

一种变组分气体流量计的研究

宋文其¹, 叶明¹, 余厚林¹, 纪波峰², 纪纲²

(1.扬子石化有限公司, 江苏 南京 210048; 2.上海同欣自动化仪表有限公司, 上海 200070)

提 要: 针对干气、驰放气、火炬气等类型的气体组分变化快的特性, 易引起标准状态下密度不稳定的问题, 无法像稳定的气体那样, 采用温度压力补偿的方法完成质量流量的测量。文中采用涡街流量传感器测量这种气体工况条件下的体积流量, 再用旋涡发生体前后的压差, 计算工况条件下的流体密度, 并在正压法空气流量标准装置上进行全量程范围内质量流量校准, 达到±0.5%MV 准确度。现场运行证明: 这一方法简单可靠, 成本比科氏力质量流量计方法低很多。

关键词: 变组分气体 质量流量 CMF 方法 涡街-差压方法 准确度验证 密度

Study on a variable component gas flowmeter

Song wenqi, Ye ming, Yu houlin SINOPEC Yangzi petrochemical Co., Ltd.(Nanjing, 210048)

Ji bofeng, Ji gang Shanghai Tontion automation instrumentation Co., Ltd.(Shanghai, 200070)

Abstract: The component of dry gas, purge gas, flare gas varies quickly in a wild range, cause to gas standard status density changes too. So we can't measure gas mass flow by temperature and pressure compensation, like fixed component gas. The article describes that use vortex sensor measure variable component gas volume flow, and use differential pressure between vortex occurrence body to calculate gas density under operation condition. Calibrated in a positive pressure method gas flow standard device, achieve ±0.5% accuracy. Field operation proved that this is a simple and reliable method, and cost is much lower than Coriolis mass flowmeter.

Key words: variable component gas mass flow CMF method vortex -DP method accuracy verify density verify

在气体质量流量测量任务中, 被测流体绝大多数为组分稳定的气体, 因为组分稳定, 所以标准状态密度稳定, 这样就可以利用式(1)计算其工况条件下的密度^[1], 用于密度补偿。

$$\rho_f = \frac{P_f \cdot T_N \cdot Z_N}{P_N \cdot T_f \cdot Z_f} \rho_n \quad (1)$$

式中: P_f —— 工况条件下气体绝对压力, MPa; P_N —— 标准状态下气体压力, MPa; T_N —— 标准状态气体热力学温度, K; T_f —— 工况条件下气体热力学温度, K; Z_N —— 标准状态气体压缩系数, 一般 $Z_N=1.0000$; Z_f —— 工况条件下气体压缩系数, 查表或计算得到; ρ_n —— 标准状态下气体密度, kg/m^3 。

对于体积式流量计, 则可用式(2)计算质量流量^[2]:

$$q_m = q_{vf} \cdot \rho_f \quad (2)$$

式中： q_{vf} —— 工况条件下体积流量， m^3/h ； ρ_f —— 工况条件下流体密度， kg/m^3 。

但是，如果气体的组分在不停地变化，就不能用式（1）和式（2）的方法计算 q_m ^[3]。为了解决这个问题，人们用科氏力质量流量计测量变组分气体质量流量^[4]。但存在一个问题，即价格太高，很多用户承担不了。为此，研发价格相对便宜的仪表就成为当务之急。

1 涡街流量计工作原理及校验

1.1 工作原理

在气体流量测量中，涡街流量计已经应用得十分普遍，具有结构简单、工作可靠、线性分度、脉冲信号输出等优点，可以避免信号的传送而引起的误差。同时，涡街流量计具有良好的耐振性，使其具有很好的抗干扰性能。但也有其局限性，它只能测量工况条件下的体积流量，而无法测量流体密度。笔者利用旋涡发生体前后的压差，计算工况条件下的流体密度，可以克服涡街流量计的局限性。

