

烟气粉尘脱硫气桥检测系统的研究^{*}

郭金基¹, 陈海¹, 张应元¹, 谢旭时²

(1. 中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275; 2. 广东广源工程公司)

摘要: 研究烟气粉尘脱硫检测系统的气桥传感器. 计算由于烟气含硫化物及粉尘浓度动态的变化引起的桥臂气阻的变化, 阐述非线性气阻的平衡条件和不平衡的信号输出. 文章讨论应用气桥原理制造检测元件及气桥和温度传感器的关系. 最后介绍烟气脱硫及除尘在工业环境治理中的应用.

关键词: 气桥; 阻值特性; 传感器; 烟气粉尘; 浓度; 脱硫

中图分类号: TH138.9 **文献标识码:** A

环境治理工程的脱硫及除尘技术中, 对烟气含硫化物及粉尘动态变化量的检测是令人关注的课题. 由于烟气中含硫化物及粉尘动态变化十分微小, 依赖于精密的检测技术. 本文研究气桥传感器, 阐述非线性气桥的工作原理, 实现动态变化检测的技术关键和它与温度传感器的关系.

1 烟气的压力、浓度变化关系及桥臂气阻的特性

气桥的研究历史较长^[1,2], 但由于气桥常常具有非线性性质及气阻计算的复杂性, 还有许多问题尚待深入研究. 本文拟将气桥的桥臂气阻作为感应元件检测烟气含硫化物及粉尘动态变化量. 此动态变化量与桥臂气阻特性之间有何内在联系, 是首先应该探讨的问题.

烟气粉尘在管道中流动应该满足气体的状态方程

$$p/\rho T = R \quad (1)$$

式中, p 为烟气的压力; T 为烟气的温度; ρ 为烟气的密度; R 为气体常数.

气桥传感器的桥臂气阻是由渐缩形喷咀、针阀气阻、活栓式气阻、变截面管接、平行平板间流通结构、扩散器及节流口等组成. 通常气流是以 $p_a < p < 1.89p_a$ (p_a 为大气压力) 亚音速范围内流动, 假定气流是理想流体并且是等熵流动; 流过气阻的气体的压力、密度和温度还应满足如下关系

$$p_1/p_2 = (\rho_1/\rho_2)^K = (T_1/T_2)^{K/(K-1)} \quad (2)$$

式中, K 为绝热指数(对于空气, $K = 1.4$).

本文以渐缩喷咀(如图1)为例来说明气阻特性的表示形式. 流经渐缩喷咀的质量流量可写为^[3]

^{*} 基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(980343); 广东省环保科技研究开发资助项目(粤环1999-13)

收稿日期: 1999-10-15; 作者简介: 郭金基(1938~), 男, 教授.

$$Q = \rho_1 \sqrt{RT_1} \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2K}{K-1} \left[(p_2/p_1)^{2/K} - (p_2/p_1)^{(K+1)/K} \right]}$$

式中, Q 为质量流量; A 为喷嘴端口面积.

将(2) 式代入(3) 式后可得

$$Q = A \cdot \sqrt{\frac{2K}{K-1}} \cdot \sqrt{p_1} \cdot \sqrt{\rho_2 (p_2/p_1)^{-1/2K}} \cdot \sqrt{(p_2/p_1)^{2/K} - (p_2/p_1)^{(K+1)/K}} \tag{4}$$

设流经喷嘴的压力和流量的改变限制在很小的范围内, 记 $\Delta p = p_1 - p_2$, 则有 $\Delta p/p_1 \ll 1$. 若将 $p_2/p_1 = 1 - \Delta p/p_1$ 代入 $(p_2/p_1)^{2/K}$ 、 $(p_2/p_1)^{(K+1)/K}$ 、 $(p_2/p_1)^{-1/2K}$ 式, 将它们展开为幂级数, 由于 $(\Delta p/p_1)^2$, $(\Delta p/p_1)^3$, ... 远小于 $(\Delta p/p_1)$, 这些项可以被忽略, (4) 式可表示为

$$Q = A \cdot \sqrt{2\rho_2} \left[1 + \frac{1}{2K} \cdot \frac{\Delta p}{p_1} \right] \cdot (\Delta p)^{1/2} \tag{5}$$

