



优化燃烧的平衡之道

**制粉系统风粉多参数在线监测
及优化系统【FMVC】**

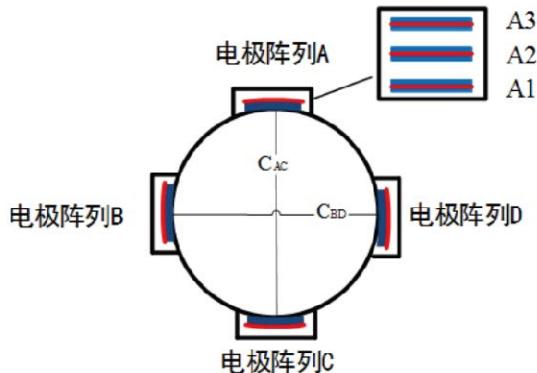


新技术应用的驱动力

持续的效能与低排放的平衡，以及长期安全的需求，是技术持续革新与应用的驱动力。对于锅炉制粉系统而言，一次风系统中风粉管道的煤粉流速、煤粉浓度、煤粉细度以及管道间的均衡分配的监测与调整是优化燃烧的重要保障。

《火力发电厂煤粉制备系统设计和计算方法》及电力行业相关标准规定：对中速磨直吹式制粉系统，同层燃烧器各一次风管之间的煤粉和空气应均匀分配，其风量偏差分配不大于 $\pm 5\%$ ，煤粉分配偏差不大于 $\pm 10\%$ 。

煤粉三参数测量的实现



一、由静电“知”流速

物质的原子由带负电荷的电子和带正电荷的质子构成，当两个不同的物体相互接触时会使一个物体失去或得到一些电荷。同样，煤粉颗粒通过电极组时会感应到静电荷，在金属电极上产生交流电荷，信号调理电路将交流电荷信号转变为交流电压信号。

流体速度是通过计算上游和下游电极间的流量的通过时间来确定的。

在颗粒的非均匀分布和不规则速度及体积浓度 $\leq 0.1\%$ 时，会导致测量参数出现显著波动。采用一组电极同时进行多次测量，并融合所有测量值可获得更可靠的流量参数。并通过互相关算法进行运算：

$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{T} \int x_1(t)x_2(t+\tau)dt$$

$$R_{23}(\tau) = \frac{1}{T} \int x_2(t)x_3(t+\tau)dt$$

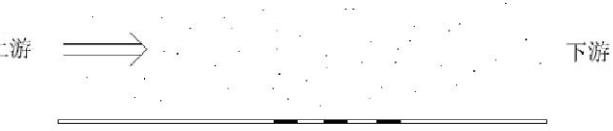
$$R_{13}(\tau) = \frac{1}{T} \int x_1(t)x_3(t+\tau)dt$$

其中 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 和 $x_3(t)$ 是三个静电信号。对于每对电极，根据已知间距(L)和传输时间(τ)确定三个粒子的速度。

$$v_{12} = \frac{L}{\tau_{12}} \quad v_{23} = \frac{L}{\tau_{23}} \quad v_{13} = \frac{2L}{\tau_{13}}$$

τ_{ij} ：由信号*i*和*j*之间相应互相关函数中特征曲线的位置确定。通过加权处理确定最终速度。

$$v_c = \frac{r_{12}v_{12} + r_{23}v_{23} + r_{13}v_{13}}{r_{12} + r_{23} + r_{13}}$$



