

超临界锅炉热量信号构造研究*

谷俊杰,白智中,王 鹏,张 岩

(华北电力大学能源动力与机械工程学院 保定 071003)

摘要:提出一种超临界锅炉热量信号的构造方法,实现了对入炉燃煤发热量的准确测量。采用热力学性质标准 IAPWS-IF97 对超临界锅炉水冷壁进行分区,解决了超临界工况下水冷壁内工质状态变化的难判断问题,对锅炉的蓄热系数进行了详细计算。根据某 1 000 MW 机组的结构参数和实际运行数据,对构造的热量信号进行验证。结果显示,该热量信号能够在快速响应机组负荷变化的同时准确地反映入炉燃煤发热量的变化,为超临界机组直接能量平衡协调控制系统设计打下基础。

关键词:超临界锅炉;热量信号;燃煤发热量;蓄热系数;直接能量平衡

中图分类号: TH17 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.30

Study on construction of heat release signal for supercritical boiler

Gu Junjie, Bai Zhizhong, Wang Peng, Zhang Yan

(School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The construction method of the heat release signal of a supercritical boiler is proposed, which can accurately measure the calorific value of coal in the furnace. The thermodynamic property standard, IAPWS-IF97 is adopted to partition the supercritical boiler water cooled wall, which solves the difficult problem of judging the working fluid state within the water cooled wall under supercritical condition; and the boiler heat storage coefficient is calculated in detail. According to the structure parameters and actual operation data of a certain 1000MW unit, the heat release signal of the structure was verified. The results show that the heat release signal can rapidly response to the unit load change, at the same time accurately reflect the changes of the calorific value of coal in the furnace, which lays a foundation for the design of the direct energy balance coordinated control system of supercritical units.

Keywords: supercritical boiler; heat release signal; calorific value of coal; heat storage coefficient; direct energy balance

1 引 言

超临界机组凭借其煤耗低、排污少等优点逐渐成为我国火力发电的主力机组^[1]。超临界锅炉由于燃煤发热量波动引起机组中间点过热度与主蒸汽压力变化较大对超临界锅炉运行稳定性、经济性不利^[2],根本原因为超临界机组采用主蒸汽压力与主蒸汽压力给定值偏差的大小作为反映机炉能量平衡信号不能及时控制超临界锅炉给煤量,消除燃煤发热量变化引起的运行参数波动。如何构造热量信号来快速、准确反映超临界锅炉入炉燃煤发热量对机组运行安全性、经济性具有重要意义^[3-4]。

构造超临界锅炉热量信号反映入炉燃煤发热量方

面,文献[5]提出超临界锅炉中不同信号具有互补的频谱特性^[6-7],并利用沿工质流程各汽温信号稳态精度高和锅炉给粉信号响应速度快的互补特性,经过信息融合构造反映入炉燃煤发热量的热量信号,提高了测量的快速性和准确性;文献[8]依据热值观测器的概念,通过对“广义热值”观测器的数学分析,运用能量守恒定律构造出一种燃煤热值软测量算法;文献[9]提出一种从水冷壁汽水系统吸热过程提取热量信号的方法,通过研究发现水冷壁吸热量与煤燃烧发热量之间存在近似线性关系,由此推导出利用水冷壁的吸热量计算入炉燃煤发热量的方法;文献[10]给出一个基于炉膛燃烧和传热反问题的煤质测量模型,指出蒸发受热面内工质吸热量代表了炉内热辐射强度,该热量信号兼顾了静态精度和动态

响应,实现了燃煤发热量的在线监测。这些研究对测量入炉燃煤发热量具有重要意义,但以上构造超临界锅炉热量信号的方法用于机炉负荷协调控制在实时、快速、准确性方面还不具备实用推广价值。

以机炉能量平衡为基础构造超临界锅炉热量信号,该热量信号能够反映超临界锅炉在亚临界、临界和超临界工况下入炉燃煤发热量的大小。并以某电厂某1 000 MW超临界机组为研究对象,利用能量守恒法对该机组不同工况下锅炉蓄热系数进行了详细地计算。最后,结合该机组的实际运行数据对构造的热量信号进行验证。验证结果表明该热量信号具有快速、准确反映入炉燃煤发热量随负荷变化的能力。

2 超临界锅炉热量信号的构造

在超临界锅炉运行过程中,煤粉在炉膛燃烧释放的有效热量一部分被受热面内的工质吸收转化为过热蒸汽进入汽轮机做功,另一部分以蓄热的形式储存在受热面的工质和金属中^[11]。构造的热量信号要兼顾这两方面热量,才能够准确反映出入炉燃煤发热量的变化。

