

# 电站锅炉总风量软测量

田亮, 霍秋宝, 刘鑫屏, 刘吉臻

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

## Soft-sensors of the Total Air Volume in Utility Boilers

TIAN Liang, HUO Qiubao, LIU Xinping, LIU Jizhen

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources (North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** Since measurement facility for air volume of utility boiler has poor accuracy and is complicated to standardize, a soft-sensor method for total air volume in boiler was presented. By analyzing the relation between coal combustion heat and consumed air, the basic formula for air volume based on heat-oxygen content was constructed, which can eliminate the influence of unburned carbon theoretically, so the heat calculation process was relatively simple. After amending the coal quality and air humidity, by using the dry or wet flue gas oxygen content, the air volume with better accuracy was obtained. After the dynamic compensation of fuel flow, the consistency of dynamic response time between soft-sensor signal and practical signal was ensured. By the experiment in a 600 MW unit, the comparison between soft-sensor signal and practical signal of total air volume under different operation conditions was made. The experiment results show that the soft-sensor signal has the merits of better accuracy and quick dynamic response, and it is insensitive to the changes of coal quality, which can meet the local requirements in the thermal power plant.

**KEY WORDS:** boiler; air volume; soft-sensor; mechanism analysis; dynamic compensation

**摘要:** 电站锅炉风量测量装置准确度差、标定复杂。提出一种锅炉总风量软测量方法,通过分析煤燃烧产生热量与消耗空气量之间的关系,推导出利用热量-氧量计算风量的基本公式。从理论上可以消除未完全燃烧损失影响,因此热量计算过程相对简单。进一步经过煤质和空气湿度修正后,可以采用干烟气氧量或湿烟气氧量计算风量并具有更高的准确度。最后引入给煤量信号进行动态补偿,可保证软测量风量的动态响应速度同实际风量相一致。在一600MW机组上,通过实验对比不同负荷工况下软测量风量与实际测量风量,

结果表明软测量准确度好、动态响应速度快、受煤质变化影响小,能够满足现场需要。

**关键词:** 锅炉; 风量; 软测量; 机制分析; 动态补偿

## 0 引言

大型燃煤锅炉运行中经常出现因风量测量不准确,导致风煤配比精度变差进而影响锅炉燃烧的情况。造成风量测量误差的原因包括:1) 风量测量装置为非标准化测量装置,其测量准确度依赖于锅炉冷态时现场标定的准确度,在标定过程出现误差;2) 锅炉运行时一次、二次风温度分别超过250、300℃,风量测量装置产生热变形,或者锅炉长期运行后风量测量装置产生变形,导致流量系数发生变化;3) 风管道截面为矩形而且比较粗大,测量装置安装位置前后直管段不能满足测量要求,增加测量误差<sup>[1]</sup>;4) 锅炉烟气中的飞灰沉积在锅炉空气预热器中被风携带,导致风量测量装置产生磨损或局部堵塞,造成较大测量误差。出现以上情况时需要进行风量标定实验。传统标定实验中,由于现场安装设备时存在误差、风流动不均匀、冷态热态工况下风流动特性存在差异等原因,此方法标定的准确度也不是很高。

软测量技术是利用一些较易在线测量的辅助变量,通过在线分析,估计不可测或难测变量的方法<sup>[2]</sup>。近年来,关于软测量技术在火电厂中应用的研究文献非常多,如文献[2-4]采用机制分析及统计分析方法,建立的氧量软测量模型、煤质软测量及煤中水分的软测量模型。文献[5-6]提出根据锅炉风量、烟气氧量和热量的函数关系计算热量。将该热量信号应用于协调控制系统可有效改善控制品质,并能够克服燃料发热量的影响。文献[7]利用锅炉、

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51036002)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51036002).

汽轮机、磨煤机以及空气预热器的运行参数,间接实现入炉煤元素分析和发热量的实时监测。文献[8-9]基于人工智能,实现了 $\text{NO}_x$ 排放量的软测量。此外,还有燃煤发热量等方面的文献<sup>[10-13]</sup>。以上研究多采用机制分析结合数据拟合的方法,获得较好的实用效果。

文献[2]研究利用送风机动叶角度、送风机出口风压、送风机电流拟合计算送风风量的方法;文献[14]采用引风机前压力拟合计算引风风量。此类直接拟合计算风量的方法在锅炉全负荷范围内存在较大误差,设备运行工况变化时也会出现异常,实用性较差。

