

一种风量的软测量方法研究

杨晨頔, 刘鑫屏

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 保定 071003)

摘要: 对于现阶段风量测量系统往往存在一些问题, 导致风量测量不准确或计算不精确的现状, 现提出一种基于氧量-热量的风量软测量方法。首先, 通过烟气成分分析的过程, 推导出了用烟气中的氧量计算风量的公式, 然后, 用煤的发热量来代替公式中的热量, 最后, 用给煤量进行动态补偿, 使公式计算所得到的结果与实际风量有相同的动态响应速率。通过在一台 600 MW 机组上进行实验, 对公式进行验证, 然后对比较测量所测的量和实际风量在不同工况下的曲线发现, 这个基于氧量-热量的软测量方法, 可以很好地反映实时风量, 且准确度高, 响应速度好, 可满足现场的需要。对于现阶段无法准确地测量风量的问题, 这种软测量方法可以有效地解决, 并可以在电厂中广泛地应用。

关键词: 氧量; 热量; 风量; 软测量

中图分类号: TM621.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)01-0081-05

Research on a Soft Measurement Method for Air Volume

YANG Chendi, LIU Xinping

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Currently, there are often some problems in the air volume measurement system, which leads to air volume measurement and calculations inaccurate. Therefore, a method for measuring air volume based on the amount of oxygen and heat was proposed. First of all, through the process of smoke composition analysis, the formula for calculating the air volume using the amount of oxygen in the flue gas was derived. Then, the calorific value of the coal was used instead of the heat in the formula. Finally, the amount of coal was used for dynamic compensation. The result of the formula calculation had the same dynamic response rate as the actual air volume. By conducting an experiment on a 600 MW unit, the formula was verified, and then comparing the measured volume of soft measurement with the actual air volume under different operating conditions, the oxygen-heat-based soft-sensing method was found to be very good. The real-time air volume was reflected, and the accuracy was high and the response speed was good, which can meet the needs of the site. For the problem that air volume cannot be accurately measured at this stage, this soft measurement method can be effectively solved and widely applied in power plants.

Key words: the amount of oxygen; the amount of heat; the amount of air; soft measurement

对于现在大型电站锅炉来说, 风量的配比是否合理, 直接关系到机组能否经济安全运行。如果风量非常小, 会使炉膛火焰中心偏低, 从而导致锅炉的蒸汽温度降低, 热效率降低; 反之风量过大, 则会造成炉膛火焰偏高, 导致减温水增加, 引风机耗电增加。所以说, 精确的风量测量, 对于锅炉经济安全的运行至关重要。

现在的风量测量系统往往有以下几个问题^[1]: (1)测量元件安装位置设计差; (2)仪表管堵塞或泄露, 准确性差; (3)现场没有进行标定或标定不准确; (4)乱用错用公式和运算方法。以上问题都会导致测量不精确或计算不准确, 从而误导机组人员操作, 影响机组的经济安全运行, 所以需要一种精确的风量测量的方法。

作为一种新型的测量方法, 软测量技术是在线分析辅助变量, 进而来估计不可测和难测的变量。在现在的火电厂中, 软测量技术应用比较广泛而且

取得了比较好的效果,如文献[2]提出了用软测量的方法来研究烟气中含氧量的研究;文献[3]将软测量的方法应用于超超临界燃煤机组的水煤比的研究;文献[4]在煤的发热量的研究中应用软测量的方法;文献[5]用软测量的方法研究电站锅炉的流量;文献[6]用软测量的方法研究电站锅炉的风量;文献[7]用软测量的方法来在线监视煤质的成分;文献[8]将软测量很好地应用于燃料的BTU校正。以上研究成果利用软测量的方法已经取得好的实用效果,所以说,软测量十分适用于电站锅炉风量的计算。

基于软测量的基本思想,本文提出了一种测量燃煤锅炉风量的方法:通过热量信号、氧量信号来计算风量。用煤的发热量来代替热量信号,并且通过给煤量对其进行动态补偿,氧量信号是利用安装在锅炉省煤器后面的氧化锆氧量测量器获得,然后利用获得的氧量、热量信号,计算得到总风量。这种方法对于风量计算的准确性来说,有很好的提升,且也非常满足电厂的现场需求。

1 机理分析

1.1 氧量信号的计算

通过过量空气系数计算锅炉烟气氧量的基本公式为

$$[O_2] = \frac{(\alpha - 1)V_1 O_2}{V_2 + (\alpha - 1)V_1} \quad (1)$$

式中: $[O_2]$ 为烟气中含有的氧气的体积分数,%; O_2 为空气中含有氧气的体积分数,是一个常数,近似取21%; α 为过量空气系数; V_1 为燃烧所需的实际风量, m^3/s ; V_2 为理论烟气体积, m^3/s 。

