

基于实时数据库的电站锅炉热效率在线计算方法

应明良, 吕洪坤, 茅建波, 徐小琼, 张晓龙

(国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014)

摘要: 提出了一种利用机组实时运行参数计算锅炉热效率的方法, 在不进行煤质测试的情况下, 根据锅炉有效输出热量和总输出热量计算锅炉热效率。该方法通过实时数据平台实现锅炉热效率在线计算, 可为技术人员及时调整运行操作提供参考。某机组一天不同负荷下的锅炉热效率计算结果与不同负荷下锅炉性能试验结果基本吻合, 说明该计算方法能满足实时性和准确性要求。

关键词: 实时数据库; 锅炉热效率; 在线计算

文章编号: 1007-1881(2019)07-0092-04

DOI: 10.19585/j.zjdl.201907016

中图分类号: TM621.2

文献标志码: B

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



An Online Calculation Method of Power Station Boiler Efficiency Based on Real-time Database

YING Mingliang, LYU Hongkun, MAO Jianbo, XU Xiaoqiong, ZHANG Xiaolong

(State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: A boiler efficiency calculation method using real-time operation parameters of the unit is proposed. The boiler heat efficiency is calculated by the effective output heat and total output heat without coal quality test. Through real-time data platform, the on-line calculation of boiler efficiency can be realized, which can be used as a reference for technicians to make operation adjustment timely. The calculation results of thermal efficiency of a boiler under different loads in one day is consistent with the test results of boiler performance under different loads, which means the calculation method can meet the requirements of being real-time and accurate.

Keywords: real-time database; boiler heat efficiency; online calculation

0 引言

锅炉热效率是反映锅炉运行经济性的一项非常重要的技术经济指标。锅炉热效率在线计算可为优化调整锅炉运行工况提供详尽的技术数据, 并在运行过程中实时计算出锅炉的正平衡或反平衡效率, 及时了解锅炉的运行状况及各项损失的大小, 对于提高锅炉运行的经济性和运行调节水平具有重要的意义。

根据锅炉性能试验标准(国家标准和美国标准)进行锅炉热效率计算时, 涉及的参数繁多且实时监测比较困难, 在线计算具有一定的难度^[1]。无论是采用输入-输出热量法(即正平衡法)或热损

失法(即反平衡法)进行计算时, 都需要涉及入炉煤的煤质特性, 包括煤的工业分析、元素分析、高位/低位发热量等^[2-3]。有些发电厂安装了煤质在线分析系统, 测定煤中的灰分、水分和元素组成, 进行锅炉热效率的在线计算^[4]; 大多数发电厂没有安装煤质在线分析系统, 且发电厂现场煤质分析只有工业分析, 无法依据标准进行实时计算。因此, 在锅炉效率在线计算系统的处理过程中, 往往是将前一工作日的采样分析结果作为当前燃料的特性处理, 并根据工业分析结果进行元素分析数据的近似推算, 这种处理方式必然给在线计算结果带来一定的误差^[5-7]。文献[8]提出不需要入炉煤煤质参数和灰渣可燃物含量进行锅炉反

平衡热效率的计算,但根据烟气成分进行固体未完全燃烧热损失计算有一定的局限性。

本文提出一种利用机组实时运行数据进行锅炉热效率在线计算的方法。该方法建立在机组运行监控参数(汽水系统、烟气参数)的基础上,利用在线飞灰含碳量测量装置数据,能够在不进行煤质测试的情况下,满足锅炉热效率计算的要求。

1 实时数据平台简介

基于实时数据平台的浙江省电力行业节能减排监管系统实现海量实时数据的自动采集、历史数据的压缩存储、高效的查询检索和统计分析^[9],能够在线存储数百万甚至上千万采集点的数年历史数据,数据涵盖发电厂的锅炉、汽机、环保等专业,目前数据采集分辨率达到15 s。