文献[5]在研究锅炉热量信号软测量过程中揭示出锅炉风量、热量、氧量信号间存在着确定的约束关系,可以利用风量、氧量信号计算热量信号,也意味着利用热量、氧量信号可以计算风量信号。据此提出一种燃煤锅炉总风量的软测量方法。通过分析煤燃烧过程的理论空气量和低位发热量计算过程,推导出利用热量、氧量计算风量的基本公式,热量信号可依据锅炉热平衡原理计算出并进行动态补偿,氧量信号可取锅炉省煤器后氧化锆氧量计测量氧量。软测量获得的锅炉总风量具有足够好的静态准确度和动态响应速度,可作为不同原理的测量方法为传感器测量风量提供参照,在风量测量装置故障情况下短期代替其工作,并可用于故障诊断等方面。

## 1 机制分析

### 1.1 核心公式

给煤量为 $1\text{ kg/s}$ 时煤完全燃烧所需理论干空气量 $V_0(\text{m}^3/\text{s})$ ,标准状态)为

$$V_0 = 0.0889w(\text{C}_{\text{ar}}) + 0.0333(w(\text{S}_{\text{ar}}) - w(\text{O}_{\text{ar}})) + 0.265w(\text{H}_{\text{ar}}) \quad (1)$$

$1\text{ kg}$ 煤完全燃烧时低位发热量 $Q_0(\text{MJ/s})$ 为

$$Q_0 = 0.339w(\text{C}_{\text{ar}}) + 0.109(w(\text{S}_{\text{ar}}) - w(\text{O}_{\text{ar}})) + 1.032w(\text{H}_{\text{ar}}) - 0.025w(\text{M}_{\text{ar}}) \quad (2)$$

定义煤燃烧的理论空气热量比 $K_{\text{vq}}(\text{m}^3/\text{MJ})$ ,标准状态)为<sup>[5]</sup>

$$K_{\text{vq}} = V_0 / Q_0 = \frac{0.262 \times (w(\text{C}_{\text{ar}}) + 2.98w(\text{H}_{\text{ar}}) + 0.375(w(\text{S}_{\text{ar}}) - w(\text{O}_{\text{ar}})))}{w(\text{C}_{\text{ar}}) + 3.04w(\text{H}_{\text{ar}}) + 0.322(w(\text{S}_{\text{ar}}) - w(\text{O}_{\text{ar}})) - 0.074w(\text{M}_{\text{ar}})} \quad (3)$$

定义煤质修正系数 $1$ 为 $K_{\text{cl}}$

$$K_{\text{cl}} = \frac{w(\text{C}_{\text{ar}}) + 2.98w(\text{H}_{\text{ar}}) + 0.375(w(\text{S}_{\text{ar}}) - w(\text{O}_{\text{ar}}))}{w(\text{C}_{\text{ar}}) + 3.04w(\text{H}_{\text{ar}}) + 0.322(w(\text{S}_{\text{ar}}) - w(\text{O}_{\text{ar}})) - 0.074w(\text{M}_{\text{ar}})} \quad (4)$$

式(1)~(4)中: $w(\text{C}_{\text{ar}})$ 、 $w(\text{H}_{\text{ar}})$ 、 $w(\text{O}_{\text{ar}})$ 、 $w(\text{S}_{\text{ar}})$ 、 $w(\text{M}_{\text{ar}})$ 分别为煤的收到基碳、氢、氧、硫、水分质量含量, %。

式(4)分子分母各种元素成分前系数非常接近,而仅分母中增加了一个水分计算项。原煤中硫、氢、氧含量相对较少,碳燃烧在消耗干空气量和产生热量中起主要作用。所以对于不同煤种, $K_{\text{cl}}$ 都非常接近于 $1$ 。国内主要煤种收到基水分含量在 $5\% \sim 30\%$ 之间, $K_{\text{cl}}$ 略大于 $1$ ,并且随水分含量增加略有增加。

通过对国内主要煤矿煤质分析数据进行统计发现, $80\%$ 以上煤种的 $K_{\text{vq}}$ 在 $0.261 \sim 0.265$ 之间,计算时可取 $0.263\text{ m}^3/\text{MJ}$ 。电厂实际生产中使用的热量值为工业分析得到的煤发热量 $Q'_0$ ,用 $Q'_0$ 替换式(3)中的 $Q_0$ 可得实际空气热量比 $K'_{\text{vq}}$ 。表1列出了国内主要煤种空气热量比实际值 $K'_{\text{vq}}$ 和理论值 $K_{\text{vq}}$ ,可见二者间差异不大。