二、由电容“感”浓度

气固两相流的气相和固相介质具有不同的介电常数，当气固混合流体通过电容极板形成敏感场时，流体混合物浓度(即等效介电常数)的变化将引起两电极间电容值的变化，因此固相浓度测量问题转化为检测电容值的问题。

$$\text{电容的决定式为: } C = \frac{\epsilon S}{4 \pi k d}$$

ϵ : 介电常数；

S: 电容极板的正对面积；

d: 电容极板的距离；

k: 静电力常量。

对于结构尺寸确定的电容传感器应用于气固两相流动检测时，等效电容值和传感器电极间气固混合物的等效介电常数 ϵ_e 存在关系^[2]:

$$C_e = C_{e0} f(\epsilon_e)$$

C_{e0} : 传感器内充满气相介质时的等效电容；

$f(\epsilon_e)$: 表示气固混合物的等效介电常数的函数。

气体的相对介电常数认为1，所以 C_{e0} 主要由传感器的几何结构决定，由 Maxwell 模型得介电常数：

$$\epsilon_e = \epsilon_1 \frac{2\epsilon_1 + \epsilon_2 - 2c_v(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{2\epsilon_1 + \epsilon_2 + 2c_v(\epsilon_1 - \epsilon_2)}$$

ϵ_1, ϵ_2 和分别代表两种材料的介电常数， ϵ_e 为混合物的等效介电常数。 c_v 为介质2在介质1中的体积分数。

由于空气和煤粉介电常数的差异，当管道内煤粉浓度发生变化时，对应电极之间的电容参数值会发生改变，可以通过测量电容传感器相对电极之间的电容值变化来与标定计算煤粉的体积浓度。

$$\rho_m = K_f f(C)$$

同时可得质量流量 Q_m :

$$Q_m = A \rho_m V_c$$

V_c : 粉体流速；

A : 管道截面积；

ρ_m : 质量浓度。

三、以声波“听”细度

当煤粉流场稳定、颗粒分布均匀时，管道中稀相介质颗粒同时撞击探杆数量唯一，对煤粉细度的测量具有代表性，通过数学模型可计算出管道内的煤粉细度。

煤粉颗粒碰撞探杆时产生的弹性应力，基于压电效应，声发射传感器将声发射源传来的微小表面质点振动转化为电压信号。信号的特征与探杆收到的脉冲能量密切相关，碰撞粒子的尺寸是影响撞击能量的关键因素。

系统测量的系统卷积方程： $V(t) = S(t) * G(t) * R(t)$

$V(t)$: 传感器信号

$S(t)$: 声源函数——传感器位移通过声源函数，赫兹理论

$G(t)$: 波导函数——采用格林函数，描述介质对单位脉冲的响应。

$R(t)$: 传感器相应函数——根据峰值电压与颗粒流速，计算出碰撞颗粒的粒径大小。

$$\text{赫兹理论公式: } S(t) = \begin{cases} f_{\max} \left(\sin \left(\frac{\pi t}{t_c} \right) \right)^{\frac{2}{3}} & \text{for } 0 < t < t_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\text{接触时间 } t_c = \frac{4.53 \left(\frac{4\rho_1 \pi (\delta_1 + \delta_2)}{3} \right)^{\frac{2}{3}} r_1}{v_0^{\frac{1}{3}}}$$

$$\text{峰值压力 } f_{\max} = \frac{1.917 \rho_1^{\frac{3}{5}} r_1^2 v_0^{\frac{6}{5}}}{(\delta_1 + \delta_2)^{\frac{2}{5}}}$$

