

变组分气体质量流量计的应用与现场验证

宋文其 扬子石油化工有限公司 (江苏南京 210048)

纪波峰, 纪纲 上海同欣自动化仪表有限公司 (上海 200070)

摘要: 石化等行业的干气, 是典型的变组分气体。对其进行准确计量具有重要意义。但其组分每时每刻都是在变化的, 不能采用恒定组分气体质量流量的测量方法。FVC 气体质量流量计, 用涡街流量传感器测量工况条件下的体积流量, 用旋涡发生体前后的压差计算流量计出口侧气体密度, 经计算得到质量流量。这一方法简单可靠, 从而解决了变组分气体质量流量测量难题。文中阐述了测量管内气体雷诺数影响校正、可膨胀性补偿, 以及设计计算、计量检定方法和安装调试。经验表明, 这种流量计的公称通径可以比工艺管道通径小一档到二档甚至三档, 从而可节省投资。

关键词: 干气 FVC 气体质量流量计 上限流速 HART 协议 雷诺数校正 可膨胀性补偿 密度验证

Application of Variable Component Gas Mass Flowmeter

Song Wenqi, Yangzi Petrochemical Co., Ltd. (Nanjing, 210048)

Ji Bofeng, Ji Gang, Shanghai Tontion Automation Instrumentation Co., Ltd. (Shanghai, 200070)

abstract : Dry gas in petrochemical and other industries is a typical variable-component gas. It is of great significance to accurately measure it. But its composition is changing all the time, and the measurement method of constant composition gas mass flow cannot be used. FVC gas mass flowmeter, use vortex sensor to measure volume flow under working conditions. The pressure difference of the vortex generator is used to calculate the gas density on the outlet of the flowmeter, and the mass flow rate is obtained by calculation. This method is simple and reliable, which solves the problem of measuring the mass flow of variable-component gas. The article describes the correction of the Reynolds number in the measuring tube, the expansion compensation, as well as the design calculation, the measurement calibration method, and the installation and commissioning. Experience has shown that the nominal diameter of this kind of flowmeter can be reduced one, two or even three levels from the process pipe diameter, which can save investment.

Key words: dry gas FVC gas mass flowmeter upper limit speed HART protocol
Reynolds number correction expansion compensation Density verification

1 引言

石化等行业的干气, 交接点处流量往往达到每小时几十吨, 对其进行准确计量具有重要意义。但其组份每时每刻都是在变化的, 不能采用恒定组分气体质量流量的测量方法, 例如带温压补偿的标准孔板流量计或涡街流量计^[1]。最好采用科里奥利质量流量计, 可达到 $\pm 0.5\%$ 的准确度^[2]。但是科里奥利质量流量计价格太贵, 尤其是管径较大的规格。而且在流体静压很低时也不宜选用。几年前研发的 FVC 型涡街-差压变组分气体质量流量计, 解决了这一难题。

在 FVC 流量计中, 用涡街流量传感器测量传感器出口处的工况条件下的体积流量, 用旋涡发生体前后压差, 计算流量计出口侧的气体密度, 经计算得到质量流量。这一方法不仅简单可靠, 可测流速范围大, 而且准确度高。

2 工作原理

(1) 仪表结构

FVC 仪表由传感器和流量计算机（二次表）组成。其中传感器由 DY 型涡街流量传感器和测量旋涡发生体前后压差的智能差压变送器两部分组成。差压变送器具有 HART 通信能力。

(2) 基本关系式

① 用式（1）计算传感器出口侧工况条件下的体积流量 $q_{vf}^{[3]}$ ，即

$$q_{vf} = 3.6f / K_t \quad (1)$$

式中： f —— 涡街流量传感器输出频率，1/s； K_t —— 工况条件下流量系数，1/L。

因旋涡发生体前后的压差与发生体出口处的流体密度成正比^[4]，即

$$\Delta P = k\rho_f V^2 \quad (2)$$

式中： Δp —— 旋涡发生体前后的差压，Pa； k —— 系数，由实流标定得到，纯数； v —— 测量管内气体流速，m/s。

将式（2）整理可得

$$\rho_f = \Delta P / (kV^2) \quad (3)$$

从定义可导出测量管内气体流速与体积流量的关系^[3]。

$$V_f = q_{vf} / A \quad (4)$$

式中 V_f —— 测量管内气体流速，m/s；

A —— 测量管流通截面积，m²。

将式（1）代入式（4）得

$$V_f = \frac{3.6f}{K_t A} \quad (5)$$

将式（5）代入式（3）并整理得

$$\rho_f = \Delta P / k \left(\frac{3.6f}{K_t A} \right)^2 \quad (6)$$

将式（1）与式（6）相乘就得质量流量 q_m

$$\begin{aligned} q_m &= q_{vf} \rho_f \\ &= \frac{3.6f}{K_t} \cdot \Delta P / k \left(\frac{3.6f}{K_t A} \right)^2 \\ &= \frac{K_t A^2}{3.6k} \cdot \frac{\Delta P}{f} \end{aligned} \quad (7)$$