另从原理上可发现,煤中未燃尽碳既不产生热量,也不消耗空气量,对 $K_{\text{vq}}$ 和 $K'_{\text{vq}}$ 无影响。

### 1.2 干烟气氧量计算

锅炉干烟气氧量由过量空气系数计算的简化公式为

$$\omega(\text{O}_2)' = \omega_{\text{O}_2} \cdot \frac{\alpha - 1}{\alpha} \quad (5)$$

式中: $\omega(\text{O}_2)'$ 为干烟气氧量, %;  $\omega_{\text{O}_2}$ 为干空气中氧气浓度,近似取 $21\%$ 。 $\alpha$ 为过量空气系数。

其基本计算公式应该为

$$\omega(\text{O}_2)' = \frac{(\alpha - 1)V_0\omega_{\text{O}_2}}{V_{\text{y0}} + (\alpha - 1)V_0} \quad (6)$$

式中: $V_{\text{y0}}$ 为理论干烟气体积,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。式(6)包含一假设条件,即认为

$$V_{\text{y0}} = V_0 \quad (7)$$

其所代表意义为煤燃烧所需的理论干空气量等于燃烧后产生的理论干烟气体积。

给煤量为 $1\text{ kg/s}$ 时煤完全燃烧产生理论干烟气体积 $V_{\text{y0}}$ 为

$$V_{\text{y0}} = 0.0889w(\text{C}_{\text{ar}}) + 0.0333w(\text{S}_{\text{ar}}) + 0.008w(\text{N}_{\text{ar}}) \quad (8)$$

式中: $w(\text{N}_{\text{ar}})$ 为煤的收到基氮百分含量, %。

煤燃烧的实际情况如式(1)和式(8),两者之间有

表 1 国内主要煤种燃烧空气热量比

Tab. 1 Ratio of combustion air required to heating value of main domestic coal categories

煤种	w(C <sub>ar</sub> )/%	w(S <sub>ar</sub> )/%	w(H <sub>ar</sub> )/%	w(O <sub>ar</sub> )/%	w(M <sub>ar</sub> )/%	V <sub>0</sub> /(m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>0</sub> '/(MJ/s)	Q <sub>0</sub> /(MJ/s)	K <sub>vq</sub> '/(m <sup>3</sup> /MJ)	K <sub>vq</sub> /(m <sup>3</sup> /MJ)
神府煤	58.0	0.7	3.6	9.9	13.0	5.811	21.96	22.08	0.265	0.263
晋北煤	54.2	0.6	3.1	7.2	10.3	5.405	20.35	20.54	0.266	0.263
兖矿煤	53.8	0.6	4.0	8.1	8.0	5.578	21.27	21.29	0.262	0.262
济北混煤	48.4	0.9	3.9	7.9	10.0	5.092	19.05	19.37	0.267	0.263
范各庄煤	50.3	1.0	2.9	5.0	7.6	5.110	19.68	19.43	0.260	0.263
庄儿尚煤	61.2	0.8	3.5	9.8	4.9	6.061	23.43	23.23	0.259	0.261
神头煤	50.9	0.5	3.4	10.0	5.4	5.113	19.73	19.61	0.259	0.261
晋华宫煤	65.2	0.9	4.2	0.7	7.4	6.918	25.08	26.28	0.276	0.263
晋北代表煤	58.6	0.8	3.4	0.6	9.6	6.102	22.44	23.10	0.272	0.264
准格尔煤	54.7	0.5	3.2	10.4	12.0	5.384	20.48	20.48	0.263	0.263
黑岱沟煤	49.5	0.5	3.0	10.4	12.1	4.864	18.49	18.49	0.263	0.263
东胜 1 煤	52.2	0.7	2.5	8.4	24.8	5.039	18.85	18.79	0.267	0.268
东胜 2 煤	50.8	0.8	2.7	10.8	20.1	4.896	18.60	18.41	0.263	0.266
马头煤	57.9	0.8	2.3	3.3	6.1	5.678	21.19	21.59	0.268	0.263
华亭煤	52.5	0.7	3.0	10.0	16.0	5.161	19.65	19.51	0.263	0.265

细微区别。

定义煤质修正系数 2 为 K<sub>c2</sub>:

$$K_{c2} = \frac{0.088 \ 9w(C_{ar})+0.033 \ 3w(S_{ar})+0.008w(N_{ar})}{0.088 \ 9w(C_{ar})+0.033 \ 3(w(S_{ar})-w(O_{ar}))+0.265w(H_{ar})} \quad (9)$$

则有:

$$V_{y0} = K_{c2}V_0 \quad (10)$$

K<sub>c2</sub> 接近于 1。

锅炉干烟气氧量由过量空气系数计算的基本公式可写为

$$\omega(O_2)' = \frac{(\alpha - 1)V_0\omega_{O_2}}{K_{c2}V_0 + (\alpha - 1)V_0} \quad (11)$$

