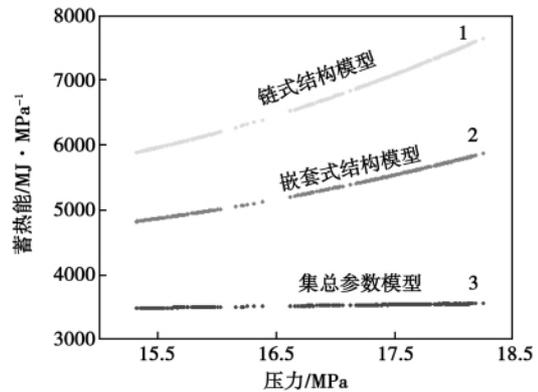


图 2 过热蒸汽蓄热能变化趋势

Fig. 2 Variation tendency of superheated steam accumulative heat energy

高压和超高压锅炉的过热器, 一般采用两级喷水减温器, 第一级喷水减温器, 一般布置在屏式过热器之前, 作为整个过热器蒸汽温度的粗调, 同时也起保护屏式过热器的作用; 第二级喷水减温器, 放置在末级过热器之前, 作为出口汽温的细调。通过对汽温调节控制, 过热器出口温度能很好的保持在额定温度下。所以, 过热器金属蓄热能主要集中在对流过热器和屏式过热器中。从汽轮机调门开度的阶跃响应来看^[11], 在过热器出口, 过热蒸汽温度的响应速度比压力的要慢很多; 在过热器入口, 饱和蒸汽温度跟随压力的变化响应速度很快。蒸汽温度跟随压力的变化率随着压力的增加而减小, 因此, 金属的蓄热能表现出随着压力增加而减少的趋势, 如图 3 所示。综合图 2 和图 3, 过热器内蒸汽的蓄热能远大于金属的蓄热能, 因此, 过热器总的蓄热能是随着压力的增加而增加, 与文献[12]的结论相同。

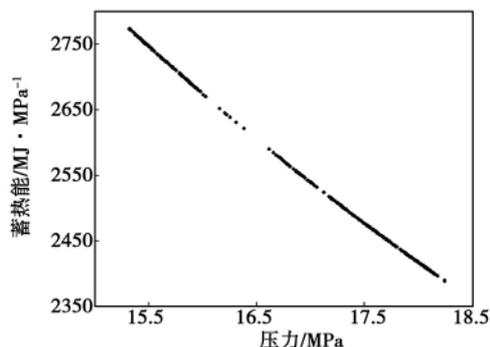


图3 过热器金属蓄热能变化趋势

Fig. 3 Variation tendency of superheater metal accumulative heat energy

5 结 论

通过机理分析,对体积庞大、受热面管路长的过热器建立了集总参数模型,通过参考点的改变,模型可以在3种形式上进行切换;通过计算分析,采用链式结构的集总模型更能反映工质蓄热能跟随压力的变化情况,过热器内过热蒸汽的蓄热能表现出随着压力的增加而增加的特点;在主汽温度的调控作用下,过热器金属的蓄热能主要集中在低温过热器,其特点是随着压力的增加而减小;由于过热蒸汽的蓄热能大于金属的蓄热能,因此,过热器总的蓄热能随着压力的增加而增加。

参考文献:

- [1] De Mello F P. Boiler models for systems dynamic performance studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems 1991, 6(1): 66-74.
- [2] 姜建军. 锅炉蓄热系数的理论计算[J]. 江苏电机工程, 2003, 22(6): 31-33.
SHU Jian-jun. Theoretical calculation of a boiler heat accumulation coefficient [J]. Jiangsu Electrical Machinery Engineering, 2003, 22(6): 31-33.
- [3] 刘吉臻, 秦志明, 张栾英, 等. 汽包锅炉蓄热分析与计算[J]. 动力工程学报, 2012, 32(2): 96-100.
LIU Ji-zhen, QIN Zhi-ming, ZHANG Luan-ying, et al. Analysis and calculation of the accumulative heat in a drum boiler [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(2): 96-100.
- [4] 范永胜, 徐治皋, 陈来九. 锅炉单相区的嵌套建模方法, [J] 动力工程, 1995, 15(5): 7-12.

FAN Yong-sheng, XU Zhi-gao, CHEN Lai-jiu. Method for built-in modeling a single phase zone in a boiler [J]. Power Engineering, 1995, 15(5): 7-12.