令
$$\beta = 1/2\rho_2 A^2 \left[1 + \frac{1}{2K} \cdot \frac{\Delta p}{p_1} \right]^2 \tag{6}$$

则(5) 式可写为

$$\Delta p = \beta Q^m \tag{7}$$

式中, Δp 是通过气阻的压力差; Q 为质量流量; β 为气阻特性的系数; m 为气阻特性的指数, $m \leq 2$.

流经桥臂前述各种类型的气阻, 当气桥中气流的速度较小时, 假设流体是不可压缩和稳定的, 气阻特性仍近似表示^[1] 为 (7) 式, 式中 Q 为体积流量, 它与质量流量的关系, 仅相差流体的密度因子, 文 [1] 计算了几种形状的气阻. 依据实测压力差和流量的大量数据, 运用数理统计的方法, 把 (7) 式 2 边取对数后化为线性回归 (用最小二乘法原理) 确定 β 和 m 值. 文 [1] 编制有专用程序 (简写 LSM 程序) 计算在电子计算机上进行.

气阻特性系数 β 与流经气阻的压力差 Δp 和密度 ρ_2 有关, 当烟气管路中含硫化物及粉尘的密度改变时, 引起 ρ_2 , p_2 和 T_2 的改变 (见 (1) 式). 由于 $\Delta p/p_1 \ll 1$, ρ_2 对 β 影响最大. 虽然 β 的数值变化很微小, 仍然会影响气桥的信号输出. 气桥可以精确读出微小信号的数值.

2 气桥不平衡时的信号输出

气桥如图 2 所示, 它由气阻 R_1, R_3 及 R_2, R_4 串联组成. 设 A 点接气源, 压力记为 p_s , B 点的压力记为 p_0 , C、D 两点压力分别记为 p_C, p_D . 连接差压计, 可以用精密测量的补偿微压计 (测压压力精度为 0.1 Pa) 或用弹性元件 (如波纹管、弹性膜片) 来代替.

设流经 ADB 回路气阻特性, 依据 (7) 式可近似表示为

$$\Delta p_1 = p_s - p_D = \beta_1 Q_1^{m_1}, \Delta p_3 = p_D - p_0 = \beta_3 Q_1^{m_3}$$

Δp_1 与气源压力 $p_s - p_0$ 的关系, 由上式可解得

$$\Delta p_1 = \frac{\beta_1 Q_1^{m_1}}{\beta_1 Q_1^{m_1} + \beta_3 Q_1^{m_3}} (p_s - p_0) \tag{8}$$

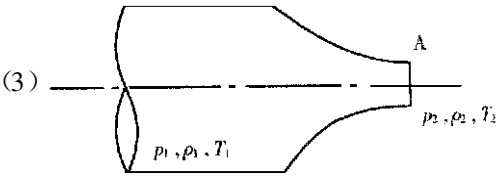


图 1 渐缩形喷嘴
Fig.1 The conelike spray nozzle

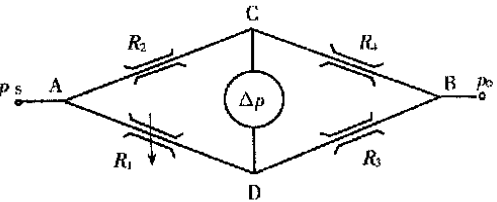


图 2 气桥
Fig.2 Pneumatic bridge

设流经 ACB 回路气阻特性，依据（7）式可近似表示

$$\Delta p_2 = p_s - p_c = \beta_2 Q_2^{m_2}, \Delta p_4 = p_c - p_0 = \beta_4 Q_2^{m_4}$$

Δp_2 与气源压力 $p_s - p_0$ 的关系，由上式可解得

$$\Delta p_2 = \frac{\beta_2 Q_2^{m_2}}{\beta_2 Q_2^{m_2} + \beta_4 Q_2^{m_4}} (p_s - p_0) \tag{9}$$