以机组调节级压力 P_1 加上锅炉的蓄热变化量(中间点压力 P_b 的微分与锅炉蓄热系数 C_b 的乘积)来构造超临界锅炉热量信号 Q_r :

$$Q_r = P_1 + C_b \frac{dP_b}{dt} \quad (1)$$

弗留戈尔公式在理论上表明在背压不变的情况下,汽轮机调节级压力 P_1 与进入汽机的蒸汽流量呈近乎线性关系。在前人对阀门流量特性研究过程中,通过试验数据指出调节级压力 P_1 与机组负荷(蒸汽流量)呈近似线性关系^[12]。因此调节级压力 P_1 反映锅炉的输出能量,并且在机组运行过程中很容易被测得。中间点压力 P_b 的微分与锅炉蓄热系数 C_b 的乘积则反映动态过程中锅炉蓄热的变化。当微分为正,锅炉蓄热;微分为负,锅炉放热。这两部分热量之和反映了入炉燃煤发热量的变化,它即能代表燃料数量的改变,也可反映燃料成分的改变。

由于负荷的变化,超临界锅炉在亚临界至超临界工况下运行。构造的热量信号应适用于不同工况。这就需要计算不同工况下超临界锅炉蓄热系数。由于传统采用的试验法来得到超临界锅炉蓄热系数并不合适,现在多采用能量守恒法^[13-15]来计算蓄热系数。超临界锅炉蓄热系数计算的难点在于,在超临界工况下,超临界锅炉水冷壁内工质不经过蒸发直接汽化,导致难以判断工质状态变化的分界点。采用热力性质标准 IAPWS-IF97 可以很好地解决超临界工况下水冷壁分段问题。本文将超临界锅炉受热面分为水冷壁和过热器

两部分,通过分别求取二者的关系式来得到最终的锅炉蓄热系数。

3 超临界锅炉蓄热系数的计算

3.1 水冷壁各段长度的计算

3.1.1 临界压力以下时各段长度的求取

亚临界工况下超临界锅炉水冷壁各段工质的示意图如图1所示,水冷壁以工质的不同状态为界划分为3段:加热段 l_1 、蒸发段 l_2 和过热段 l_3 ^[16-17]。

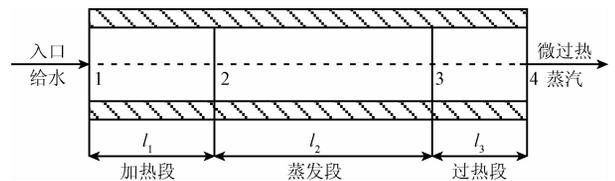


图1 亚临界工况水冷壁工质状态示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the working fluid state within the water cooled wall under subcritical condition

对水冷壁管道作出如下的假设:1)将整个水冷壁视为一根管道;2)烟气对水冷壁的放热量沿垂直方向均匀分布,忽略管子的轴向导热;3)工质从水冷壁的吸热量沿垂直方向均匀分布;4)工质在水冷壁中的压降沿垂直方向均匀分布;5)任一管子横截面上的流体特性均匀分布;6)通过每根水冷壁管子的质量流量相等。

工质在单位长度水冷壁管道上焓值变化为:

$$\Delta h = (h_4 - h_1)/H \quad (2)$$

工质在单位长度水冷壁管道上压降为:

$$\Delta p = (p_1 - p_4)/H \quad (3)$$

式中: h_1 、 h_4 分别为工质在水冷壁进、出口的焓值,单位为 kJ/kg; p_1 、 p_4 分别为工质在水冷壁进、出口的压力单位为 MPa; H 为水冷壁的总高度,单位为 m。

按照如下步骤来计算亚临界压力下水冷壁各段的长度:

1)假设加热段长度 l_1 ,可以从0开始假设,从而保证假设值不超过实际值;

2)通过式(2)和(3)计算上图中“2”处的焓值 h_2 和压力 p_2 ;

3)查表在压力 p_2 下对应饱和水的焓值 h_{20} 并与 h_2 相比较,然后不断更新 l_1 的长度,直到 h_{20} 与 h_2 的差值在误差允许的范围;

4)假设蒸发段长度 l_2 ,通过式(2)和(3)计算上图中“3”处的焓值 h_3 和压力 p_3 ;

5)查表在压力 p_3 下对应饱和和蒸汽的焓值 h_{30} 并与 h_3 相比较,然后不断更新 l_2 的长度,直到 h_{30} 与 h_3 的差值在

误差允许范围内;