整理后得:

$$\omega(O_2)' = \frac{\omega_{O_2}}{1 + \frac{K_{c2}}{\alpha - 1}} \quad (12)$$

按照锅炉设计数据, 锅炉运行时过量空气系数应该是以干烟气为基准计算的, 计算公式为

$$\alpha = V_{gk0} / V_0 \quad (13)$$

式中: V<sub>gk0</sub> 为给煤量为 1 kg/s 时煤燃烧所需实际干空气量, m<sup>3</sup>/s。

由式(3)可得:

$$V_0 = K_{vq}Q_0 \quad (14)$$

给煤量为 q<sub>c</sub>(kg/s)时产生的总热量 Q<sub>B</sub>(MW)为

$$Q_B = q_cQ_0 \quad (15)$$

则由式(14)、式(15)可得:

$$V_0 = K_{vq}Q_B / q_c \quad (16)$$

由式(13)、(16)可得:

$$\alpha = \frac{V_{gk} / q_c}{K_{vq}Q_B / q_c} = \frac{V_{gk}}{K_{vq}Q_B} \quad (17)$$

式中: V<sub>gk</sub> 为给煤量 q<sub>c</sub> 燃烧所需要的实际干空气量, m<sup>3</sup>/s。

考虑到实际空气中含有水蒸气, 锅炉设计一般取 1 m<sup>3</sup> 干空气中含有 0.0161 m<sup>3</sup> 水蒸气, 有:

$$V_a = 1.016 \ 1V_{gk} \quad (18)$$

式中: V<sub>a</sub> 为煤燃烧所需实际风量, m<sup>3</sup>/s。

过量空气系数可表示为

$$\alpha = \frac{V_a}{1.016 \ 1K_{vq}Q_B} = \frac{V_a}{0.266K_{c1}Q_B} \quad (19)$$

将式(19)代入式(12), 整理后可得:

$$\omega(O_2)' = \frac{\omega_{O_2}(V_a - 0.266K_{c1}Q_B)}{0.266K_{c1}Q_B(K_{c2} - 1) + V_a} \quad (20)$$

### 1.3 湿烟气氧量计算

锅炉烟道中安装的氧化锆氧量表测量的是实际烟气氧量, 与干烟气氧量的区别在于烟气中水蒸气的补偿。参考式(11), 其基本计算公式为

$$\omega(O_2) = \frac{q_c(\alpha - 1)V_0\omega_{O_2}}{q_c[K_{c2}V_0 + (\alpha - 1)V_0] + V_{H_2O}} \quad (21)$$

式中: ω(O<sub>2</sub>) 为湿烟气含氧量, %; V<sub>H<sub>2</sub>O</sub> 为湿烟气包含的水蒸气量, m<sup>3</sup>/s。

湿烟气中的水蒸气来自空气中的水分、煤中氢

燃烧产生的水分及煤收到基水分。

$$V_{\text{H}_2\text{O}}=q_c(0.016\ 1\alpha V_0+0.112w(\text{H}_{\text{ar}})+0.012\ 4w(\text{M}_{\text{ar}}))\quad(22)$$

将式(18)、(22)代入式(21)中并整理,得式(21)分母部分为:

$$q_c K_{c2} \left(1 + \frac{\alpha - 1}{K_{c2}}\right) V_0 + 0.015\ 8V_a + q_c [0.112w(\text{H}_{\text{ar}}) + 0.012\ 4w(\text{M}_{\text{ar}})]\quad(23)$$

式中:  $K_{c2}$  为近似为 1 的数, 为方便计算, 可进行合理简化。为减小计算误差, 将式(23)中作为分母的  $K_{c2}$  近似为 1, 则式(21)可整理为

$$\omega(\text{O}_2) = \frac{\omega_{\text{O}_2} (V_{\text{gk}} - K_{\text{vq}} Q_{\text{B}})}{K_{c2} V_{\text{gk}} + 0.0158V_a + q_c (0.112w(\text{H}_{\text{ar}}) + 0.0124w(\text{M}_{\text{ar}}))}\quad(24)$$

进一步整理, 得:

$$\omega(\text{O}_2) = \frac{\omega_{\text{O}_2} (V_a - 0.266K_{c1} Q_{\text{B}})}{(K_{c2} + 0.016\ 1)V_a + q_c [0.113\ 8w(\text{H}_{\text{ar}}) + 0.012\ 6w(\text{M}_{\text{ar}})]}\quad(25)$$