气桥 C、D 点接差压计后，输出压力信号为

$$p_c - p_d = \frac{\beta_2 \circ \beta_3 Q_1^{m_3} \circ Q_2^{m_2} - \beta_1 \circ \beta_4 Q_1^{m_1} \circ Q_2^{m_4}}{(\beta_1 Q_1^{m_1} + \beta_3 Q_1^{m_3}) \circ (\beta_2 Q_2^{m_2} + \beta_4 Q_2^{m_4})} (p_s - p_0) \tag{10}$$

郭金基^[1]曾证明，如果气阻的气阻特性系数 β 和指数 m ，同时满足下列条件： $m_3/m_1 = m_4/m_2 = 1$ ， $\beta_3/\beta_1 = \beta_4/\beta_2$ 。则气桥处于平衡状态，输出压力差 $\Delta p = p_c - p_d = 0$ 。

气桥检测的工作原理叙述如下：利用气阻的特性接成桥式气路，其中，桥臂气阻为检测元件，烟气的含硫化化合物或粉尘的浓度变化通过公式反映出气阻特性的系数 β_1 变化，由（7）式的气阻特性压力差 Δp_1 表示出来。桥臂的其他气阻由单一气阻或由气阻串、并联组成，气阻元件的选择是十分严格的，桥臂气阻特性的系数 β_i 和指数 m_i 尽量接近满足平衡条件，使气桥输出信号 $p_c - p_d$ 接近为 0 或固定某一恒定值。通常由气阻调节加以实现。当气桥平衡时，气源压力波动或温度变化的影响，由桥臂气阻特性 Δp_i 自行抵消，不会对输出产生影响，但当气桥不平衡时，气源压力的波动对输出信号产生影响，故此在气桥传感器使用的气源要求较高，应采用定值装置的稳压气源。

3 应用研究及举例

根据气桥的工作原理可以制成检测元件和控制元件，在精密的仪表测量及气动技术中已被广泛地使用。当检测对象的物理量产生微小变化时，桥臂气阻随着产生变化，气桥输出模拟量或数字量，能对产品或式件进行尺寸测量或分选。本文首次在环境治理工程中应用，拟对烟气的含硫化化合物和粉尘的浓度动态变化进行检测，气桥传感器检测系统如图 3。

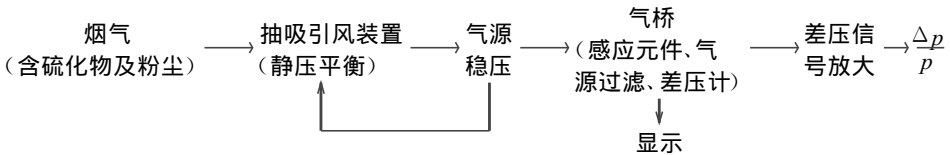


图 3 气桥传感器检测系统框图

Fig 3 The frame figure of the measuring system of the pneumatic bridge sensor

烟气接抽吸引风机装有静压平衡装置，使烟道的风速与抽风机进入桥式风速基本相同。烟气经抽风机吸入气源稳压装置，接入气桥（见图 2），检测气阻 R_1 感应烟气含硫化物或粉尘的动态变化，而流经气阻 R_2 、 R_3 、 R_4 的烟气附加过滤吸附装置，使其不感应烟气含硫化物的动态变化。气桥的差压计拟用补偿微压计，输出信号显示并进行差压信号放大，经气—电转换装置，转换的标准电压信号输入给计算机控制系统。

桥臂气阻选用的 R_1 的结构与图 1 所示相类似。 R_2 、 R_3 及 R_4 分别为活栓式及针阀式可调气阻：流经这些气阻的烟气经过过滤（吸附），不含硫化物或粉尘（或保留这些物质的恒定值）。经过这些气阻（包含气体过滤器）的阻特性系数 β_i 和指数 m_i 经过实测压力差和流量大量数据，取线性回归：用 LSM 程序确定其数值。 β_1 也可通过理论计算。 $R_1 \sim R_2$ 的气

