

压差式流量计的误差分析

一、压差式流量计测量的核心公式：

$$Q = C \times A \times \sqrt{2\Delta P / \rho}$$

其中 C 为流出系数， A 为节流面积， ΔP 为差压， ρ 为流体密度。在SCR排气环境中，几乎每个参数都会受到干扰：

1. 密度 ρ 的波动

- 排气温度变化 $\rightarrow \rho$ 变化（温度200° C vs 400° C，密度差近一倍）
- 尿素喷射后水分蒸发 $\rightarrow$ 局部湿度急剧变化 $\rightarrow \rho$ 波动
- 如果没有温压补偿，密度误差可以直接导致 10~20% 的流量误差

2. 流出系数 C 的偏离

- C 是基于标准条件下标定的，实际管道粗糙度、安装直管段不足、弯头扰动等都会使 C 偏离标定值
- 压差式对流速分布敏感，上游扰动（如混合器、弯管）会导致 C 变化 3~8%

3. 气助式喷射的额外干扰

- 喷入的压缩空气和尿素雾化气体改变了局部流速分布，压差取压孔处的压力读数受干扰
- 尿素液滴蒸发吸热 $\rightarrow$ 局部温度骤降 $\rightarrow$ 局部密度升高 $\rightarrow$ 压差读数产生瞬态偏差
- 管路中的两相流（气体+液滴）使有效密度和流速分布都变得不稳定

二、我从现场的情况看，我们的流量检测是皮托管式，采用两根探杆：

大管（总压管/全压管）：

- 管径较大，迎流面开有多个小孔（取压孔）
- 测量的是气流的总压 $P_{total} = P_{static} + \frac{1}{2}\rho v^2$
- 端部通常是封闭的，侧壁开孔

小管（静压管）：

- 管径较小，管壁侧面开孔（避开迎流方向，通常在管壁背部或侧面90° 位置）
- 测量的是气流的静压 P_{static}
- 或者小管背流面封闭，端部开口

差压信号：

$$\Delta P = P_{total} - P_{static} = \frac{1}{2}\rho v^2$$

这个差压通过变送器送到PLC，计算出流速和流量。

三、误差来源分析：

1、取压孔容易被尿素结晶堵塞

这是最大的问题。32.5%尿素溶液喷入后排气管内，虽然大部分会蒸发分解，但管壁附近温度低，尿素液滴撞击探杆表面后很容易在取压孔边缘形成结晶。一旦结晶：

- 取压孔有效面积减小 $\rightarrow$ 差压信号衰减 $\rightarrow$ 流量读数偏低
- 堵塞是不均匀的（大管和小管堵塞程度不同） $\rightarrow$ 差压比产生偏移 $\rightarrow$ 引入系统性误差
- 而且结晶是渐进的，系统不会报故障，**误差是“静默”恶化的**

2、两根探杆的热惯性差异

大管和小管的表面积和热容量不同，在温度变化的工况下（启停、变负荷），两根管的温度响应速率不同。这会导致：

- 两根管内的气体密度不同（温度不同）
- 差压变送器连接管路中产生额外的温度差压
- 尤其在瞬态工况下，这个误差会叠加一个“温度动态偏差”

3、气助式喷射的扰动影响

皮托管探杆直接暴露在排气流中，气助式喷射的压缩空气和尿素雾化锥如果扫过探杆：

- 射流直接冲击取压孔 $\rightarrow$ 局部动压急剧升高 $\rightarrow \Delta P$ 瞬时跳变 $\rightarrow$ 流量读数尖峰
- 射流改变了探杆周围的流速分布 $\rightarrow$ 取压孔处的局部流速与管道平均流速的关系（恢复系数）发生变化 $\rightarrow$ 标定的 C 值不再适用