ρ_1 : 质量密度 r_1 : 粒子等价半径 v_0 : 粒子速度

$$\delta_i = (1 - \mu_i^2)/(\pi E_i)$$

E : 杨氏模量 μ : 泊松比 $i=1$: 代表粒子 $i=2$: 代表探

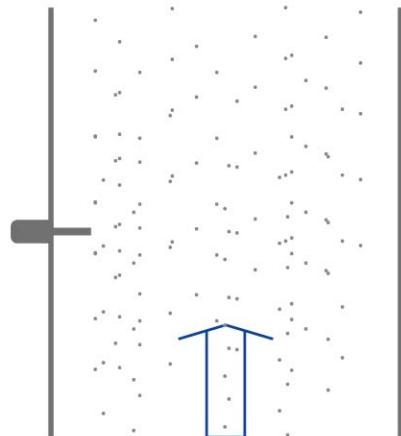


图2 声波测量原理

四、系统构成

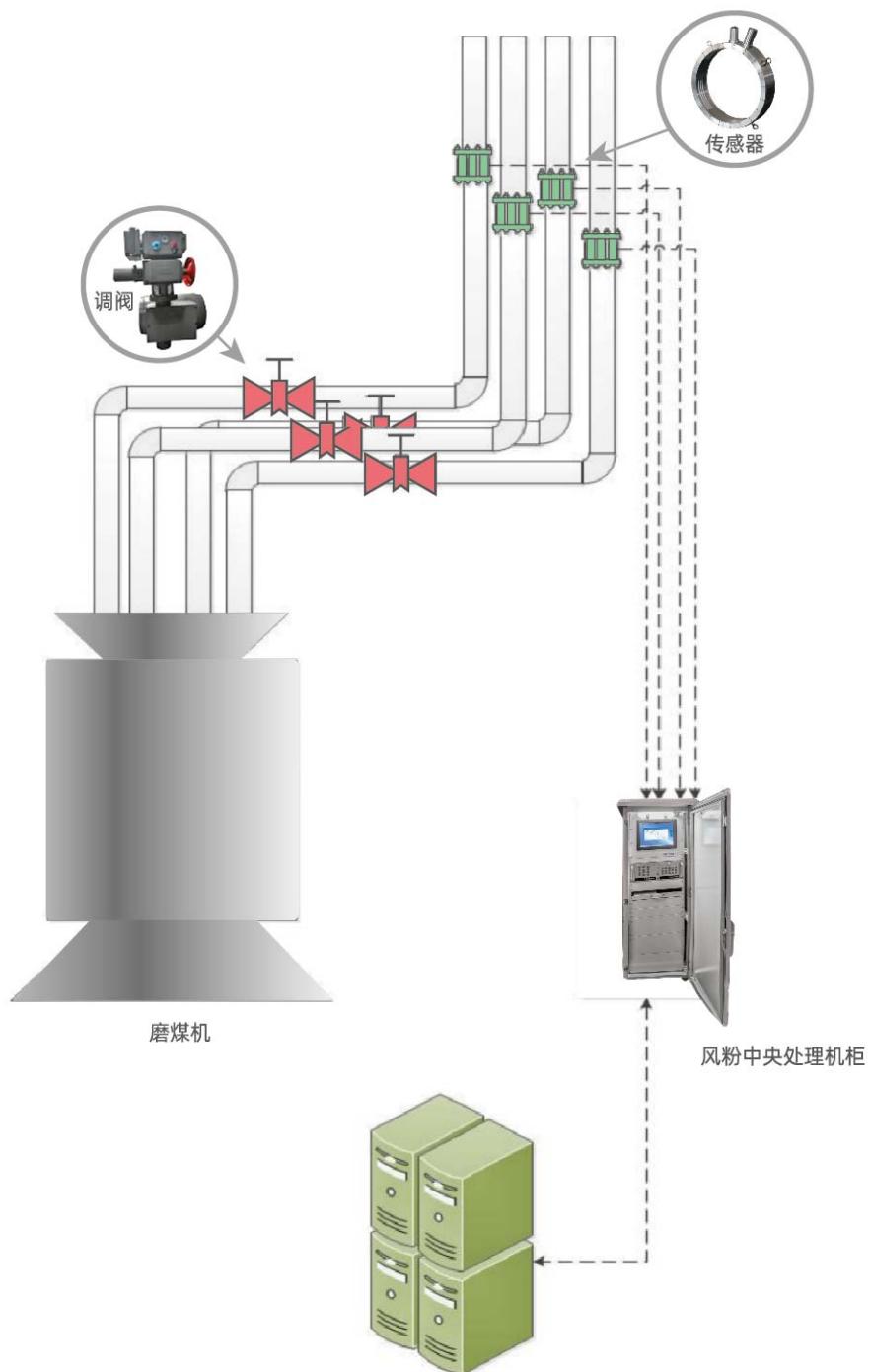


图3 MVCE系统构成

五、现场安装图



六、参数表

浓度测量原理	电容原理
粉速测量原理	静电原理
细度测量原理	声波原理
浓度范围	0-1.5kg/m ³
粉速范围	20-40m/s
细度范围	10-30%
精度	流速±2% 浓度±5% 细度±5%
漂移	无
维护	无
标定	不需要
测量通道	不多于36只
传感器	
过程压力	16 bar
耐磨材料	氧化铝陶瓷
管径适用范围	DN25 ~ DN700
过程连接	法兰夹持
过程温度	-40°C ~ 280°C
环境温度	-20°C ~ 85°C
转换器	
防护等级	IP65
环境温度	-20°C ~ 85°C
电压输入	24V DC
功率	2W
中央控制单元	
测量通道	36
防护等级	IP65
环境温度	-20°C ~ 85°C
输入电压	220V AC
功率	350W

七、丰富的选择（国际通用）

产品	型号	材质	温度	口径	通讯方式	传感器数量
传感器	FMVC	S-不锈钢+碳钢				
		SC-碳钢				
		SS-不锈钢				
			N-常规型			
			H-高温型			
			O-其他			
				客户提供参数定制		
中央处理单元					RS:RS485	
					W:硬接线	
						1-36

八、精确的控制

电源	380VAC±10% 50Hz
开度信号	4-20mA
限位开关	闭侧/开侧
驱动电机	交流可逆单相齿轮减速电机
输出力矩	600Nm
输出轴每转时间	40-100s
输出轴有效转角	900
输出轴推力	4000 N