阻特性系数和指数分别为

$$\beta_1 = 4.421\ 5, m_1 = 1.328\ 9; \quad \beta_3 = 2.155\ 3, m_3 = 1.808\ 4;$$

$$\beta_2 = 17.426\ 1, m_2 = 1.158\ 8; \quad \beta_4 = 18.626\ 7, m_4 = 1.577\ 0$$

这些气阻的结构与文 [4] 数纸机气桥检测器的气阻结构大致相同，所不同的是这些气阻应包含过滤器对回路气阻阻值特性的影响。当气源压力 $p_s - p_0$ 选取 2 000 Pa, $Q_1 = 150\text{ cm}^3/\text{s}$, $Q_2 = 31.67\text{ cm}^3/\text{s}$ 时, 将 β_i, m_i 及 Q_1, Q_2 代入(10)式可知气桥输出压力差: $p_c - p_D \approx 0$, 处于平衡状态. 动态响应小于 25 ms.

现以硫酸厂的某工业炉窑烟气粉尘为例，说明气桥检测的应用。

烟气粉尘质量分数 (w/%) : SO_2 : 9.574; SO_3 : 1.07; O_2 : 5.893; H_2O : 8.33; N_2 : 75.42.

$$M = 0.095\ 74 \times 64 + 0.010\ 7 \times 80 + 0.058\ 93 \times 32 + 0.083\ 3 \times 18 + 0.754\ 2 \times 28 = 31.486$$

当温度为 25 ℃ 时, 烟气粉尘的密度为 $\rho_{25\text{ }^\circ\text{C}} = 1.282\text{ kg/m}^3$, 当温度为 335 ℃, 烟道压力为 -2 000 Pa 时, 烟气粉尘的密度为 $\rho_1 = 0.615\text{ kg/m}^3$. 今烟气粉尘 SO_2 含量增加 0.5%, H_2O 降低 0.5%, 其它成分基本相同, 此时 M 为 32.142 3, 当温度为 25 ℃ 时, 烟气粉尘的密度为 $\rho_{25\text{ }^\circ\text{C}} = 1.308\ 5\text{ kg/m}^3$, 当温度为 335 ℃, 烟道压力为 -2 000 Pa 时, 烟气粉尘的密度为 $\rho_2 = 0.628\text{ kg/m}^3$. 烟气粉尘密度从 ρ_1 变化到 ρ_2 , 对桥臂气阻 R 的特性系数 $\beta_1 = 4.421\ 5$, 通过(6)式计算可得 β_1 改变为 4.331 95.

气桥的气源压力 $p_s - p_0 = 2\ 000\text{ Pa}$, 流量 $Q_1 = 150\text{ cm}^3/\text{s}$, $Q_2 = 31.67\text{ cm}^3/\text{s}$, $\beta_1 = 4.331\ 95$, $m_1 = 1.328\ 9$, $\beta_2, m_2, \dots, \beta_4, m_4$ 与上述相同代入(10)式可得

$$\begin{aligned} p_c - p_D = & \frac{17.4261 \times 2.1553 \times 53.1682 \times 2.10387 - 4.33195 \times 18.6267 \times 18.5393 \times 2.7516}{(4.33195 \times 18.5393 + 2.1553 \times 53.1682)(17.4261 \times 2.10387 + 18.6267 \times 2.7516)} \\ & \times (p_s - p_0) = 4.9628(p_s - p_0) \end{aligned}$$

当 $p_s - p_0 = 2\ 000\text{ Pa}$ 时, $p_c - p_D = 9.925\text{ Pa}$.