6) l_3 的长度即水冷壁总长度减去 l_1 、 l_2 的结果。

通过以上步骤可以确切地计算出 l_1 、 l_2 、 l_3 的数值。需要注意的是,在实际工况下各段长度不是一个固定值,而是在动态过程中随工况变化而不断变化的。但在某一个确定的负荷下,各段长度的动态变化量较小,可以忽略这一段长度上的蓄热量。

3.1.2 超临界压力时各段长度的求取

在上述临界压力以下时,饱和水与饱和蒸汽的分界点具有明显的物理意义。而在临界压力及超临界压力时,水不经蒸发直接变成蒸汽,二者之间没有明显的分界点。对于相变点的确定,一般都采用临界比体积点或最大比热容点^[18]作为超临界压力下水冷壁受热面水和蒸汽的分界点。为了更准确求得分界点,采用热力学性质标准 IAPWS-IF97^[19]对超临界锅炉水冷壁进行分段,如图2所示。

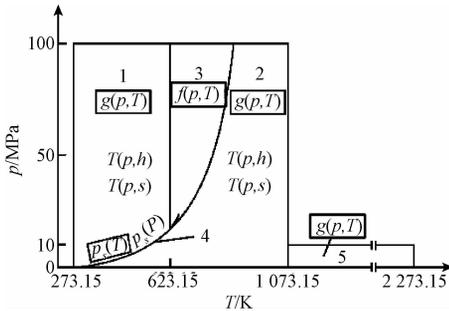


图2 IAPWS-IF97 的分区标准

Fig.2 Partitioning criterion of the IAPWS-IF97

区域1为单相液态区,区域3为临界状态区,区域2为单相汽态区,区域1和区域3之间的界限为 $T = 350^\circ\text{C}$ 的定温线,通过对相应状态下工质压力与温度对应参数的拟合得到区域2和3界限曲线关系式为:

$$t_c = -0.080 3P_c^2 + 8.671 1P_c + 237.1 \quad (4)$$

此时将水冷壁分为3段:加热段 L_1 、过渡段 L_2 和过热段 L_3 。如图3所示。

$$C'_{b1} = \frac{\Delta \dot{m}}{dp_b} = \frac{\left[(v_{fo} - v_{go}) \left(M_{fo} \frac{dh_f}{dp} + M_{go} \frac{dh_g}{dp} + D_o \frac{dh_g}{dp} \right) + (h_{go} - h_{fo}) \left(M_{go} \frac{dv_g}{dp} + M_{fo} \frac{dv_f}{dp} \right) \right]}{\left[(v_{fo} - v_{go}) (h_{go} + h_{fo}) - v_{fo} (h_{fo} - h_{go}) \right]} \quad (8)$$

为了便于工程应用将 C'_{b1} 的纲量换成秒,得到蓄热系数 C_{b1} :

$$C_{b1} = C'_{b1} \frac{P_d}{D_o} \quad (9)$$

在式(5)~(8)中, M_f 、 M_g 代表控制体中液态水和蒸汽的质量,单位为 kg; v_f 、 v_g 代表控制体中液态水和蒸汽

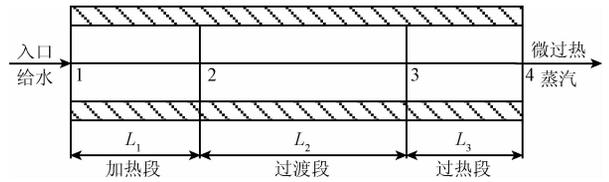


图3 超临界工况水冷壁工质状态

Fig.3 Schematic diagram of the working fluid state within the water cooled wall in supercritical condition

超临界压力下水冷壁各段的长度计算步骤如下:

1) 假设加热段长度 L_1 , 可以从0开始假设,从而保证假设值不超过实际值;

2) 利用式(2)和(3)计算“2”处的焓值 H_2 和压力 P_2 , 并通过 H_2 和 P_2 查表得对应温度 T_2 , 与定温线 $T = 350^\circ\text{C}$ 相比较,如果误差超过允许范围,则重新假设 L_1 , 直到满足要求为止;

3) 假设过渡段长度 L_2 , 可以得到“3”处的焓值 H_3 和压力 P_3 , 通过查表对应温度 T_3 , 利用压力 P_3 带入式(4), 计算出 T_{30} , 与 T_3 相比较,如果误差小于允许范围,则得到 L_2 长度, 否则不断更新 L_2 ;