(3) 非线性校正

从式（7）可看出， q_m 和 ΔP 之间以及 q_m 与 f 之间都是线性关系，这对提高系统准确度是有好处的，如果 K_t 和 k 都真正是一个常数，那系统准确度就可以做得很高。不幸的是 K_t 和 k 并不是理

想的常数。实验表明，式（1）中的 K_t 要受到流过测量管的流体雷诺数影响，如果不对这种影响进行校正，涡街流量传感器只能达到（0.75~1.0）%的线性度^{[3][5]}。幸亏 FVC 流量计还配有流量计算机，可在计算机中按照经验模型进行校正。

在式（3）和式（7）中，系数 k 的非线性主要是受气体的可膨胀性影响。因为气体流过旋涡发生体时，在发生体前后产生的差压 ΔP 是在变化的，所以要产生永久性压损，这就使得传感器出口处的流体静压 P_2 比进口处静压 P_1 要低一些，此处流体静压的降低导致气体膨胀，从而引起 k 随着流速 V 的增大而有些许增大，增大的幅值与气体的等熵指数 κ 以及压损比 $\Delta P / P_1$ 有关，此项补偿也在流量计算机中按照经验公式进行补偿^{[6][7][8]}。其中流体静压 P_1 由流量计算机用 HART 通信的方法去差压变送器读取。

上面的两项补偿所依据的模型要做到天衣无缝完全准确是困难的，残存的瑕疵都会引起流量测量误差，好在流量计在出厂前还有一个实流校准工序，可将校准暴露出来的误差用 10 段折线法进行恰到好处的修正，从而使整机 $\pm 0.5\%MV$ 的准确度得到保证^[9]。

（4）信号传送方法

我们知道，流量传感器、变送器与流量计算机之间传送信号，如果采用模拟信号传送方式，就会损失大约 0.1%FS 的精度，如果采用数字通信的方法传送，就完全不损失精度。采用频率信号传送，也不损失精度。FVC 流量计，采用 HART 通信的方法传送差压信号，采用脉冲计数的方法接受涡街传感器送出的代表流速的脉冲信号，从而做到完全不损失精度^[10]。

3 FVC 主要技术指标

最大允许误差：读数值的 $\pm 0.5\%$ ；

流量量程比：1:10~1:20（与工况条件下的气体密度有关）

最高流速：80m/s；

传感器允许振动：2g

工作压力： $\leq 6.4MPa$ （允许传感器在微静压管道中使用）

气体带液：均匀悬浮在气体中的液滴，不影响正常测量。

传感器防爆等级：Exd II CT6 或本安。

4 设计与计算

FVC 仪表设计的主要内容是确定其公称通径。此项工作有其重要的经济意义和技术意义。因为仪表通径选的太大，不仅使投资显著增加，而且使可测最小流量显著增大，不利于小流量的测量。而若通径选得太小，则在最大流量条件下，流过流量传感器的气体流速就有可能大于允许的上限流速，从而使误差陡然增大。

通常情况下，对于采用横河 DY 型涡街流量传感器作为流速测量部件的 FVC，因其最高流速允许达到 80m/s，其公称通径可比工艺管道公称通径小一档到二档甚至三档。

下面以实际对象为例说明设计计算方法。

有一干气测量对象，工艺管道 DN400，最大流量为 $27000Nm^3/h$ ，常用温度为 $20^\circ C$ ，常用压力为 $0.4MPa G$ ，最低压力 $0.25 MPa G$ ，据设计院介绍，流量计安装在用气方，出现最大流量时，仪表安装处出现最低压力，所以，FVC 工况条件下的最大体积流量 q_{vfmax} 计算以 q_{vnmax} 、 t 和 P_{min} 为条件。令压缩系数 $Z=1$ ，则

$$\begin{aligned}
q_{vf \max} &= \frac{P_n \cdot (273.16 + t)}{P_{\min} \cdot (273.16 + 20)} q_{vn \max} \\
&= \frac{0.101325 \cdot (273.16 + 20)}{(0.25 + 0.101325) \times 293.16} \cdot 27000 \\
&= 7787 \text{ m}^3/\text{h}
\end{aligned} \tag{8}$$