该系统实现了对在线数据的采集、传输、处理、计算、分析、发布、共享等全过程的数字化管理,用户可根据数据统计模型和公式建立计算点^[10],由系统自动计算并存储计算结果,实时监视火力发电机组的运行能耗、排放等情况,为电力行业的节能减排目标制定提供决策依据。

2 锅炉热效率计算模型

由于无法获得锅炉入炉煤的煤质特性实时数据,以锅炉总输出热量代替锅炉输入热量,根据锅炉的有效输出热量和总输出热量计算锅炉热效率:

$$\eta_{\text{gl}} = \frac{Q_{\text{gl}} + Q_{\text{zr}}}{Q_{\text{gl}} + Q_{\text{zr}} + Q_{\text{py}} + Q_{\text{fh}} + Q_{\text{z}} + Q_{\text{sr}} + Q_{\text{pw}} + Q_{\text{sm}} + Q_{\text{xl}}}, \quad (1)$$

式中: η_{gl} 为锅炉热效率; Q_{gl} 为过热蒸汽吸收的能量; Q_{zr} 为再热蒸汽吸收的热量; Q_{py} 为锅炉热力边界出口烟气输出的能量; Q_{fh} 为锅炉热力边界出口飞灰输出的能量; Q_{z} 为锅炉热力边界出口炉渣输出的热量; Q_{sr} 为锅炉的散热损失; Q_{pw} 为锅炉排污水输出的能量; Q_{sm} 为磨煤机排出石子煤输出的热量; Q_{xl} 为锅炉侧泄漏汽、水输出的能量。

2.1 过热蒸汽吸收的能量

根据锅炉末级过热器出口蒸汽流量、蒸汽压力和温度、省煤器入口给水流量测点之前喷入锅炉水侧的各级减温水流量、省煤器入口给水温度和压力、省煤器入口给水流量测点之前喷入锅炉水侧的各级减温水温度和压力的实时数据进行过热蒸汽吸收的热量 Q_{gl} 的计算。

$$Q_{\text{gl}} = D_{\text{glqc}} h_{\text{glqc}} - \left(D_{\text{glqc}} - \sum_{i=1}^n D_{\text{glw-i}} \right) h_{\text{fw}} - \sum_{i=1}^n D_{\text{glw-i}} h_{\text{glw-i}}, \quad (2)$$

式中: i 为当前级数; n 为省煤器入口给水流量测点之前喷入锅炉水侧的减温水级数; D_{glqc} 为锅炉末级过热器出口蒸汽流量; $D_{\text{glw-i}}$ 为省煤器入口给水流量测点之前喷入锅炉的各级减温水流量; h_{glqc} 为锅炉末级过热器出口蒸汽的焓值; h_{fw} 为省煤器入口给水的焓值; $h_{\text{glw-i}}$ 为省煤器入口给水流量测点之前喷入锅炉水侧的各级减温水的焓值。

2.2 再热蒸汽吸收的热量

根据再热器进口的蒸汽流量、再热器水侧喷入的减温水量、再热器出口蒸汽压力和温度、再热器进口蒸汽压力和温度,以及再热器减温水的压力和温度的实时数据,进行再热蒸汽吸收的热量 Q_{zr} 的计算。

$$Q_{\text{zr}} = (D_{\text{zrj}} + D_{\text{zjw}}) h_{\text{zqc}} - D_{\text{zrj}} h_{\text{zrj}} - D_{\text{zjw}} h_{\text{zjw}}, \quad (3)$$

式中: D_{zrj} 为再热器进口的蒸汽流量; D_{zjw} 为再热器水侧喷入的减温水流量; h_{zqc} , h_{zrj} 分别为再热器出口、进口蒸汽的焓值; h_{zjw} 为再热器减温水的焓值。

2.3 锅炉热力边界出口烟气输出的能量

锅炉热力边界出口烟气输出能量的计算公式为:

$$Q_{\text{py}} = (V_{\text{py}} - 1.24D_{\text{ch}}) C'_{\text{py}} (t_{\text{py}} - t_0) + 126.36 V_{\text{py}} \varphi(\text{CO}) + D_{\text{ch}} (h_{\text{pychs}} - h_{\text{fw}}), \quad (4)$$