4) L_3 的长度由水冷壁总长度减去 L_1 、 L_2 得到。

3.2 水冷壁蓄热系数的推导过程

无论超临界锅炉在何种工况下运行,工质在水冷壁过热段的入口均为微过热蒸汽,因此将水冷壁过热段与汽水分离器看作水冷壁的过热部分进行蓄热系数的求解。水冷壁过热段之前的蓄热系数 C_{b1} 求解过程如下。

以水冷壁内加热段与蒸发段的工质为控制体分别列质量守恒、体积守恒和能量守恒方程如下:

$$\frac{dM_f}{dt} = \Delta \dot{m} - \frac{dM_g}{dt} \quad (5)$$

$$v_{go} \frac{dM_g}{dt} + M_{go} \frac{dv_g}{dp} \frac{dp}{dt} + v_{fo} \frac{dM_f}{dt} + M_{fo} \frac{dv_f}{dp} \frac{dp}{dt} = 0 \quad (6)$$

$$\Delta \dot{Q} - \Delta \dot{m} h_{go} - \dot{D}_o \frac{dh_g}{dp} \frac{dp}{dt} = M_{go} \frac{dh_g}{dp} \frac{dp}{dt} + h_{go} \frac{dM_g}{dt} + M_{fo} \frac{dh_f}{dp} \frac{dp}{dt} + h_{fo} \frac{dM_f}{dt} \quad (7)$$

的比容,单位为 m^3/kg ; h_f 、 h_g 代表控制体中液态水和蒸汽的比焓,单位为 kJ/kg ; P_b 代表蒸发段中的集中参数压力,单位为 MPa; $\Delta \dot{m}$ 为控制体单位时间质量变化量,单位为 kg/s ; \dot{D}_o 为工质质量流量,单位为 kg/s ; 带下标“o”表示静态工况下的参数。

对于水冷壁的过热段和汽水分离器,工质在水冷壁

过热段出口已经呈微过热状态。这里把汽水分离器看作一般管道处理,将水冷壁加热段与汽水分离器看作一个整体,按容积等分 n 段,这里的 n 根据容积大小适当选取,如图4所示。

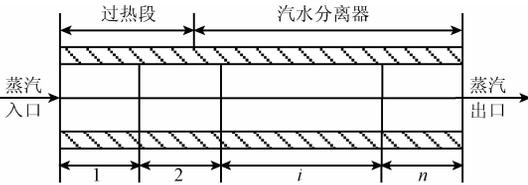


图4 水冷壁过热段和汽水分离器分段示意图

Fig.4 Schematic diagram of the water cooled wall overheating section and steam water separator section

工质在每段管道中的焓值变化为:

$$\Delta h = (h_{qs} - h_3)/n \quad (10)$$

工质在每段管道中的压降为:

$$\Delta p = (p_3 - p_{qs})/n \quad (11)$$

其蓄热系数 C'_{b2} 的计算采用公式:

$$C'_{b2} = \sum_{i=1}^n \frac{dM_i}{dp} = \sum_{i=1}^n V_i \frac{d\rho_i}{dp_i} \quad (12)$$

为了便于工程应用将 C'_{b2} 的纲量换成 s, 得到蓄热系数 C_{b2} :

$$C_{b2} = C'_{b2} \frac{p_d}{\dot{D}_o} \quad (13)$$

式中: h_{qs} 为工质在汽水分离器出口的焓值, 单位为 kJ/kg; h_3 为工质在水冷壁过热段入口的焓值, 单位为 kJ/kg; p_{qs} 为工质在汽水分离器出口的压力, 单位为 MPa; p_3 为工质在水冷壁过热段入口的压力, 单位为 MPa; M_i 、 V_i 、 ρ_i 分别为控制体中工质的质量、体积、密度, 单位分别为 kg、 m^3 、 kg/m^3 ; p_d 为汽水分离器出口压力, 单位为 MPa; \dot{D}_o 为工质质量流量, 单位为 kg/s; 下标“ i ”代表第 i 段。