定义煤质修正系数 3 为  $K_{c3}$ :

$$K_{c3} = 0.113\ 8w(\text{H}_{\text{ar}}) + 0.012\ 6w(\text{M}_{\text{ar}})\quad(26)$$

进行空气水蒸气修正和煤质修正后得到基本湿烟气氧量计算公式

$$\omega(\text{O}_2) = \frac{\omega_{\text{O}_2} (V_a - 0.266K_{c1} Q_{\text{B}})}{(K_{c2} + 0.016\ 1)V_a + K_{c3} q_c}\quad(27)$$

#### 1.4 总风量计算

$K_{c1}$ 、 $K_{c2}$ 、 $K_{c3}$  可根据煤质的元素分析进行离线计算, 当煤种发生变化时, 其计算值变化不大, 在误差允许范围内可将其视为常数。

在依据《电站锅炉性能试验规程》(GB10184—88)进行锅炉热力特性试验测量排烟氧量时, 采用外置式的标准氧量表, 从锅炉烟道内抽出烟气的过程中, 存在着冷凝、过滤和干燥的过程, 所以此方法测量得到的氧量同式(20)得到的干烟气氧量是非常接近的。由式(20)可得总空气量计算式为

$$V_a = \frac{0.266K_{c1} Q_{\text{B}} (\omega(\text{O}_2)' (K_{c2} - 1) + \omega_{\text{O}_2})}{\omega_{\text{O}_2} - \omega(\text{O}_2)'}\quad(28)$$

经过煤质和空气水分修正后得到的湿烟气氧量计算值同锅炉烟道中安装的氧化锆氧量表测量值非常接近。则由式(27)可得总空气量计算式为:

$$V_a = \frac{K_{c3} \omega(\text{O}_2) q_c + 0.266K_{c1} Q_{\text{B}} \omega_{\text{O}_2}}{\omega_{\text{O}_2} - \omega(\text{O}_2) (K_{c2} + 0.016\ 1)}\quad(29)$$

式(28)和式(29)分别采用干烟气氧量和湿烟气氧量信号计算总风量, 具有相近的计算结果。

## 2 热量信号计算

因煤的低位发热量  $Q_0$  未知, 实际应用中不能用式(15)计算锅炉总热量, 而是根据锅炉热平衡关系计算:

$$Q_{\text{B}} = \frac{Q_1 + Q_2}{1 - 0.010\ 2q_{56}}\quad(30)$$

式中:  $Q_1$  为锅炉有效吸热量, MW;  $Q_2$  为排烟总热量, MW;  $q_{56}$  为灰渣、散热、未计热损失, %。

典型 600 MW 亚临界汽包锅炉有效吸收热量用式(31)计算:

$$Q_1 = q_{\text{fw}} (h_s - h_{\text{fw}}) + q_{\text{sw}} (h_s - h_{\text{bw}}) + q_{\text{r}} (h_{\text{r}} - h_{\text{g}}) + q_{\text{rw}} (h_{\text{r}} - h_{\text{bw}})\quad(31)$$

式中:  $q_{\text{fw}}$  为给水流量, kg/s;  $h_s$  为主蒸汽焓, MJ/kg;  $h_{\text{fw}}$  为锅炉给水焓, MJ/kg;  $q_{\text{sw}}$  为过热器减温水流量, kg/s;  $h_{\text{g}}$  为高压缸排汽焓, MJ/kg;  $q_{\text{r}}$  为再热蒸汽流量, kg/s;  $h_{\text{r}}$  为再热蒸汽焓, MJ/kg;  $h_{\text{bw}}$  为给水泵出口给水焓, MJ/kg;  $q_{\text{rw}}$  为再热器减温水流量, kg/s。

典型 1 000 MW 超超临界直流锅炉有效吸收热量用式(32)计算:

$$Q_1 = q_{\text{fw}} (h_s - h_{\text{fw}}) + q_{\text{r}} (h_{\text{r}} - h_{\text{g}}) + q_{\text{rw}} (h_{\text{r}} - h_{\text{bw}})\quad(32)$$