根据伯努利方程可推导出公式（3），即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^[5-6]。

$$\Delta P = K\rho_f V^2 \quad (3)$$

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（3）整理可得

$$\rho_f = \Delta P / (KV^2) \quad (4)$$

利用式（4）就可计算工况条件下的流体密度 ρ_f ，其中 V 可根据涡街流量传感器的输出频率和其测量管的几何尺寸计算得到。而 K 则来自涡街流量传感器制造厂提供的数据。例如横河公司的DY型涡街流量传感器， $K=1.08$ 。不同通径的涡街， K 会有一些差异，这会影响到整套流量计的满量程准确度，可在整机实流校验中，根据满量程误差予以修正。

由于从涡街流量传感器输出信号 f 可用式（5）计算体积流量，即

$$q_{vf} = 3.6f / K_t \quad (5)$$

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。

则式（4）与式（5）相乘就得质量流量：

$$q_m = \rho_f q_{vf} \quad (6)$$

$$= \frac{3.6f}{K_t} \cdot \frac{\Delta P}{KV^2}$$

式（3）中的 v 可由式（7）计算得到：

$$v = q_{vf} / A \quad (7)$$

式中： A —— 涡街流量传感器测量管截面积， m^2 。

为了提高质量流量测量的精度，还须引入可膨胀性系数的自动校正，以抑制高流速时质量流量测量示值出现过大的正偏差。该项校正所用的数学模型既有别于标准孔板，也有别于喷嘴、文丘里管^[7-8]。

FVC变组分气体流量计由传感器和带显示的转换器组成，其中传感器由一台横河公司DY型涡街流量传感器和一台EJA型差压变送器按规定的组合而成。如图1所示。



图 1 FVC 型变组分气体流量计外形示意

1.2 技术指标

成套流量计放在（正压法）空气流量标准装置上逐台校验，确保 10:1 量程比范围内的 0.5 级准确度。校验时的操作压力，尽量使空气密度接近常用密度。

从原理来说，涡街流量传感器只能达到 1% 的线性度，为了达到整套流量计的 0.5 级准确度，就必须借助于先进的在线校正技术。现在大家都喜欢使用的 0.05 级和 0.04 级差压变送器，就是因为采用了多因子校正才获得如此高的精度的。

表 1 所示为一台 DN80 变组分质量流量计的实流检定记录^[3]

表 1 FVC080 检定记录

气体流量计(电流质量型)检定/校准原始记录

YZJLZ-JL-FI-06

委托方: 上海同欣自动化仪表有限公司 生产厂: 上海同欣自动化仪表有限公司 流量计量程: 0-3000 证书编号: TEST变组分2
 流量计名称: 变组分气体质量流量计 流量计编号: 150107 流量计位号: _____ 规格号: _____
 型号规格: FVC080 精度等级: _____ 装置管径: 80.00 mm 室温: 17.91℃ 设备状态: _____