但是,实际上煤燃烧所需的烟气体积跟实际的燃烧后产生的烟气体积是有所差异的,需要一个定义数 A_1 来修正:

$$A_1 = \frac{0.09C_{ar} + 0.03H_{ar} + 0.01N_{ar}}{0.09C_{ar} + 0.27H_{ar} + 0.03(S_{ar} - O_{ar})} \quad (2)$$

式中: C_{ar} 、 H_{ar} 、 O_{ar} 、 S_{ar} 、 M_{ar} 分别为煤的收到基中碳、氢、氧、硫、水分的质量分数, %。

而空气过量系数是由煤燃烧所需的风量、煤燃烧产生的热量以及燃烧的理论空气热量比^[5]计算得到,而空气热量比由于实际的跟理论上有差别,需要一个系数 A_2 对其进行校正,则计算空气过量系数的公式为:

$$\alpha = \frac{V_1}{0.27A_2 Q_B} \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{C_{ar} + 2.98H_{ar} + 0.38w(S_{ar} - O_{ar})}{C_{ar} + 3.04H_{ar} + 0.32(S_{ar} - O_{ar}) - 0.07M_{ar}} \quad (4)$$

式中: V_1 为燃烧所需的实际风量, m^3/s ; Q_B 为当给煤量为 q_c (kg/s) 时,燃烧的热量, MW; C_{ar} 、 H_{ar} 、 O_{ar} 、 S_{ar} 、 M_{ar} 分别为煤的收到基中碳、氢、氧、硫、水分的质量分数, %。

将公式(2)、(3)、(4)代入公式(1),得到:

$$[O_2] = \frac{O_2(V_1 - 0.27A_2 Q_B)}{0.27A_2 Q_B(A_1 - 1) + V_1} \quad (5)$$

但是,实际氧量是在锅炉烟道中的氧化锆氧量测量表所测量的氧量,与公式中的氧量有所差别,需要对其进行修正。实际的烟气中含有一定的水蒸气,而这部分水蒸气主要由空气中的水分、煤中氢燃烧的水分、煤收到的基水分所组成,所以提出了一个煤质系数修正系数 A_3 :

$$A_3 = 0.11H_{ar} + 0.01M_{ar} \quad (6)$$

所以经过煤质系数修正后,得到的氧量计算公式为:

$$[O_2] = \frac{O_2(V_1 - 0.27A_2 Q_B)}{(A_1 + 0.02)V_1 + A_3 q_c} \quad (7)$$

1.2 热量的计算

式(5)、式(7)中的热量信号可以用煤的低位发热量来计算,即煤的低位发热量乘以给煤量计算得到热量信号。煤的低位发热量一般采用实验分析法得到,但是由于这种方法准确度不高,进而会影响风量测量的准确度,不宜采用。本文采用基于机组发电负荷-机前压力的简化非线性动态模型的煤发热量软测量方法^[9]来获得煤的低位发热量。这种方法简单好用,且已经被广泛应用。模型可以描述为^[10]:

$$r_m = e^{-\tau s} q_c \quad (8)$$

$$T_f \frac{dr_B}{dt} = r_m - r_B \quad (9)$$

$$C_b \frac{dp_d}{dt} = K_1 r_B - K_3 p_t u_t \quad (10)$$

$$T_t \frac{dN_E}{dt} = K_3 p_t u_t - N_E \quad (11)$$

$$p_t = p_d - K_2 (K_1 r_B)^{1.5} \quad (12)$$

$$p_1 = \frac{p_t u_t}{100} \quad (13)$$

式中: r_m 为实际进入磨煤量, kg/s ; q_c 为燃料量, kg/s ; τ 为制粉系统延迟时间, s ; T_f 为制粉系统惯性时间, s ; r_B 为锅炉燃烧效率, kg/s ; C_b 为锅炉蓄热系数, MJ/MPa ; K_1 为燃料量增益; K_3 为汽轮机增益; p_d 为汽包压力, MPa ; p_t 为机前压力, MPa ; u_t 为汽轮机的调门开度, $\%$; T_t 为汽轮机惯性时间, s ; N_E 为发电功率, MW ; p_1 为汽轮机调节级压力, MPa 。