- 这个干扰是间歇性的（取决于喷射频率和雾化锥的空间覆盖），比孔板式更难滤波处理

4、取压孔位置和恢复系数的不确定性

多孔皮托管的每个取压孔处的流速系数（恢复系数）并不完全相同：

- 管道中心处的流速高，靠近壁面处流速低
- 每个孔感受到的局部动压不同，简单的算术平均不能准确代表真实的平均流速
- 如果没有经过实流标定，用理论公式计算的流量会存在 5~15% 的偏差

四、我们实际测试得到的是体积流量，还要换算成质量流量，这是压差式皮托管测量中一个很关键的步骤，而且在SCR排气环境下，这个换算的精度直接影响整个误差。

皮托管测量的是差压 ΔP ，计算出来的是截面上的平均流速 v ：

$$v = C_p \times \sqrt{2 \Delta P / \rho}$$

然后得到的是体积流量 Q_v ：

$$Q_v = v \times A \quad (A \text{ 为管道截面积})$$

体积流量本身不能直接用于尿素喷射量计算，因为尿素喷射量需要的是排气质量流量

G_{exh} ，也就是每秒流过多少公斤的废气。

体积流量到质量流量的换算基础公式：

$$G_{exh} = Q_v \times \rho$$

问题就在这个 ρ （排气密度）上。排气不是理想气体，密度受温度、压力、湿度、成分四个因素影响。

完整的排气的实时密度：

$$\rho = P_{abs} \times M_{mix} / (R \times T_{abs})$$

其中：

- P_{abs} ：排气绝对压力 (Pa) = 表压 + 大气压

- T_{abs} ：排气绝对温度 (K) = 摄氏温度 + 273.15

- M_{mix} ：排气混合气体的平均摩尔质量 (kg/mol)

- R ：通用气体常数 = 8.314 J/(mol · K)

这个换算在SCR排气中，有几个容易出问题的地方：

1、温度取的位置不对

密度对温度极其敏感（反比关系），温度误差 10° C 在 300° C 工况下就带来约 3% 的密度误差。

2、忽略了水蒸气的影响

这个在SCR系统中特别重要。排气中含有水蒸气来源：

- 燃料燃烧生成水（柴油完全燃烧，1 kg 柴油约产生 1.4 kg 水蒸气）

- 尿素溶液蒸发的水（32.5% 尿素溶液中 67.5% 是水）

水蒸气的摩尔质量（18 g/mol）远小于干排气（~29

g/mol），水蒸气增加会降低混合气密度。如果不做湿度修正：

在高负荷工况下（排气湿度高），密度计算偏高 → 质量流量虚高 → 尿素喷射量计算偏大 →

氨逃逸风险增加

- 估算影响量级：湿度修正对密度的影响约 2~5%

3、压力测量的精度

排气压力通常不高（几kPa到几十kPa表压），但如果用表压 + 当地大气压计算

P_{abs} ，大气压变化（天气变化）本身就影响密度约 1~3%

四、工程上实用的换算方案基础换算

输入

ΔP // 差压变送器读数 (Pa)

T_{exh} // 流量计处排气温度 (K)

P_{exh} // 排气绝对压力 (Pa)

D // 管道内径 (m)

C_p // 皮托管系数（标定值，通常0.82~0.99）

计算

$$v = C_p \times \sqrt{2 \times \Delta P / (P_{exh} / (287 \times T_{exh}))} \quad \text{假设 } R=287$$

$$A = \pi \times (D/2)^2$$

$$Q_v = v \times A \quad \text{体积流量 } m^3/s$$

$$G_{exh} = Q_v \times P_{exh} / (287 \times T_{exh}) \quad \text{质量流量 } kg/s$$

这个精度大约±5~10%，能满足监测用途。但远远达不到控制精度要求，而且在我们的PLC软件计算中只是做了简化计算，这在整个业界，一些固定机组scr处理系统中，普遍存在这一现象。流量检测误差加上气助式管路累计误差，再加上喷头喷射量、系统累积误差，总体误差已经高达30%以上。业界都通过增加催化剂用量来补偿，第一是浪费，第二是没有办法长期稳定运行，严重制约了这一行业的发展。