- [5] 任挺进, 李志刚, 谢茂清. 锅炉单相区链式结构的集总参数数学模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(10): 28-30.
REN Ting-jin, LI Zhi-gang, XIE Mao-qing et al. Chain structure lumped parameter mathematical model for a single phase zone of a boiler [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 1999, 39(10): 28-30.
- [6] 吴海凤, 袁益超, 刘聿拯. 超临界锅炉单相受热面不同动态数学模型比较[J]. 锅炉技术, 2010, 41(6): 1-5.
WU Hai-feng, YUAN Yi-chao, LIU Yu-zheng. Comparison of different dynamic models for single-phase heating surfaces of a supercritical boiler [J]. Boiler Technology, 2010, 41(6): 1-5.
- [7] 樊泉桂. 锅炉原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
FAN Quan-gui. Boiler principle [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [8] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
ZHANG Chen-yue. Boiler dynamic characteristics and their mathematical models [M]. Beijing: China Water Conservation and Electric Power Press, 1987.
- [9] 范从振. 锅炉原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
FAN Cong-zhen. Boiler Principle [M]. Beijing: China Water Conservation and Electric Power Press, 1986.
- [10] 秦志明, 刘吉臻, 张栾英, 等. 基于稀疏核偏最小二乘法的水和水蒸气比焓和比体积的拟合[J]. 动力工程学报, 2010, 30(12): 952-955.
QIN Zhi-ming, LIU Ji-zhen, ZHANG Luan-ying, et al. Fitting of the specific enthalpy and volume of water and steam based on the sparse nucleus partial least square method [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(12): 952-955.
- [11] 卓旭升, 周怀春, 文忠林. 火电机组过热器压力和温度的动态研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 72-76.
ZHUO Xu-sheng, ZHOU Huai-chun, WEN Zhong-lin, et al. Dynamic study of the pressure and temperature of the superheater in a power plant [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2007, 27(14): 72-76.
- [12] 刘鑫屏, 田亮, 赵征, 等. 汽包锅炉蓄热系数的定量分析[J]. 动力工程, 2008, 28(2): 216-220.
LIU Xin-ping, TIAN Liang, ZHAO Zheng, et al. Quantitative analysis of the heat storage coefficient of a drum boiler [J]. Power Engineering, 2008, 28(2): 216-220.

(陈滨 编辑)

tancy Group ,Chengdu ,China ,Post Code: 610021) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012 , 27(5) . -578 ~581 ,595

Experimentally studied was the influence of the dry type deslagging system of a 1000 MW unit in a power plant on the boiler efficiency. Through the test of the influence of the cooling air proportion on the boiler efficiency ,the test of the influence of the rotating speed of the steel tape machine on the boiler efficiency ,the dry type and wet type deslagging contrast test at the rated load and a low load ,obtained was the extent of the influence of the dry type deslagging system on the boiler efficiency. It has been found that with an increase of the cooling air proportion ,the boiler efficiency will gradually decrease. When the cold air proportion increases from 0.62% to 1.34% ,the boiler efficiency will decrease by 0.22 percentage points. When the rotating speed of the steel tape machine increases from 2 m/min to 3.6 m/min ,the boiler efficiency will go down by 0.06 percentage points. With an increase of the rotating speed of the steel tape machine ,the boiler efficiency will gradually decrease. When the cooling air proportion is greater than 0.45% ,the boiler efficiency by using the dry type deslagging mode will be lower than that by using wet type deslagging mode. **Key words:** 1000 MW unit ,ultra - supercritical ,dry type deslagging ,cooling air proportion , boiler efficiency

汽包锅炉过热器蓄热能的分析与计算 = **Analysis and Calculation of the Accumulated Heat Energy of the Superheater of a Steam Drum Boiler** [刊 汉]/LIU Ji-zhen ,QIN Zhi-ming ,ZHANG Luan-ying ,GU Jun-jie (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control ,North China University of Electric Power ,Baoding ,China ,Post Code: 071003) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(5) . -582 ~585

The superheaters constitute important part of a utility boiler. Through an analysis of the mechanism controlling the superheaters ,established a lumped parameter model for superheaters and obtained was a theoretical method for calculating the accumulated heat energy of a superheater. In addition ,through choosing the operating data of a real unit ,a calculation was performed and three types of lumped parameter model were compared. It has been found that to adopt the lumped parameter model of the chain structure can better reflect the variation conditions of the accumulated heat energy of the working medium with pressure. When the unit is operating in a sliding pressure mode at 50% - 100% load ,the accumulated heat energy of the superheated steam will decrease with a drop of pressure and that of the metal will increase with a decrease of pressure. The accumulated heat energy of the superheated steam is far more than that of the metal. **Key words:** steam drum boiler ,superheater ,accumulated heat energy ,thermodynamic performance