式中 $q_{vf \max}$ —— 工况条件最大流量, m^3/h ;

P_n —— 标准大气压, MPa ;

$P_{\min}$ —— 最小工作压力, MPa G ;

t —— 流体温度, $^{\circ}\text{C}$;

$q_{vn \max}$ —— 最大流量, Nm^3/h 。

计算 80 m/s 流速条件下对应的测量管内径。

$$\therefore q_{vf \max} / \frac{\pi}{4} D^2 = 80 \tag{9}$$

$$\therefore D = \left(q_{vf \max} / \frac{\pi}{4} \times 80 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

$$= \left(\frac{7787}{3600} / \frac{\pi}{4} \times 80 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= 0.185 \text{ m}$$

显然, 选用 DN200 仪表是合适的。在这个实例中, 涡街流量传感器的公称通径比工艺管道公称通径小三档。

5 计量检定

FVC 流量计在安装投运前, 一般都要进行计量检定, 所依据的是气体质量流量计计量检定规程。检定的工况参数应尽量与实际使用的条件接近。检定的目的—是满足计量管理的需要, 另一是对制造厂出厂校验 (校准) 结果进行验证。流体密度在一定范围内变化, 质量流量示值不应超差。

由于每一套气体流量标准装置都有误差, 而且检定时的工况条件与出厂校验时也会有差异, 故检定得到的误差数据与出厂校验结果会有差异, 但最终结果不能超差。

由于 FVC 流量计具有流体可膨胀性自动补偿功能。而补偿幅值又与流过传感器的流体等熵指数 κ 以及相对压降 $\Delta P/P_1$ 有关^{[8][9]}, 所以检定时应将流量计算机菜单中相应项目按实际情况予以设定。例如在空气流量标准装置上检定, 常用压力为 0.6 MPa G , 则可将菜单中的 κ 值设定为 1.4, 检定完毕再将 κ 值恢复到出厂设置。

实际使用时, P_1 实际值是 FVC 二次表用 HART 通信的方法去差压变送器中读取的, 而二次表中的“手动设定压力”作为后备冗余, 也是必不可少的。

上述第 4 节设计与计算例中所提到的一台 FVC 流量计, 出厂校准记录如图 1 所示。用户所做的检定, 最大误差为 0.48%, 所以基本相符。

仪表的校验、检定中, 试验点的最大流量只达到仪表满刻度的一半甚至更小, 这是受现有空气流量标准装置的能力所限, 好在难度高的量程低段都做了试验。

证书编号: 校准字第2821800066号
Certificate No.

校准结果

Results of Calibration

校准项目	校准结果			
一、外观检查	正常			
二、示值误差				
设定流量点 (kg/h)	示值误差 (%)	重复性 (%)		
1900	-0.35	0.43		
3800	0.25	0.13		
5800	-0.10	0.07		
7700	0.47	0.14		
9400	-0.11	0.36		
三、流量计示值误差	0.47 %	技术指标 ± 1.5 %	结论	P
四、流量计重复性	0.43 %	技术指标 ≤ 0.5 %	结论	P

以下空白
Blank below

说明(Notes)
1、测量结果的扩展不确定度评定依据JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》。
The expanded uncertainty of the measurement result(s) is evaluated in accordance with JJF 1059.1-2012 "Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement".
流量校准结果扩展不确定度: $U_{95} = 0.50\%$ ($k=2$)
2、校准结果符合技术指标要求 ("P"表示"符合要求")。
The calibration results meet the technical requirements ("P" means "Pass").
3、根据校准文件的建议 and 客户需求, 该仪器在正常使用情况下24个月校准一次。
According to the proposal of calibration document(s) and customer requirements, the instrument shall be calibrated once every 24 months under normal use.



未经本实验室许可, 不得部分复制证书(除全文复制外)。
This certificate shall not be partially copied, without the permission of the laboratory.
第3页, 共3页
page of

图1 出厂校验(校准)结果

6 安装与调试

FVC 流量计的传感器主要由横河的 DY 型涡街流量传感器和 EJA110 型差压变送器组成, 而这两种仪表均具有良好的耐振性, 所以安装管道允许有轻度振动, 振动加速度 2g 时不影响正常测量。

FVC 流量计最好安装在水平管上, 差压变送器置于水平管道的上方。这时, 流体中即使含有悬浮在气体中的微小液滴, 也不会引起导压管堵塞, 从而影响正常测量。

仪表安装完毕, 就可对差压变送器校零, 然后开表投运。读出流量计算机原始数据画面中的来自涡街流量传感器的脉冲频率, 除以流量系数 K_t , 得工况条件下的体积流量, 二次表显示的体积流量值应与计算值一字不差。二次表显示的差压值, 应与差压变送器液晶表头显示的差压值一字不差。