检定点 (kg/h)	序号	标准表数据										被校表						计算参数				
		检定 时间 (s)	累计 脉冲 (N)	仪表 系数 (P/Kg)	压力 (Mpa)	温度 (℃)	密度 (kg/m ³)	累计 质量 (kg)	质量 流量 (kg/h)	体积 流量 (m ³ /h)	流速 (m/s)	输出 电流 (mA)	压力 (Mpa)	温度 (℃)	密度 (kg/m ³)	实际 体积 流量 (m ³ /h)	质量 流量 (kg/h)	体积 流量 (m ³ /h)	误差 E _i (%)	平均误差 E (%)	重复性 d (%)	
293.3389	1	30.001	8800	3600.0000	0.7652	12.3415	11.1127	2.4444	293.3284	26.3957	1.5320	5.5550	0.7656	12.0376	10.5811	27.7220	291.5670	27.5555	27.5555	-0.6005	-0.4985	0.1342
	2	30.003	8800	3600.0000	0.7652	12.3588	11.1022	2.4444	293.3030	26.4184	1.5318	5.5584	0.7656	12.0432	10.5814	27.7186	292.2069	27.6151	27.6151	-0.3737		
	3	30.002	8802	3600.0000	0.7653	12.3666	11.1172	2.4450	293.3853	26.3903	1.5323	5.5566	0.7656	12.0547	10.5809	27.7279	291.8561	27.5834	27.5834	-0.5212		
545.6077	1	30.005	16384	3600.0000	0.7590	12.4230	11.0407	4.5456	545.3849	49.3977	2.8750	6.9232	0.7577	12.0918	10.4831	52.0249	548.0940	52.2833	52.2833	0.4967	0.4761	0.2013
	2	30.002	16377	3600.0000	0.7582	12.4357	11.0185	4.5492	545.8618	49.5406	2.8805	6.9200	0.7569	12.1117	10.4722	52.1250	547.4923	52.2807	52.2807	0.2987		
	3	30.001	16368	3600.0000	0.7578	12.4535	11.0146	4.5467	545.5764	49.5323	2.8807	6.9283	0.7564	12.1261	10.4661	52.1280	549.0617	52.4610	52.4610	0.6388		
1196.2807	1	30.003	36009	3600.0000	0.7356	12.4889	10.6866	10.0025	1200.2000	112.3089	6.5770	10.4145	0.7253	12.1675	10.0845	119.0141	1202.7126	119.2632	119.2632	0.2093	0.1711	0.1385
	2	30.003	35852	3600.0000	0.7317	12.5017	10.6281	9.9589	1194.9352	112.4314	6.5775	10.3901	0.7217	12.1667	10.0395	119.0233	1198.1490	119.3434	119.3434	0.2689		
	3	30.002	35813	3600.0000	0.7290	12.5151	10.5984	9.9481	1193.7070	112.6308	6.5918	10.3687	0.7191	12.2075	10.0074	119.2820	1194.1239	119.3237	119.3237	0.0349		
1920.5235	1	30.000	57955	3600.0000	0.6937	12.4060	10.0480	16.0986	1931.8140	192.2594	11.4303	14.2952	0.6643	12.1467	9.3398	206.8378	1930.3524	206.6813	206.6813	-0.0757	-0.3187	0.3121
	2	30.001	57566	3600.0000	0.6868	12.3850	9.9718	15.9906	1918.7963	192.4214	11.4537	14.2052	0.6576	12.1283	9.2579	207.2604	1913.4758	206.6857	206.6857	-0.2773		
	3	30.000	57329	3600.0000	0.6812	12.3659	9.9006	15.9247	1910.9603	193.0146	11.4864	14.1303	0.6523	12.1123	9.1938	207.8532	1899.4365	206.5998	206.5998	-0.6030		
2925.8144	1	30.005	89803	3600.0000	0.6047	11.8406	8.6795	24.9453	2992.9046	344.8255	21.8146	19.9716	0.5193	11.6376	7.5818	394.7470	2994.6767	394.9807	394.9807	0.0592	0.0592	0.0452
	2	30.000	88374	3600.0000	0.5931	11.7798	8.5639	24.5483	2945.7705	343.9768	21.8197	19.7141	0.5092	11.5104	7.4607	394.8403	2946.3894	394.9232	394.9232	0.0210		
	3	30.002	85169	3600.0000	0.5690	11.6066	8.2687	23.6581	2838.7680	343.3129	21.7769	19.1548	0.4879	11.3815	7.2038	394.0655	2841.5325	394.4493	394.4493	0.0974		
备注:																				结论		