由式(8)~式(13)进而推出煤的发热量计算公式:

$$K_1 = \frac{100K_3p_1(s) + \frac{C_b p_d(s)s}{1 + T_0 s}}{e^{-\tau s} q_c(s)} \quad (14)$$

$$Q_{ar} = \frac{K_1}{\eta_u} \quad (15)$$

式中: Q_{ar} 为煤低位发热量, MJ/kg ; K_1 为单位燃料量对应的机组负荷, MW ; η_u 为机组发电效率, $\%$; T_0 是为了避免实际微分不可实现而设立的时间常数, s 。

由公式(14)、(15)计算得到的煤的低位发热量 Q_{ar} 所需要的信号易得到, 可靠性高, 在工程中已经广泛应用, 可以有效地代替公式(5)、(7)中的热量信号 Q_B 。

$$Q_B = q_c Q_{ar} \quad (16)$$

式中: q_c 为燃料量, kg/s ; Q_{ar} 为煤低位发热量, MJ/kg 。

1.3 风量的计算

通过对煤质进行元素分析和计算发现, A_1 、 A_2 、 A_3 这三个变量基本不会随煤种的变化而变化, 可认为是一个常数。然后根据在锅炉烟道中的氧化锆测氧量器测得的氧量和煤的发热量计算风量, 可得总风量为:

$$V_1 = \frac{0.27A_2 Q_B ([O_2] (A_1 - 1) + O_2)}{O_2 - [O_2]} \quad (17)$$

同样, 在锅炉烟道中的氧化锆测氧量器测得氧量跟经过煤质和水蒸气修正后得到的湿烟气氧量计算值非常接近, 则得到总风量为:

$$V_1 = \frac{0.27A_2 Q_B O_2 + A_3 [O_2] q_c}{O_2 - [O_2] (A_1 + 0.02)} \quad (18)$$

式(17)、(18)可以用干烟气和湿烟气的氧量计算总风量, 且结果非常相似。

1.4 动态补偿

对于带稳定负荷或静态状况的机组, 式(17)、式(18)非常地适用, 但实际机组并非如此, 它往往由于电网调峰和一次调频的原因, 需要对发电负荷的定值进行修改, 进而使发电负荷的实际不断改变, 同时改变了锅炉的燃烧状态, 如果直接应用式(17)、式(18), 会有很大的误差。

煤粉一进入炉膛, 就迅速燃烧, 引起氧量和热量的变化, 是一个很快的过程。根据式(17)、式(18)计算风量时, 安装在烟道内的氧化锆测量器测得氧量, 响应时间比较快, 90% 响应时间为 $2 \sim 3 \text{ s}$, 当风量变化时, 氧量迅速地发生变化, 无需动态补偿; 但是实际热量信号就不同, 它是煤粉在锅炉炉内燃烧产生的瞬时热量, 而公式所用的热量是通过汽水侧参数计算所得, 两者有巨大的差别^[11], 所以需要引入锅炉总给煤量来对热量进行动态补偿, 公式为^[12]:

$$Q_F = q_c \frac{Q_B}{1 + T_f s} e^{-\tau s} \left[1 - \frac{1}{(1 + T_v s)^2} + Q_B \frac{1}{(1 + T_v s)^2} \right] \quad (19)$$

式中: Q_F 为炉膛内煤燃烧产生的瞬时热量, MW ; T_f 为锅炉制粉系统的惯性时间, s ; τ 为锅炉制粉系统延迟时间, s ; T_v 为滤波时间, s 。其中, T_f 、 τ 的取值根据文献[13]得到; T_v 根据现场调试经验得到, 一般为 T_f 的 $1/4 \sim 1/3$ 。

所以, 将式(19) Q_F 代替式(17)、式(18)的 Q_B 可以有效地提高公式的准确度。

$$Q_B = Q_F \quad (20)$$

2 实验数据验证

取某 600 MW 机组的运行数据, 分别在稳定高负荷、稳定低负荷、快速升负荷、快速降负荷的四种工况下对计算风量的式(17)、式(18)进行验证, 验证所用的风量为一次、二次风的总量。

实验采用式(18)计算风量, 公式中的氧量为省煤器后的氧化锆测得的氧量信号, 取左右两侧平均数; 热量为煤的发热量, 通过负荷-机前压力模型计算的; 且通过研究发现, A_1 、 A_2 、 A_3 都为常数, 分别为 1、1、0.5。验证结果如下图所示, 图 1~图 4 为在不同工况下得到的曲线, 分别为稳定低负荷、稳定高负荷、快速升负荷、快速降负荷的工况, 其中, 图 1~图 4 中黑色曲线 1 为实际风量,