3.2.1 亚临界工况水冷壁蓄热系数的计算

当超临界锅炉在亚临界工况运行时, 水冷壁加热段与蒸发段内工质有不饱和水、饱和水、饱和蒸汽3种不同的状态。由于不饱和水欠焓较低, 所以可以近似认为只有饱和水和饱和蒸汽两种状态。蒸发段的入口压力 p_2 和出口压力 p_3 , 取其平均值记作集中参数 p_d , 得到在 p_d 压力下饱和水的比焓 h_{f0} 和比容 v_{f0} , 饱和蒸汽的比焓 h_{g0} 和比容 v_{g0} 。并通过拟合曲线拟合出

$$\frac{dh_f}{dp} \frac{dv_f}{dp} \frac{dh_g}{dp} \frac{dv_g}{dp}$$

认为加热段内工质全部是液态水, 蒸发段内工质近似看成水和蒸汽各占一半容积, 从而得 M_{f0} 和 M_{g0} 计算式为:

$$M_{f0} = \frac{\left(V_1 + \frac{V_2}{2}\right)}{v_{f0}} = \frac{\left(l_1 + \frac{l_2}{2}\right)V_w}{Hv_{f0}} \quad (14)$$

$$M_{g0} = \frac{V_2}{2v_{g0}} = \frac{l_2 V_w}{2Hv_{g0}} \quad (15)$$

式中: V_1 为水冷壁加热段容积, 单位为 m^3 ; V_2 为水冷壁蒸发段容积, 单位为 m^3 ; V_w 为水冷壁总容积, 单位为 m^3 。将上述得到的各种参数代到式(5)~(9)中计算, 即可得到水冷壁加热段与蒸发段的蓄热系数 C_{b1} 。

对于亚临界锅炉水冷壁过热段与汽水分离器, 按照以下步骤计算其蓄热系数 C_{b2} 。

1) 以第1段为例, 由式(10)和(11)分别计算第一段进、出口的压力和焓值。

2) 查表得对应进、出口工质温度 t_1 和 t_2 。为减小温度变化引起的误差, 取 t_1 与 t_2 的平均值作为该段集中温度 t_0 。

3) 拟合出 t_0 温度下工质的密度对压力的微分 $\frac{d\rho}{dp}$, 将对应参数带入式(12)计算出第一分段的蓄热系数值。

4) 其他等分段均按上述步骤求取蓄热系数, 并将求和结果代入式(13)得水冷壁过热段与汽水分离器的蓄热系数 C_{b2} 。

3.2.2 超临界工况水冷壁蓄热系数的计算

当超临界锅炉在超临界工况运行时, 由于高压的作用, 水冷壁过渡段中水不经蒸发直接变为蒸汽, 水与蒸汽物性参数相同, 之间没有明显的分界点。为了减少温度变化的影响, 以过渡段进出口压力 p_2 和 p_3 的算术平均值 p_b 为过渡段的集中压力, 取其在温度 t_2 下比容和焓值为 v_{f0} 和 h_{f0} , 取在过渡段出口温度 t_3 下比容和焓值为 v_{g0} 和 h_{g0} 。将过渡段的长度以一定的步长分段, 在每个分段点的压力下, 得到在 t_1 和 t_3 对应比容和焓值记作 v_f 、 h_f 、 v_g 、 h_g , 以此分别拟合出 $\frac{dh_f}{dp} \frac{dv_f}{dp} \frac{dh_g}{dp} \frac{dv_g}{dp}$ 。由式(14)和(15)计算 M_{f0} 和 M_{g0} , 将所有参数带入式(5)~(9)中即可得超临界工况下的水冷壁水段和过渡段的蓄热系数 C_{b1} 。

对于超临界工况下水冷壁过热段与汽水分离器, 其蓄热系数的计算同于亚临界工况下蓄热系数的计算。

3.3 过热器蓄热系数的求取

超临界锅炉过热器蓄热系数采用水冷壁过热段和汽水分离器部分的方法求取, 将过热器看作整体等分 N 份, 如图5所示。由于过热器容积远大于水冷壁过热段的容积, 这里的 N 大于3.2节中 n 。

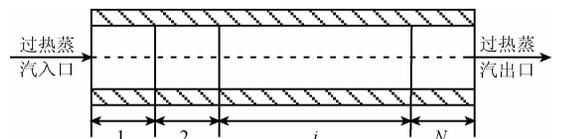


图5 过热器分段示意图

Fig.5 Schematic diagram of the superheater section

由3.2节水冷壁过热段的计算步骤及式(10)~(13),根据对应过热器参数可计算出过热器的蓄热系数 C_{sh} 。需要指出的是,该计算过程适用于亚临界至超临界工况。

4 蓄热系数实例计算

以某电厂某1 000 MW燃煤发电机组为研究对象,该

锅炉为型号DG3000/26.15-II1的高效超临界参数变压直流炉、一次再热、平衡通风、运转层以上露天布置、固态排渣、全悬吊结构II型锅炉。超临界锅炉主要结构参数如表1所示。超临界机组在30%THA(turbine heat-acceptance)、50%THA、70%THA和100%THA工况下稳态运行数据如表2所示。