全行程时间	8-50s
基本误差	±1.5%
反应时间	≤1s
使用环境温度	-10°C ~ 50°C

九、调整：优化燃烧的平衡之道

□ 煤粉均衡阀

煤粉分配不均会导致燃烧器之间的煤粉浓度差，高浓度需要二次风增多，低浓度需要二次风量减少，最终导致燃烧器之间风门开度偏差，高浓度下CO增加，低浓度下NOx增加，燃烧火焰温度、火焰距离、动量等都会产生的偏差，炉内整个温度场、CO/O₂/NOx浓度场、烟气速度场等都会偏离最佳工况。

因此监测并调整煤粉分配均匀是燃烧调整的根本要求：

- 监测对象：风粉管道煤粉浓度
- 控制对象：煤粉均衡阀
- 控制策略：控制煤粉均衡阀使各粉管动态平衡
- 客户价值：实时监测各粉管粉量均匀性；控制煤粉均衡阀进行调平、配合二次风门使同层风粉量尽量均匀，减少CO、NOx的生成，平衡入炉热量。

□ 煤粉流动状况控制

通过煤粉流速计算的沉降临界速度及粉管其他参数（煤粉直径、挥发分、一次风速、气流温度、湿度）可对燃烧器着火距离进行优化，同时也可对管道堵管趋势进行预判。

- 监测对象：煤粉流速、管内压力
- 控制对象：给煤机/给粉机、磨煤机通风量
- 控制策略：结合管道静压（或分离器出口压力）和粉速判断是否有堵管趋势，适当调整磨煤机通风量和粉量
- 客户价值：在线监测实时速度，提供煤粉沉积堵管预警；提供不同煤质的着火距离表达式和最佳煤粉流速，为拓宽煤种适应性和喷嘴防烧损结焦提供数据支持。

□ 煤粉浓度监视

煤粉浓度指的是特定燃烧器煤粉流量与一次风流量的质量流率之比，该参数的另一个意义燃烧初期空气系数，该参数与NOx的生成量关系密切，因此，通过该参数可摸索出特定煤种的最佳浓度，减少NOx生成量。

- 监测对象：一次风煤粉浓度
- 控制对象：磨煤机通风量、煤粉均衡阀
- 控制策略：根据模拟和试验确定最佳初期空气系数，结合磨煤机出力调整一次风量靠近最佳对象值
- 客户价值：优化一次风量，降低制粉电耗；结合“二次风门——二次风量”算法精确控制每只燃烧器的风量，控制最佳初期过量空气系数和总过量空气系数，大幅度降低CO和NOx生成量。