气桥输出信号 9.9 Pa 十分微小，必须经过差压放大器进行放大并转换为电信号（标准信号）输入计算机，控制动态雾化工况。在脱硫治理中，雾化液体是脱硫剂。该工况可以喷射微雾（粒径 30~150 μm）、超微雾（粒径在 30 μm 以下）及硬雾（粒径在 150 μm 以上）的雾粒流，带动量进入紊流混合器，含硫化合物的烟气与脱硫剂雾化流体的紊流混合器中进行动量交换、质量传递及能量交换，并极大加速化学反应的过程。烟气粉尘动态喷雾紊流混合脱硫治理的框图如图 4 所示。

气桥输出的差压计选用补偿微压计，输出的精度很高（0.1 Pa），但实际操作较困难。主要是气源稳压，桥臂气阻过滤装置（要作定期洗涤或更换）等难以实现如此高的精度；在实际检测中通过气阻调节气桥平衡也有一定的难度。为此，研究过程中需积极寻求如温度传感器等测试方法。从状态方程（1）式可看出烟气的 p, ρ, T 之间存在着定量的关系。本文在气桥检测过程的同时进行温度检测，将气桥输出的差压 Δp 与 ΔT 建立对应关系。从大量的实验数据中用数理统计的方法找寻其内在的联系；用高精度的气桥传感器进行校准、监控，而长期运行中采用温度传感器进行操作。

在环境治理工程中，本文首次采用气桥检测系统测量烟气粉尘的动态变化量，有重要的实用价值。

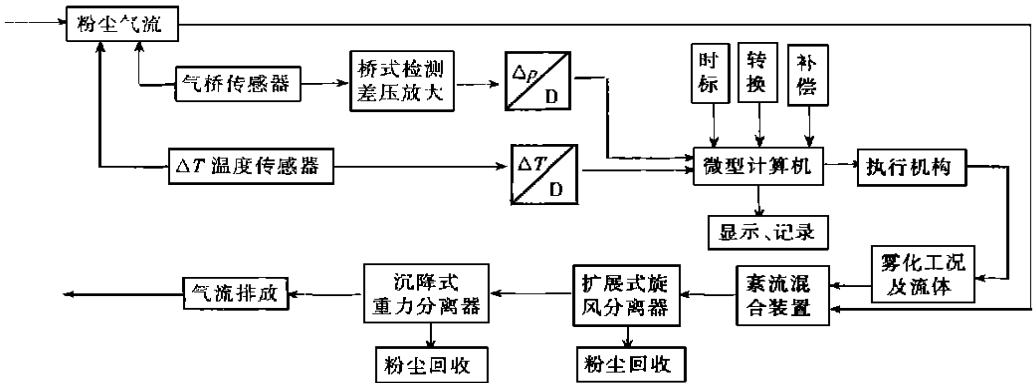


图 4 烟气粉尘动态喷雾混合脱硫治理的框图

Fig.4 The frame figure of the treatment of dynamic spraying and disorder-flow mixing for separating sulfur from flue gas and dust

参考文献:

- [1] 郭金基. 气桥的检测与控制作用的理论计算[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1984 23 (2): 36~ 45.
- [2] 蔡敏学. 恶劣条件下的气桥检测[J]. 仪器仪表学报, 1980(4): 21~ 24.
- [3] WYLIE E B, STREETER V L. Fluid transients[M]. New York: McGraw-Hill, Inc 1978.
- [4] 郭金基. 非线性气桥的原理及其应用[J]. 自动化与仪器仪表, 1986(2): 47~ 53.

Pneumatic Bridge Measurers System of the Separating Sulfur from Flue Gas and Dust

GUO Jin-ji^{*}, CHEN Hai, ZHANG Ying-yuan, XIE Xu-shi

Abstract: The pneumatic bridge sensor of the measuring system for separating sulfur from flue gas and dust is studied. In the case dynamic change of consistency of the flue gas contained sulfide and dust, the resistance variation of the pneumatic bridge arm is calculated. This thesis presents equilibrium condition for pneumatic bridge and gives out the signals while pneumatic bridge is out of balance. The paper also discusses how to apply working principle of the pneumatic bridge to the manufacturing of measurers units and bear a relation to temperature sensor. At last, the application of separating sulfur and collecting dust in industry stove is introduced.

Keywords: pneumatic bridge; resistance characteristic; sensor; flue gas and dust; consistency; separating sulfur

^{*} Department of Applied Mechanics and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China