表1 1 000 MW超临界锅炉主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of 1 000 MW supercritical boiler

名称	单位	数据	名称	单位	数据
锅炉深度	Mm	74 800	水冷壁有效容积	m ³	90.8
锅炉宽度	Mm	70 000	分离器有效容积	m ³	16.5
顶棚支撑面标高	Mm	84 400	过热器有效容积	m ³	279
炉膛宽度	Mm	33 973.4	水冷壁高度	m	64
顶棚标高	Mm	15 558.4	水冷壁金属质量	kg	550 000
水平烟道深	Mm	5 486.4	过热器金属质量	kg	2 400 000

表2 1 000 MW超临界机组主要运行参数

Table 2 Main operating parameters of 1 000 MW supercritical unit

项目	单位	100% THA	70% THA	50% THA	30% THA
过热器出口流量	t/h	2 733.4	1 833.6	1 289.8	909.9
再热器出口流量	t/h	2 733.4	1 833.6	1 289.8	909.9
水冷壁入口压力	MPa	29.12	21.52	15.30	10.85
水冷壁出口压力	MPa	27.95	20.88	14.89	10.61
分离器入口压力	MPa	27.95	20.88	14.89	10.61
分离器出口压力	MPa	27.62	20.69	14.75	10.51
过热器入口压力	MPa	27.62	20.69	14.75	10.51
过热器出口压力	MPa	25.99	19.70	14.03	10.01
省煤器出口温度	°C	333	306	283	276
启动分离器温度	°C	423	390	366	358
过热器出口温度	°C	605	605	605	605
水冷壁入口焓值	kJ/kg	1 507.35	1 365.13	1 247.99	1 213.88
分离器出口焓值	kJ/kg	2 693.15	2 714.34	2 818.79	2 938.67
过热器出口焓值	kJ/kg	3 499.50	3 555.74	3 604.57	3 638.06

由超临界机组结构参数和运行数据按照上文具体的计算过程求取锅炉30%THA、50%THA、70%THA和100%THA工况下水冷壁和过热器的蓄热系数。由运行参数可知,超临界锅炉在30%THA和50%THA工况时处于亚临界工况,在70%THA和100%THA工况时处于超临界工况。超临界锅炉水冷壁、过热器以及锅炉总体蓄热系数的计算结果如表3所示。

表3 蓄热系数计算结果

Table 3 The calculation result of heat storage coefficient

工况	水冷壁 蓄热系数/s	过热器 蓄热系数/s	锅炉总 蓄热系数/s
30% THA	24.3	43.7	68.0
50% THA	27.1	51.6	78.7
70% THA	17.1	63.0	80.1
100% THA	20.4	60.5	80.9

5 热量信号的验证

以某1000 MW超临界机组为研究对象,第4节已对其锅炉蓄热系数进行了计算,以该超临界机组两个具有代表性时间段的运行数据,对上文提出的超临界锅炉热量信号构造方法进行验证。第1时间段是13:13:10~14:08:30,该段时间机组在100% THA工况附近运行;第2时间段是22:06:30~22:29:50,该段时间机组从100% THA工况降负荷至80% THA工况。

超临界机组实际运行数据中包括对应时间点的机组负荷指令、给煤量、中间点压力、调速级压力。按照所提出的方法对超临界锅炉热量信号进行构造并对结果进行验证。由于对比验证时的数据包括锅炉入炉煤量、机组负荷指令及热量信号,对相关数据进行标幺可以有效解决单位不统一问题,因此将相关数据以机组100% THA工况实际运行参数为基准标幺后进行对比验证。验证结果如图6、7所示,结果表明按照此方法构造的超临界锅炉热量信号能够很好的跟随机组负荷变化和反映入炉燃煤发热量变化。

在图6中,超临界机组运行于100% THA工况附近时各项参数标幺后与所构造热量信号标幺值进行了对比。图6中曲线显示,依据机炉能量平衡所构造热量信号变化趋势与机组负荷波动和入炉燃煤量变化趋势相吻合,静态误差很小,能够很好的反映机组负荷波动与入炉燃煤发热量的变化。