红色曲线 2 为软测量测的风量。

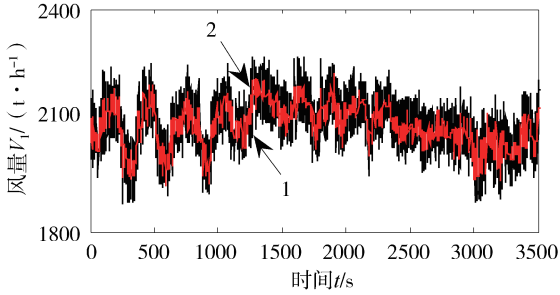


图 1 稳定低负荷时软测量风量与实际风量曲线对比

Fig. 1 Comparison between soft measurement air flow and actual air flow curve under steady low load

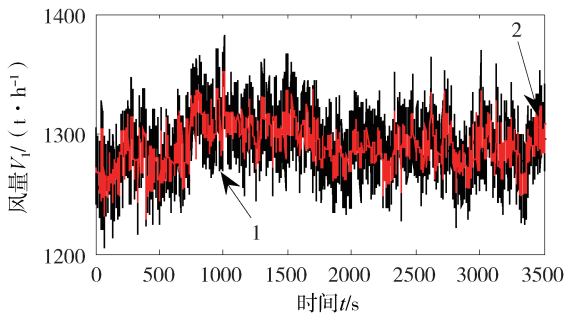


图 2 稳定高负荷时软测量风量与实际风量曲线对比

Fig. 2 Comparison between soft measurement air volume and actual air flow curve under steady high load

通过对图 1、图 2 的曲线研究发现,公式(18)计算所得风量与实际风量间的误差不超过 3%。由此可知,在稳定负荷的情况下,软测量所得到的风量与实际风量基本保持一致,且这种软测量方法有很好的静、动态特性。

通过对图 3、图 4 的曲线研究发现,在快速变负荷的情况下,公式(18)计算所得风量值与实际的风量值间的静态误差不超过 5%,特别是图 3 的 1 500 到 2 000 s 这一段,当风量从 $1\ 700\ \text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ 快速升到 $1\ 900\ \text{t} \cdot \text{h}^{-1}$,软测量获得的风量能快速地跟踪这一变化。由此而知,这种风量软测量方法在快速变负荷的情况下,有较好的静态误差且响应速率也较好。

3 结论

本文通过机理分析和实验验证的方法,并针对现在风量测量不准确的情况,提出了一种基于氧量-热量的风量软测量的方法,得到以下几个结论:

1)在烟气成分的分析过程中,且经过对煤质和

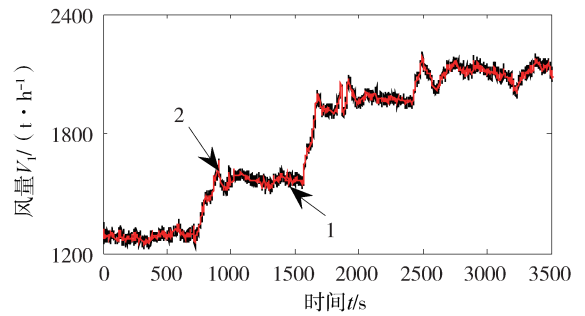


图 3 快速升负荷时软测量风量与实际风量曲线对比

Fig. 3 Comparison between the soft-measured airflow and the actual airflow curve at the time of rapid load-up

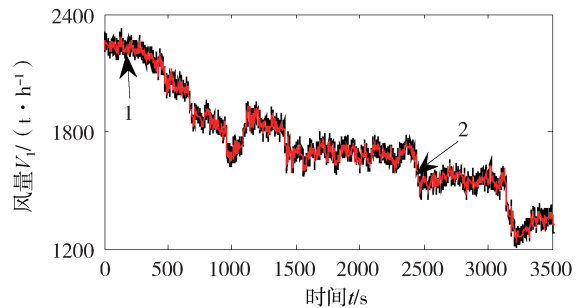


图 4 快速降负荷时软测量风量与实际风量曲线对比

Fig. 4 Comparison between the soft-measured airflow and the actual airflow curve when the load is reduced rapidly

空气湿度进行修正,推导出了用烟气中的氧量计算风量的公式。

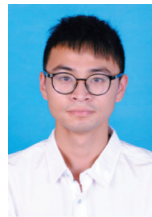
2)用负荷-机前压力的动态模型计算得到的煤的发热量来代替公式中的热量,且为了使软测量测的风量在动态上跟实际风量保持一致,用给煤量作动态补偿。

3)在一台 600 MW 机组上做试验,选取稳定低负荷、稳定高负荷、快速升负荷、快速降负荷四种工况,对比曲线发现,软测量测得风量与实际风量基本保持一致,有非常好的静、动态特性,满足现场的需要。在稳定负荷情况下,静态误差不超过 3%,在快速变负荷的情况下,静态误差不超过 5%。

参考文献:

- [1] 张清峰,毛永清,刘建华,等. 锅炉风量测量系统存在的问题及解决方案[J]. 电站系统工程, 2005, 21(3): 34-36.
ZHANG Q F, MAO Y Q, LIU J H, et al. Existing problems and solution for boiler air measuring system [J]. Power System Engineering, 2005, 21(3): 34-36.
- [2] 李健,张彬文. 烟气含氧量测量方法研究[J]. 仪器仪表用户, 2016, 23(2): 11-12.