式(31)、(32)中, 再热蒸汽流量采用 Flügel 公式或根据高压加热器能量平衡计算<sup>[15]</sup>。

排烟总热量采用式(33)计算:

$$Q_2 = C_{\text{g}} (1 + 0.01\xi) V_{\text{y}} (t_{\text{p}} - t_0)\quad(33)$$

式中:  $C_{\text{g}}$  为烟气定压比热, 为烟温的函数, MJ/m<sup>3</sup>, 其值可由文献[16]中《空气、烟气、飞灰热容量计算公式表》查得;  $\xi$  为空预漏风率, %, 取设计值;  $t_{\text{p}}$  为排烟温度, °C;  $t_0$  为冷风温度, °C;  $V_{\text{y}}$  为实际湿烟气流量, m<sup>3</sup>/s, 即式(24)的分母部分, 整理后为

$$V_{\text{y}} = \frac{(K_{c2} + 0.016\ 1)V_a}{1.016\ 1} + q_c K_{c3}\quad(34)$$

## 3 动态补偿

实际应用时, 式(28)、(29)在静态时是成立的, 对于带稳定负荷的机组可以应用, 但绝大部分机组都承担电网调峰和一次调频任务, 发电负荷以及锅炉燃烧状态经常性的处于变化过程中, 直接利用式(28)、(29)计算会出现巨大动态误差。

风煤在炉膛内燃烧产生热量并引起烟气氧量

变化是一个快速的动态过程。根据热量、氧量计算风量时<sup>[17]</sup>，因排烟氧量由安装在烟道内的氧化锆氧量计测得，90 %响应时间为 2~3 s，氧量能较快速地跟随风量变化，因此不需要进行动态补偿；而实际引起风量变化的热量信号应为煤粉在锅炉炉膛内燃烧产生的瞬时热量，式(30)热量的主体部分采用汽水侧参数计算得到，与瞬时热量之间存在着巨大的动态差异，一般称之为锅炉蓄热惯性<sup>[18]</sup>。因此引入锅炉总给煤量进行动态补偿。动态补偿公式<sup>[19-20]</sup>为

$$Q_F = q_c \frac{Q_{ar}}{1 + T_f s} e^{-rs} \left(1 - \frac{1}{(1 + T_v s)^2}\right) + Q_B \frac{1}{(1 + T_v s)^2} \quad (35)$$

式中： $Q_F$ 为炉膛内煤燃烧产生的瞬时热量，MW； $Q_{ar}$ 为煤低位发热量，MJ/kg，取设计值或估计值； $T_f$ 为锅炉制粉惯性时间，s； $\tau$ 为锅炉制粉迟延时间，s； $T_v$ 为滤波时间，s。其中， $T_f$ 、 $\tau$ 的取值参考文献<sup>[21]</sup>；根据现场调试经验， $T_v$ 一般取  $T_f$  的 1/4~1/3。

因此，计算风量时可用式(35)中  $Q_F$  替换式(28)、(29)中的  $Q_B$ 。

#### 4 实际数据验证

取某电厂 600 MW 机组(锅炉型号 HG-2023/17.6-YM4)运行数据对软测量风量进行验证，包括稳定高负荷工况、稳定低负荷工况、快速升、降负荷工况。机组一次风量、二次风量流量计在锅炉性能试验时均经过标准皮托管标定，总风量为一次、二次风量之和，具有较高的准确度。

实验时采用式(29)，取省煤器后氧量信号的平均值进行计算。图 1、2 分别显示了机组在稳定 600、350 MW 负荷工况下软测量风量同实际风量的对比曲线。

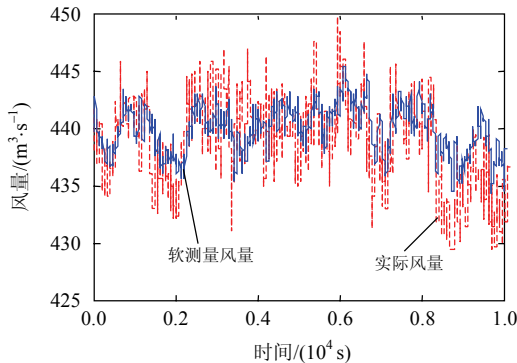


图 1 稳定高负荷时软测量风量与实际风量对比

Fig. 1 Comparison between soft-sensor and practical total air volume during stable high load

图 3 为机组负荷由 350 MW 上升到 600 MW 时软测量风量同实际风量的对比曲线。图 4 为机组负

荷由 550 MW 下降到 330 MW 时软测量风量同实际风量的对比曲线。

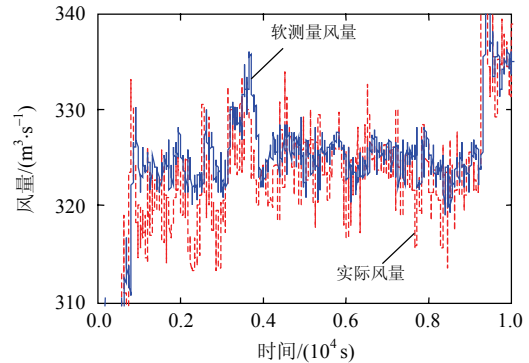


图 2 稳定低负荷时软测量风量与实际风量对比

Fig. 2 Comparison between soft-sensor and practical total air volume during stable low load