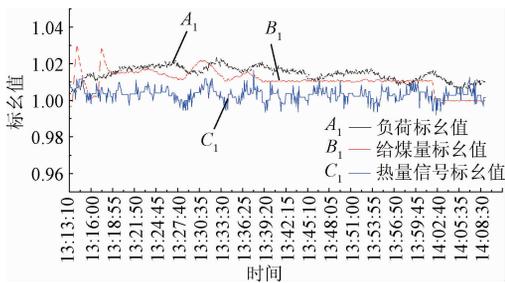


图6 100% THA工况附近运行数据与热量信号对比曲线

Fig. 6 Comparison curve of the operating data and heat release signal under 100% THA condition

如图7所示,超临界机组从100% THA工况减负荷至80% THA工况时各项参数标幺后与所构造热量信号进行对比。图7中曲线显示,在超临界机组降负荷过程中,入炉煤量随负荷降低而相应减少,热量信号也随入炉燃煤量的减少呈现下降的趋势。当机组负荷指令与热量信号差值增大时,入炉煤量及时改变来满足机组能量的需求。由以上验证结果显示所构造的超临界锅炉热量信号能够

快速、准确地地反映入炉燃煤发热量的变化,满足实际工程应用中对超临界锅炉热量信号的要求。

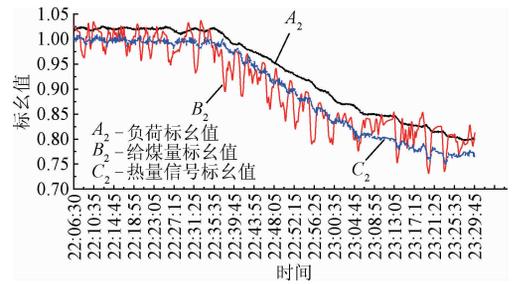


图7 100% THA降至80% THA运行数据与热量信号对比曲线

Fig. 7 Comparison curve of the operating data and heat release signal from 100% THA decreasing down to 80% THA

6 结论

针对超临界机组入炉燃煤发热量准确测量问题,提出一种基于机炉能量平衡原理的超临界锅炉热量信号构造方法,充分考虑了亚临界至超临界工况下热量信号的快速性、适用性。本文采用IAPWS-IF97标准对水冷壁进行分段,有效解决了超临界工况下锅炉水冷壁内工质状态难变化判断问题。

以某1000 MW超临界直流锅炉的结构及运行参数,对锅炉的蓄热系数进行了详细地计算,计算结果符合机组运行过程中的实际值。并以机组长时间实际运行数据为基础,对构造的热量信号进行验证,验证结果表明该热量信号能够很好地响应机组负荷变化以及入炉燃煤发热量的变化。可以作为实时、快速、准确的信号应用到机炉负荷协调控制中,为设计超临界机组直接能量平衡协调控制系统打下基础。

参考文献

- [1] 杨勇平, 杨志平, 徐钢, 等. 中国火力发电能耗状况及展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(23): 1-11.
YANG Y P, YANG ZH P, XU G, et al. Situation and prospect of energy consumption for China's thermal power generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(23): 1-11.
- [2] 钟崴, 刘成刚, 周永刚, 等. 基于煤质与机组性能分析的发电量成本预测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(11): 22-29.
ZHONG W, LIU CH G, ZHOU Y G, et al. Study on generation cost prediction based on coal quality and generating unit performance generating unit performance [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(11): 22-29.
- [3] 程栋, 温和, 滕召胜, 等. 基于双能 γ 射线的煤质灰分