- LI J, ZHANG B W. Research on sensing methods of oxygen content in flue gas [J]. Instrumentation Users, 2016, 23(2): 11-12.
- [3] 张维, 刘吉臻. 超超临界燃煤机组直流锅炉水煤比软测量方法研究 [J]. 动力工程学报, 2016, 36(2): 99-106.
ZHANG W, LIU J Z. A soft measurement method for water-coal ratio of an ultra supercritical once through boiler [J]. Journal of Power Engineering, 2016, 36(2): 99-106.
- [4] 郝晓辉, 刘鑫屏, 洪雨楠. 煤发热量实时校正方法研究 [J]. 电力科学与工程, 2016, 32(5): 59-64.
HAO X H, LIU X P, HONG Y N. Study on real-time correction method of coal calorific value [J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32(5): 59-64.
- [5] 佟纯涛, 金秀章, 郝兆平, 等. 基于变量筛选的烟气流量软测量研究 [J]. 电力科学与工程, 2016, 3(25): 49-54.
TONG C T, JIN X Z, HAO Z P, et al. Research on soft measurement of flue gas flow based on variable selection [J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 3(25): 49-54.
- [6] 田亮, 霍秋宝, 刘鑫屏. 电站锅炉总风量软测量 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(8): 1261-1266.
TIAN L, HUO Q B, LIU X P. Soft-sensors of the total air volume in utility boilers [J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(8): 1261-1266.
- [7] 苏保光, 田亮, 王琪, 等. 一种在线煤质软测量方法 [J]. 电力科学与工程, 2011, 27(7): 32-36.
SU B G, TIAN L, WANG Q, et al. An online soft measurement method for coal quality analysis [J]. Electric Power Science and Engineering, 2011, 27(7): 32-36.
- [8] 郝晓辉, 刘鑫屏. 直冷式空冷机组燃料 BTU 实时校正方法研究 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(4): 32-36.
HAO X H, LIU X P. Study on real-time correction method of fuel BTU for direct air-cooling unit [J]. South China Energy Construction, 2016, 3(4): 32-36.
- [9] 刘鑫屏, 田亮, 曾德良, 等. 基于机组负荷-压力动态模型的燃煤发热量实时计算方法 [J]. 动力工程学报, 2008, 28(1): 50-53.
LIU X P, TIAN L, ZENG D L, et al. A real time coal heat value calculation method based on unit load-pressure dynamic model [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(1): 50-53.
- [10] 田亮, 曾德良, 刘鑫屏, 等. 500 MW 机组简化的非线性动态模型 [J]. 动力工程学报, 2004, 24(4): 522-525.
TIAN L, ZENG D L, LIU X P, et al. A simplified non-linear dynamic model of 500 MW unit [J]. Journal of Power Engineering, 2004, 24(4): 522-525.
- [11] 田亮, 曾德良, 刘吉臻, 等. 简化的 330 MW 机组非线性动态模型 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 180-184.
TIAN L, ZENG D L, LIU J Z, et al. A simplified non-linear dynamic model of 330 MW unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 180-184.
- [12] 于达仁, 范轶, 徐志强. 炉膛辐射能信号和热量信号的信息融合 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 158-161.
YU D R, FAN Y, XU Z Q. A method for fusing radiation signal and heat release signal inside furnace [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 158-161.
- [13] 田亮. 单元机组非线性动态模型的研究 [D]. 华北电力大学, 2005.
TIAN L. Research of unit plant nonlinearity dynamic model [D]. North China Electric Power University, 2005.

 作者简介:


YANG C D

杨晨頔 (通信作者)

1992-, 男, 浙江杭州人, 华北电力大学硕士研究生, 主要从事数据融合和数据融合研究工作 (e-mail) 648962450@qq.com。



LIU X P

刘鑫屏

1975-, 女, 河北唐山人, 华北电力大学副教授, 华北电力大学博士, 主要从事热力发电建模、软测量及大机组智能优化控制工作 (e-mail) liuxinpingtyl@163.com。

(责任编辑 李辉)