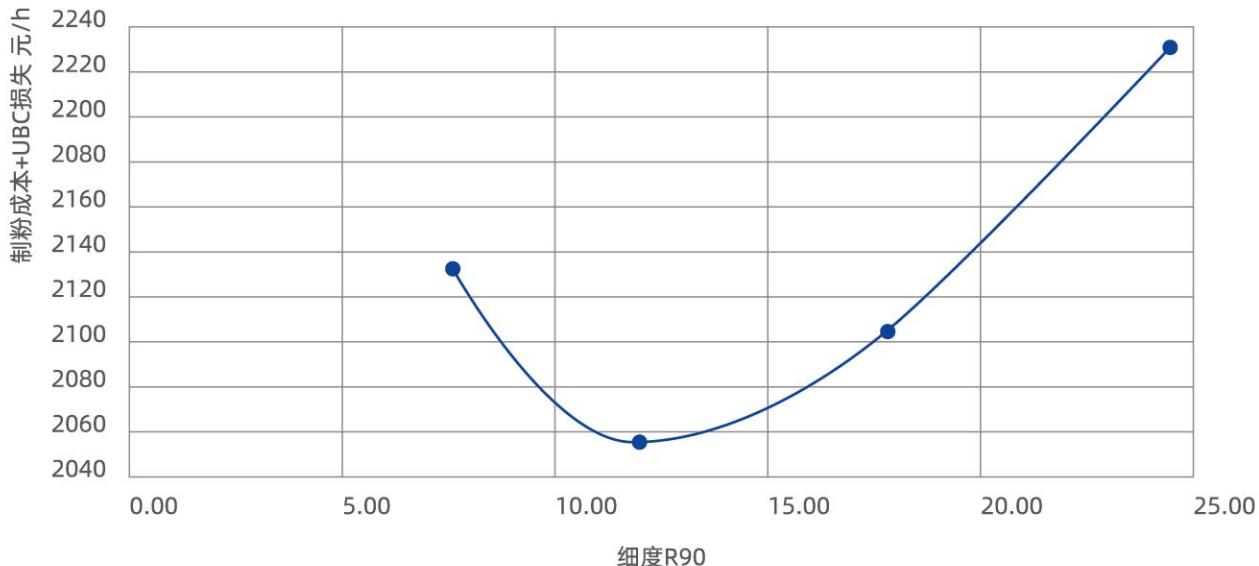
	一次风量	煤量	理论风量	二次风量	一次风量占比	一二次风之和占比	该层生成NOx浓度	该层生成CO浓度
标准	20.15	9.00	58.94	30.00	0.34	1.00	200	1000
A1	20.15	5.00	32.74	30.00	0.62	1.59	350	0
A2	20.15	13.00	85.13	30.00	0.24	0.62	150	100000
A3	20.15	7.00	45.84	30.00	0.44	1.15	300	100
A4	20.15	11.00	72.03	30.00	0.28	0.73	180	50000

□ 煤粉细度监控

通过实时监测并调整磨煤机至最佳煤粉细度附近可以保持飞灰大渣含碳量始终在低值，提高锅炉效率。

- ▶ 监测对象：煤粉细度、制粉功耗、飞灰大渣含碳量
- ▶ 控制对象：动态分离器转速、分离器挡板开度、石子煤量
- ▶ 控制策略：根据不同煤质的推荐细度调整分离器转速或挡板开度，使运行细度尽量靠近推荐值
- ▶ 客户价值：煤粉细度及经济指标可视化、降低制粉成本、减少UBC损失。

制粉成本+UBC损失与细度关系示意曲线





Walsn®

加拿大沃森实业有限公司北京办公室

中国 | 北京 | 海淀区上地东路1号 | 盈创动力大厦E座204

电话: +086 10 58856890 | 传真: +086 10 58856997 | walsn.com.cn

WCTGFMVC0609201.1