- 软测量技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10): 2263-2270.
- CHENG D, WEN H, TENGZH SH, et al. Study on soft-sensing of coal ash content based on dual-energy γ -ray[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(10): 2263-2270.
- [4] 林海军, 李松辉, 汪鲁才, 等. 基于交流阻抗的掺杂煤炭快速识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 577-583.
- LIN H J, LI S H, WANG L C, et al. Fast recognition method for doped coal based on AC impedance [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(4): 577-583.
- [5] 于达仁, 范轶, 徐志强. 基于分布信息融合的直流锅炉燃料量信号重构[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 191-195.
- YU D R, FAN Y, XU ZH Q. Reconstruction for fuel signal of once-through boiler based on distributed data fusion [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 191-195.
- [6] 苏丹, 涂亚庆, 沈艳林, 等. 异频信号的交叉信息融合频率估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1): 15-22.
- SU D, TU Y Q, SHEN Y L, et al. A frequency estimation method based on cross information fusion for different frequency signals [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(1): 15-22.
- [7] 孙英侠, 李亚利, 宁宇鹏, 等. 频谱分析原理及频谱分析仪使用技巧[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(7): 76-80.
- SUNY X, LI Y L, NING Y P, et al. Spectrum analysis theory and spectrum analyzer using techniques [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(7): 76-80.
- [8] 韩忠旭, 周传心, 李丹, 等. 燃煤发热量软测量技术及其在超临界机组控制系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(35): 90-95.
- HAN ZH X, ZHOU CH X, LI D, et al. Soft measurement technology of coal-fired heat and its application on supercritical generating unit control system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(35): 90-95.
- [9] 孙群丽, 李家川, 王钊, 等. 超超临界机组热量信号构造研究[J]. 热力发电, 2009, 38(9): 37-39.
- SUN Q L, LI J CH, WANG ZH, et al. Study on construction of heat release signal for ultra-supercritical units [J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(9): 37-39.
- [10] 刘福国, 郝卫东, 胡志宏, 等. 采用炉膛燃烧和传热反问题在线测量超临界直流锅炉燃煤发热量[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(17): 8-15.
- LIU F G, HAO W D, HU ZH H, et al. On-line determination of the calorific value of fired coals in supercritical pressure once-through boilers based on inverse furnace combustion and radiation problems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(17): 8-15.
- [11] 秦志明, 刘吉臻, 张栾英, 等. 超临界直流锅炉蓄热的分析与计算[J]. 动力工程学报, 2013, 33(4): 250-255.
- QIN ZH M, LIU J ZH, ZHANG L Y, et al. Analysis and calculation of heat storage in supercritical once-through boilers [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 33(4): 250-255.
- [12] 盛镛, 刘复平, 刘武林, 等. 汽轮机阀门流量特性对电力系统的影响及其控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 104-108.
- SHENG K, LIU F P, LIU W L, et al. Influence of steam turbine valve discharge characteristics on power systems and its control strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 104-108.
- [13] 邓拓宇, 田亮, 刘吉臻. 超超临界直流锅炉蓄热能力的定量分析[J]. 动力工程学报, 2012, 32(1): 10-14.
- DENG T Y, TIAN L, LIU J ZH. Quantitative analysis on heat storage capacity of ultra-supercritical once-through boilers [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(1): 10-14.
- [14] DEMELLO F P. Boiler models for system dynamic performance studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(1): 66-74.
- [15] NAGHIZADEH R A, VAHIDI B, TAVAKOLI M R B. Estimating the parameters of dynamic model of drum type boilers using heat balance data as an educational procedure [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 775-782.
- [16] 谷俊杰, 张永涛, 曹喜果, 等. 超(超)临界直流锅炉蓄热系数计算[J]. 动力工程学报, 2015, 35(3): 173-177.
- GU J J, ZHANG Y T, CAO X G, et al. Calculation of heat storage coefficient for ultra supercritical once-through boilers [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(3): 173-177.
- [17] 王庆新, 顾浩, 杜阳华, 等. 基于目标差分特性的分段剔除方法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(2): 60-63.
- WANG Q X, GU H, DU Y H, et al. Outlier detection method based on flying object's difference feature [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(2): 60-63.

- [18] 黄锦涛,陈听宽. 超临界直流锅炉蒸发受热面动态过程特性[J]. 西安交通大学学报,1999,33(9):71-75.
HUANG J T, CHEN T K. Dynamic characteristics of evaporating heating surface in supercritical once-through boiler[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(9):71-75.
- [19] 李慧君,范伟,程刚强,等. IAPWS-IF97 计算模型中区域边界条件的确定[J]. 华北电力大学学报:自然科学版,2008,35(5):46-49.
LI H J, FAN W, CHENG Q, et al. Determination of region boundary conditions on calculating models of the IAPWS-IF97 [J]. Journal of North China Electric Power University, 2008, 35(5):46-49.

作者简介



谷俊杰(通讯作者),分别在1982年和1988年于华北电力学院获得学士学位和硕士学位,现为华北电力大学教授,主要研究方向为火力发电机组自动化。
E-mail: gujj59@sina.com

Gu Junjie (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1982 and M. Sc. degree in 1988 both from North China Electric Power Institute; now, he is a professor in North China Electric Power University. His main research interest includes automation of thermal power generating units.



白智中,2015年于河北工程大学获得学士学位,现为华北电力大学硕士研究生,主要研究方向为超临界机组运行优化。
E-mail: baizhizhong_24@163.com

Bai Zhizhong received his B. Sc. degree in 2015 from Hebei University of Engineering; he is currently a master candidate in North China Electric Power University. His main research interest includes operation optimization of supercritical unit.