式中: V_{py} 为锅炉热力边界出口的烟气量; D_{ch} 为吹灰蒸汽流量; t_0 为锅炉热力边界入口空气温度; t_{py} 为锅炉热力边界出口烟气温度; C'_{py} 为锅炉热力边界出口扣除吹灰蒸汽影响之后烟气从 t_0 到 t_{py} 的平均定压比热; $\varphi(\text{CO})$ 为锅炉热力边界出口烟气中气体CO的体积分数; h_{pychs} 为 $1.24D_{\text{ch}}/V_{\text{py}}$ 烟气分压力以及 t_{py} 烟气温度条件之下的水蒸气焓值。

锅炉热力边界出口的烟气量 V_{py} 可根据CEMS(烟气自动监控系统)数据(包括排放口烟气流量、烟气含氧量等)以及锅炉热力边界出口处的烟气含氧量进行相应计算得出。

其中, C'_{py} 计算方式如下:

$$C'_{\text{py}} = \frac{\varphi(\text{CO}_2)'}{100} C_{\text{CO}_2} + \frac{\varphi(\text{H}_2\text{O})'}{100} C_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{\varphi(\text{O}_2)'}{100} C_{\text{O}_2} + \frac{\varphi(\text{CO})'}{100} C_{\text{CO}} + \frac{\varphi(\text{SO}_2)'}{100} C_{\text{SO}_2} + \frac{\varphi(\text{N}_2)'}{100} C_{\text{N}_2}, \quad (5)$$

式中: C_{CO_2} , $C_{\text{H}_2\text{O}}$, C_{O_2} , C_{CO} , C_{SO_2} , C_{N_2} 分别为 CO_2 ,

H_2O, O_2, CO, SO_2, N_2 从 t_0 到 t_{py} 的平均定压比热; $\varphi(X_i)'$ 为扣除吹灰蒸汽对尾部烟气稀释影响之后烟气中气体 $X_i (i=1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 的体积分数, X_1-X_6 分别代表 $CO_2, O_2, CO, SO_2, N_2, H_2O$ 。

$$\varphi(H_2O)' = 100 - \sum_{i=1}^5 \varphi(X_i)' \quad (6)$$

$$\varphi(X_i)' = \frac{V_{py}}{V_{py} - 1.24D_{ch}} \varphi(X_i) \quad (7)$$

$$\varphi(N_2) = 100 - \varphi(CO_2) - \varphi(H_2O) - \varphi(O_2) - \varphi(CO) - \varphi(SO_2) \quad (8)$$

式中: $\varphi(X_i)$ 为锅炉热力边界出口烟气中气体 X_i 的体积分数。

基于目前国家对温室气体排放量控制的要求, 可以在机组排放口加装 CO_2 浓度测量元件, 然后进行锅炉热力边界出口烟气 CO_2 含量的计算。另外, 根据 ASME(美国机械工程师协会)标准关于 CO_2 含量计算方法可知, 同一煤种在灰渣含碳量不变的情况下, 锅炉热力边界出口烟气 CO_2 含量与氧量基本成线性关系, 故可根据燃煤情况推导出锅炉热力边界出口烟气 CO_2 含量与氧量的拟合公式, 根据氧量进行 CO_2 含量的计算。

锅炉热力边界出口烟气水分含量可由锅炉烟气脱硝装置进/出口烟气含氧量(干态)、省煤器出口/空气预热器进口烟气含氧量(湿态)进行计算。

锅炉未完全燃烧产生的 CO 浓度一般很小, 可忽略不计。但如果在脱硝反应器进/出口或烟囱排放口等烟道处安装的 CEMS(烟气在线监测系统)中有 CO 浓度测量元件, 由于 CO 含量受漏风的影响比氧量要小得多^[11], 则可以根据 CO 含量测量值进行锅炉热力边界出口烟气 CO 含量的计算。