检定人: _____ 审核人: _____ 检定日期: _____ 2015年4月9日

图 2 所示为传感器在管道上的安装图，图 3 所示为烯烃燃料气管网流量历史数据趋势图。



图 2 FVC 流量计在管道上的安装

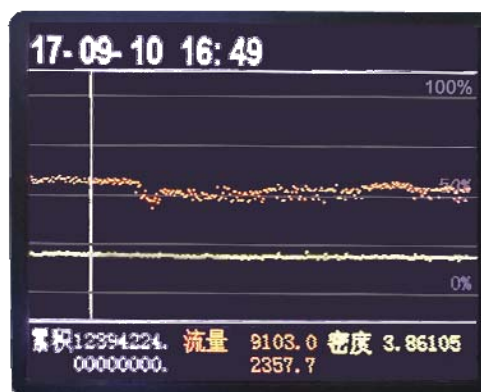


图 3 烯烃厂燃料气管网流量历史数据及趋势图

经过出厂前逐台实流校验的变组分气体质量流量计，在现场安装使用仍能保证准确度的关键是配套校验、配套使用以及按照规程合理安装。

1.3 流量计示值准确度的现场验证

一套流量计投入运行后，需要接受用户对流量示值的验证，这项工作的本质是对流量示值准确度进行验证。

1.3.1 对流量零点示值的验证

对流量计示值准确度进行验证的方法有多种，其中对流量计零点示值进行验证最简单，只要将总阀关闭（如果工艺专业允许），观察流量计显示值。

对于涡街-差压型变组分质量流量计，因为是以涡街流量传感器为基础的，测量管内流体流速用不着降到零，其输出频率已经进入切除区，所以在零点验证中不会出现问题。

② 对零点之外流量示值的验证方法

这种流量计的转换器自带的液晶显示屏，可显示丰富的内容，其主画面如图 1 所示，即除了显示质量流量累积值之外，还显示质量流量瞬时值 q_m 、工况条件下体积流量 q_{vf} 和流体密度 ρ_f ，在仪表使用现场可间接验证质量流量示值。

对零点之外流量显示值进行验证最简单易行的方法是，对工况条件的流体密度 ρ_f 显示值进行验证。如式 (1) 所示， $q_m = \rho_f \cdot q_{vf}$ ，而工况条件下的体积流量 $q_{vf} = f / K_t$ ，涡街流量传感器在出厂前已经过实流标定得到 K_t ，所以在现场只要用仪器测量出 f ，就可得到 q_{vf} 的应有值。这样，只要验证 ρ_f 也是准的，就可证明 q_m 是准的。

仪表显示的流体密度值，可用成分分析仪器测得的混合气体组分值，经下式计算得到的理论密度，然后进行比较^{[9][10]}，求得示值误差。

$$\rho_n = X_1\rho_1 + X_2\rho_2 + \dots + X_{m-1}\rho_{m-1} + X_m\rho_m \quad (8)$$

式中 ρ_n —— 标准状态混合气体密度, kg/m^3 ;

$X_1 \cdots X_m$ —— 各组分的含量 (V/V);

$$X_1 + X_2 + \cdots + X_{m-1} + X_m = 100\% \quad (9)$$

$\rho_1 \cdots \rho_m$ —— 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:

$$\rho_f = \frac{P_f \cdot T_n}{P_n \cdot T_f} \cdot \rho_n \quad (10)$$

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。

3. 结束语

变组分气体质量流量测量具有一定的难度, 用涡街流量计测量工况条件下的体积流量, 再用旋涡发生体前后的压差, 推算发生体后流体密度, 相乘得到质量流量, 然后放在正压法空气流量标准装置上校验, 可保证 0.5 级准确度, 多种口径仪表在现场投运表明, 该方法稳定可靠, 节省投资。

参考文献

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 肖素琴, 韩厚义, 质量流量计【M】. 北京: 中国石化出版社, 1999: 14-15.
5. 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.
6. 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
7. 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.
8. 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.
9. 上海工业自动化仪表研究所. GB/T 18215.1-2000 城镇人工煤气主要管道流量测量 第一部分: 采用标准节流装置的方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
10. 中石化工程设计有限公司西南分公司. GB/T 21446-2008 用标准孔板流量计测量天然气流量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

摘自《石油化工自动化》2018.54 (04)