用户最关心的是质量流量示值究竟准不准。要回答这个问题, 首先要对二次表上工况条件下的气体密度示值的准确与否进行判断。从式 (7) 知 $q_m = \rho_f \cdot q_{vf}$, 而 q_{vf} 的准确度前面已经作了验证, 所以, 只要 ρ_f 也是准的, 则 q_m 就是准的。

验证 ρ_f 示值的准确度, 简单易行的方法是对当前的混合气进行取样分析, 然后按式 (11) 计算混合气标准状态密度, 再根据取样时的气体温度压力按式 (13) 计算 ρ_f 。取样的同时, 记录仪表显示的混合气密度, 然后进行比对^[11]。

$$\rho_n = X_1\rho_1 + X_2\rho_2 + \dots + X_{m-1}\rho_{m-1} + X_m\rho_m \quad (11)$$

式中 ρ_n —— 标准状态混合气体密度, kg/m^3 ;

$X_1 \dots X_m$ —— 各组分的含量 (V/V);

$$X_1 + X_2 + \dots + X_{m-1} + X_m = 100\% \quad (12)$$

$\rho_1 \cdots \rho_m$ —— 标准状态各组分密度, kg/m^3 。

工作状态下混合气体理论密度 ρ_f 在忽略压缩系数影响后为^[9]:

$$\rho_f = \frac{P_f \cdot T_n}{P_n \cdot T_f} \cdot \rho_n \quad (13)$$

式中 P_f —— 涡街流量传感器出口绝对压力, MPa;

P_n —— 标准状态绝对压力, 0.101325 MPa;

T_n —— 标准状态热力学温度, K;

T_f —— 工况条件下流体热力学温度, K。

7 结束语

① 石化等行业的干气, 是典型的变组分气体。对其进行准确计量具有重要意义。但其组分每时每刻都是在变化的, 不能采用恒定组分气体质量流量的测量方法。FVC 气体质量流量计, 用涡街流量传感器测量工况条件下的体积流量, 用旋涡发生体前后的压差计算流量计出口侧气体密度, 经计算得到质量流量。这一方法简单可靠, 从而解决了变组分气体质量流量测量的难题。

② 由于涡街流量传感器量程比大, 从而使 FVC 流量计也具有较大的量程比。而且在微静压对象中也能正常测量。

③ 测量管内流体雷诺数 Re_D 对涡街流量传感器的流量系数线性度有一定影响。气体的可膨胀性也会引起流量测量误差。在流量二次表中对这两种影响均按数学模型进行了补偿。并在出厂前的实流校准中, 用 10 段折线法进行恰到好处的修正, 从而使 $\pm 0.5\%MV$ 的准确度得到保证。

④ 涡街流量传感器测量管内气体流速, 最高允许 80m/s, 设计选型时, 一般可将仪表的公称通径缩小一档到二档甚至三档 (按上限流速选定), 从而节省投资。

⑤ 由于 FVC 流量传感器耐振性能优于 2g, 所以安装现场有轻度振动, 不影响正常测量, 而且只要正确安装, 气体带有微量液滴, 也不影响正常测量。

参考文献

1. 纪纲, 纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
2. 肖素琴, 韩厚义, 质量流量计[M]. 北京: 中国石化出版社, 1999: 14-15.
3. 姜仲霞, 姜川涛, 刘桂芳. 涡街流量计[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006.
4. 中国石化化工事业部等组织编写. 企业能源计量常见难题解析及对策[M]. 北京: 中国石化出版社, 2017.
5. 王池, 王自和, 张宝珠, 孙淮清. 流量测量技术全书. 北京: 化学工业出版社, 2012
6. GB/T 2624—2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
7. 许文达, 张涛, 毕英, 等. 气体可膨胀性对涡街流量计计量性能影响分析[J]. 电子测量与仪器学报. 2013, 27(09): 797-802.
8. 孙江平, 戴铮, 蔡方明, 纪纲, 纪波峰. 气体的膨胀性对流量测量的影响及对策研究[J]. 石油化工自动化, 2018, 54(5): 58~61
9. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2009.
10. 张宝良, 纪波峰, 纪纲. 基于 HART 总线的双量程差压流量计. 自动化仪表. 2016.37(8): 93~95.
11. 宋文其, 叶明, 余厚林等. 一种变组分气体流量计的研究, 石油化工自动化. 2018, 54(4): 64~67.

(本文源自《石油化工自动化》2022 年第 5 期)