对于吹灰蒸汽流量, 可安装相关装置进行测量, 也可根据省煤器入口给水流量、锅炉末级过热器出口蒸汽流量、省煤器入口给水流量测点之前喷入锅炉水侧的各级减温水流量进行计算。

$$D_{ch} = D_{fw} + \sum_{i=1}^n D_{gfw-i} - D_{gqc} \quad (9)$$

2.4 锅炉热力边界出口飞灰、炉渣输出的热量

根据锅炉热力边界出口烟气中的飞灰浓度、锅炉热力边界出口烟气温度、锅炉热力边界出口烟气中飞灰可燃物含量等实时数据进行锅炉热力边界出口飞灰和炉渣输出热量的计算。

$$Q_h + Q_z = \mu(\text{ash})V_{py}(h_h - h_{h0}) + \frac{1}{a}\mu(\text{ash})V_{py}(h_z - h_{z0}) +$$

$$0.33727(1 + \frac{1}{a})\mu(\text{ash})V_{py}c_{fh} \quad (10)$$

式中: $\mu(\text{ash})$ 为锅炉热力边界出口烟气中的飞灰质量浓度; h_h 为锅炉热力边界出口烟气中飞灰热焓值; h_{h0} 为磨煤机入口原煤温度条件下的飞灰热焓值; a 为锅炉热力边界出口飞灰与炉渣的质量比, 对于固态排渣煤粉锅炉可取 $a=9:1$; h_z 为锅炉热力边界出口炉渣热焓值; h_{z0} 为磨煤机入口原煤温度条件下的炉渣热焓值; c_{fh} 为锅炉热力边界出口烟气中飞灰可燃物含量, 由于炉渣质量只占灰渣总量的 10%, 且没有炉渣可燃物含量在线测量装置, 故炉渣可燃物含量取值为飞灰可燃物含量, 对计算结果影响很小。

2.5 锅炉排污水输出的能量

根据锅炉的排污水量等实时数据进行锅炉排污水输出能量的计算。

$$Q_{pw} = D_{pw}(h_{pw} - h_{fw}) \quad (11)$$

式中: D_{pw} 为锅炉的排污水量, 对于非超(超)临界机组锅炉的连排、定排流量可安装流量测量装置, 或根据机组实际情况设定锅炉的连排流量数值; h_{pw} 为锅炉排污水的焓值。

2.6 磨煤机排出石子煤输出的热量

根据磨煤机排出的石子煤量、石子煤发热量、排出石子煤的显热焓值等实时数据进行磨煤机排出石子煤输出热量的计算。如果石子煤量很少, 此项可忽略不计。

$$Q_{sm} = M_{sm}(Q_{smf} + h_{sm} - h_{sm0}) \quad (12)$$

式中: M_{sm} 为磨煤机排出的石子煤量; Q_{smf} 为石子煤发热量; h_{sm} 为排出石子煤的显热焓值; h_{sm0} 为磨煤机入口原煤温度条件下石子煤的显热焓值。

2.7 散热损失

根据锅炉末级过热器出口额定蒸汽流量和锅炉末级过热器出口蒸汽流量等实时数据进行锅炉散热损失的计算。

$$Q_{sr} = \frac{1}{17.18D_{gqc}(D_{r,gqc})^{-0.62} - 1} \times$$

$$(Q_{gq} + Q_{zq} + Q_{py} + Q_h + Q_z + Q_{pw} + Q_{sm} + Q_{xl}) \quad (13)$$

式中: $D_{r,gqc}$ 为锅炉末级过热器出口额定蒸汽流量。

3 计算实例

一般情况下, 锅炉过热蒸汽流量没有专门测量装置, 可根据给水流量、过热器减温水流量进

行计算,给水流量可在不同负荷下性能试验时根据计算出来的主蒸汽流量进行修正得出。再热器进口蒸汽流量可根据汽轮机侧相关热平衡进行计算^[12]。由于磨煤机正常运行时石子煤排放量比较少,且石子煤发热量也不大,磨煤机排出石子煤所输出的热量基本可忽略不计。