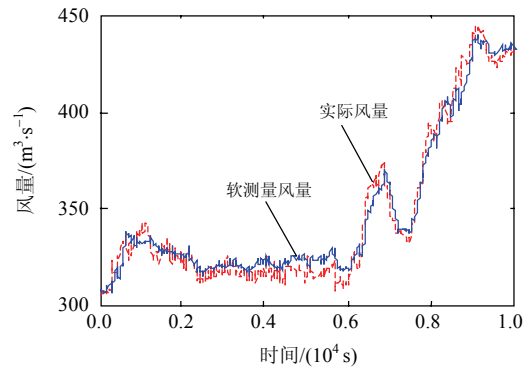


图 3 快速升负荷时软测量风量与实际风量对比

Fig. 3 Comparison between soft-sensor and practical total air volume during speedy loading-up

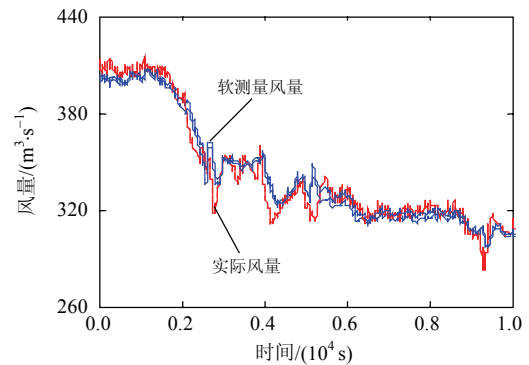


图 4 快速降负荷时软测量风量与实际风量对比

Fig. 4 Comparison between soft-sensor and practical total air volume during speedy loading-down

由 4 种不同工况下的曲线可以看出，经过动态补偿的软测量曲线具有较好的动、静态特性，与实际风量曲线的趋势基本一致。50%~100%负荷范围内相对误差稳定工况下不超过 2%、变负荷工况下不超过 4%。

为验证煤质变化对总风量软测量准确度的影响，针对 600 MW 机组设计煤种(准格尔烟煤)和校核煤种(黑岱沟煤)，在锅炉总热量为 1 360 MJ，氧

量为 3.15%的情况下, 对比其煤质系数及软测量风量的计算结果, 如表 2 所示。可以看出, 煤发热量变化接近 10%, 对风量软测量结果影响小于 3%。

表 2 2 种煤的软测量风量比较

Tab. 2 Comparison of soft-sensor total air volume for two kinds of coal

煤种	$Q_0$	$K_{c1}$	$K_{c2}$	$K_{c3}$	$V_a/(m^3 \cdot s^{-1})$
准格尔煤	20.48	1.003	0.907 3	0.517 6	443
黑岱沟煤	18.49	1.003	0.908 9	0.493 7	442

## 5 结论

本文提出锅炉总风量的软测量方法, 通过机制分析及实验验证, 得到如下结论:

1) 通过分析燃烧机理, 发现国内主要煤种燃烧时空气热量比近似等于一常数, 可根据氧量、热量、风量间的函数关系计算风量。

2) 通过锅炉烟气成分分析, 分别推导出干烟气氧量和湿烟气氧量计算总风量公式, 分别适用于采用标定氧量计算和氧化锆实测氧量计算的情况。

3) 在 600 MW 机组上通过实验验证, 风量软测量结果具有较好的静态准确度和动态响应速度, 能够满足现场需要。

## 参考文献

- [1] 蒋啸, 张启璆. 风量测量用整流器的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 104-108.  
Jiang Xiao, Zhang Qiqiu. Test research on rectifier for airflow measurement[J]. Proceedings of the the CSEE, 2006, 26(14): 104-108(in Chinese).
- [2] 赵征, 曾德良, 田亮, 等. 基于数据融合的氧量软测量研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 7-12.  
Zhao Zheng, Zeng Deliang, Tian Liang, et al. Research on soft-sensing of oxygen content based on data fusion [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 7-12(in Chinese).
- [3] Kortela J, Jämsä-Jounela S-L. Fuel-quality soft sensor using the dynamic superheater model for control strategy improvement of the BioPower 5 CHP plant[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 42(1): 38-48.
- [4] Kortela J, Jämsä-Jounela S-L. Fuel moisture soft-sensor and its validation for the industrial BioPower 5 CHP plant[J]. Applied Energy, 2013(105): 66-74.
- [5] 田亮, 刘鑫屏, 赵征, 等. 一种新的热量信号构造方法及实验研究[J]. 动力工程, 2006, 26(4): 499-502.  
Tian Liang, Liu Xinping, Zhao Zheng, et al. Experimental research of a new kind of signal for amounts of heat released[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(4): 499-502(in Chinese).
- [6] 田亮, 邓拓宇, 刘吉臻. 基于风量氧量热量信号前微分协调控制系统[J]. 动力工程学报, 2011, 31(10): 739-744.  
Tian Liang, Deng Tuoyu, Liu Jizhen. A guidance differential coordinated control system based on air-oxygen heat release signals[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(10): 739-744(in Chinese).
- [7] 刘福国. 电站锅炉入炉煤元素分析和发热量的软测量实时监测技术[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 139-145.  
Liu Fuguo. Real time identification technique for ultimate analysis and calorific value of burning coal in utility boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 139-145(in Chinese).
- [8] Surajdeen A I, Moustafa E, Mohamed A H, et al. RBF neural network inferential sensor for process emission monitoring[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(7): 962-970.
- [9] 顾燕萍, 赵文杰, 吴占松. 基于最小二乘支持向量机的电站锅炉燃烧优化[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(17): 91-97.  
Gu Yanping, Zhao Wenjie, Wu Zhansong. Combustion optimization for utility boiler based on least square-support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(17): 91-97(in Chinese).
- [10] Erik E. Modeling and simulation of soft sensor design for real-time speed estimation, measurement and control of induction motor[J]. ISA Transactions, 2013, 52(3): 358-364.
- [11] Su Zhigang, Wang Peihong, Shen Jiong, et al. Multi-model strategy based evidential soft sensor model for predicting evaluation of variables with uncertainty [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(2): 2595-2610.
- [12] 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 Zhongxu, Zhou Chuanxin, Li Dan, 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(in Chinese).
- [13] 熊志化, 张卫庆, 赵瑜, 等. 基于混合高斯过程的多模型热力参数测量软仪表[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 31-33, 40.  
Xiong Zhihua, Zhang Weiqing, Zhao Yu, et al. Thermal parameter soft sensor based on the mixture of Gaussian processes[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 31-33, 40(in Chinese).
- [14] 田亮, 刘鑫屏, 王琪, 等. 基于多尺度相关和机理建模

- 的炉膛压力分析[J]. 动力工程学报, 2012, 32(11): 854-858.
- Tian Liang, Liu Xinping, Wang Qi, et al. Analysis of furnace pressure based on multi-scale correlation and mechanism modeling[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(11): 854-858(in Chinese).
- [15] 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, 31(5): 114-119.
- Yan Shu, Zeng Deliang, Liu Jizhen, et al. A soft-sensor method of reheat steam flow based on simplified heat-balance equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(5): 114-119(in Chinese).
- [16] 冯俊凯, 沈幼庭, 杨瑞昌. 锅炉原理及计算[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 22.
- Feng Junkai, Shen Youting, Yang Ruichang. Principle and calculation of boiler[M]. Beijing: Science Press, 2003: 22(in Chinese).
- [17] 杨波, 李政. 火电机组热力系统主导因素变工况建模方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 96-102.
- Yang Bo, Li Zheng. Dominant factor modeling method for the thermal system of power station[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 96-102(in Chinese).
- [18] 田亮, 曾德良, 刘吉臻, 等. 简化的330MW机组非线性动态模型[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 180-184.
- Tian Liang, Zeng Deliang, Liu Jizhen, et al. A simplified non-linear dynamic model of 330 MW unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 180-184(in Chinese).
- [19] 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, 171.
- Yu Daren, Fan Yi, Xu Zhiqiang. A method for fusing radiation signal and heat release signal inside furnace [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 158-161, 171(in Chinese).
- [20] 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, 2008, 28(1): 50-53.
- Liu Xinping, Tian Liang, Zeng Deliang, 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(in Chinese).
- [21] 田亮. 单元机组非线性动态模型的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2005.
- Tian Liang. Research of unit plant nonlinearity dynamic model[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2005(in Chinese).



田亮

收稿日期: 2013-09-10。

作者简介:

田亮(1976), 男, 博士, 副教授, 主要从事热力系统建模及软测量方面研究, tl0615@sina.com;

霍秋宝(1988), 女, 硕士研究生, 研究方向为大机组节能环保优化, huoqiubaonnx@126.com。

刘鑫屏(1975), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 热力发电过程建模、软测量及大机组智能优化控制, liuxinpingtyl@163.com。

刘吉臻(1951), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂系统建模与控制、工业过程测控理论与技术, ljz@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 王庆霞)