不同机组负荷下锅炉热效率实时计算结果与性能试验工况结果对比如图1所示。可以看出,某1000 MW超超临界机组在某一天机组负荷470~1000 MW时,锅炉热效率在93.5%~94.5%,与不同负荷下锅炉性能试验结果基本吻合。

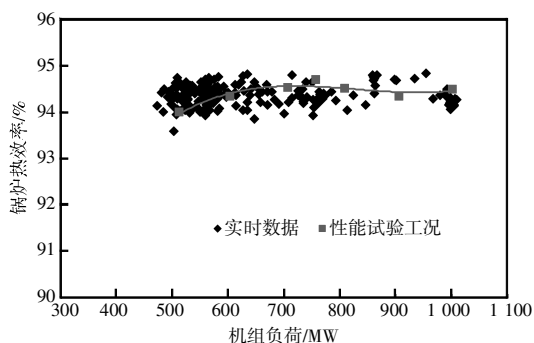


图1 不同机组负荷下锅炉热效率实时计算结果与性能试验工况结果对比

4 结语

本文提出了一种利用机组实时运行参数计算锅炉热效率的计算方法,在不进行煤质测试的情况下,根据锅炉有效输出热量和总输出热量计算出锅炉热效率。通过实时数据平台实现锅炉热效率在线计算,可为技术人员及时调整运行操作提供参考。

某机组一天不同负荷下的锅炉热效率计算结果与不同负荷下锅炉性能试验结果基本吻合,验证了本文计算方法的实时性和准确性。

同时,应根据需要进行给水流量、各级减温水流量、氧量、在线飞灰含碳量测量装置的修正、

校核工作,以确保计算结果的准确性。

参考文献:

- [1] 李惊涛,陈华桂.锅炉效率在线计算的困难及处理[J].广西电力,2002(4):15-17.
- [2] 电站锅炉性能试验规程:GB/T 10184-2015[S].2015.
- [3] Fired steam generators performance test codes: ASME PTC 4-2013[S].2013.
- [4] 叶江明.直流锅炉在线效率计算中存在的问题及处理[J].发电设备,2002(5):18-22.
- [5] 李智,蔡九菊,曹福毅,等.电站锅炉效率在线计算方法[J].节能,2005(3):28-29.
- [6] 江文豪,韦红旗.电站锅炉效率在线计算模型的比较与分析[J].发电设备,2011(2):73-76.
- [7] 范奇,王文庆,刘超飞,等.火电机组在线性能计算与性能试验对比分析[J].热力发电,2013(8):86-89.
- [8] 刘磊,张杨.一种新的锅炉热效率在线计算模型[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2013(6):618-621.
- [9] 周升,袁曹祥飞,杨银霞,等.节能减排实时数据中心的构建与实现[J].浙江电力,2014,33(3):58-62.
- [10] 赵琦,茅海泉,王函弘,等.节能减排监管系统中数据统计服务的实现与应用[J].浙江电力,2014,33(6):36-37.
- [11] 裘立春,张建华,基于CO的燃煤锅炉燃烧优化[J].浙江电力,2005,24(3):10-12.
- [12] 闫姝,曾德良,刘吉臻,等.基于简化热平衡方程的再热蒸汽流量实时软测量[J].中国电机工程学报,2011(5):114-119.
- [13] 项群扬,姚凯,杨威,等.ASME PTC 4-2013与GB 10184-88的主要差异及各因素对热效率的影响分析[J].浙江电力,2017,36(11):67-72.
- [14] 方超.燃煤锅炉煤质指标耗差分析方法研究[J].电力工程技术,2017,36(3):115-119.

收稿日期:2019-05-23

作者简介:应明良(1969),男,教授级高级工程师,从事锅炉燃烧优化、性能试验研究工作。

(本文编辑:童凯)