

气体输送过程中浮子流量计测量结果不确定度评定

黄 丹¹ 王素玲² 申永冠¹

(1. 山西潞安检测检验中心有限责任公司, 山西 长治 046204)

(2. 山西省节能中心有限公司, 山西 太原 030045)

摘 要: 随着贸易结算需求增大, 能源计量和环境保护被逐步重视, 工业质量、效率、成本控制目标的提高, 对流量计准确度及可靠性有了更高要求。本文以浮子流量计为被测对象介绍其测量结果不确定度评定过程。

关键词: 标准装置; 不确定度; 计量; 刻度流量

1 概述

依据 JJG 257-2007 浮子流量计检定规程, 控制温度 5~35℃; 相对湿度 45%~75%; 大气压力 86~106kPa, 选用测量标准 1 级皂膜气体流量装置 (要求扩展不确定度优于被检最大允许误差的 1/2, 大部分浮子流量计为 2.5 级及以下, 满足要求), 分度值为 0.1℃的温度计 (要求分度值为 0.2℃) 和 1 级倾斜式微压计, 对被测对象浮子流量计进行测量。

由于受标定设备限制, 流量计生产者不可能对所有浮子流量计按用户要求进行实际流体标定, 故选用近于理想流体的水和干燥空气作为介质 (标准流体) 在标准状态下标定后得到的刻度线。浮子流量计产品有如下三种刻度之一:

①标准状态下的水或空气进行刻度;

②标准状态下的工作液体或气体 (非标准流体) 进行刻度;

③非标准状态下工作液体或气体进行刻度。

用户在使用时, 需要对刻度流量进行非标流体/非标准状态下的修正。修正的依据是浮子动能定理及浮子在同一高度 h 下时不同的流体介质所反映的流量值是多少得来的^[1]。

2 浮子流量计测量方法

选用钟罩式气体流量标准装置提供气源、皂膜气体流量装置作为测量标准, 采用进气法, 依次将钟罩式气体流量标准装置、流量计、皂膜气体流量装置串联安装, 安装时要做到系统无泄漏、无振动, 准确度等级为 2.5 级及以下等级的流量计倾斜度不超过 5°, 流量计上游管道密封件不得凸入管道内部^[2]。调节被检流量计, 使流量稳定在被检点, 挤压皂膜, 读取皂膜流量计显示流量, 同时记录被检流量计和皂膜流量计入口端的温度和压力, 每个检定点重复测量 10

次, 取平均值, 计算被检流量计在刻度状态下的实际流量。

3 浮子流量计测量模型

单次检定的示值误差 Δ :

$$\Delta = q_{vs} - q_v \quad (3-1)$$

其中: q_{vs} : 流量计的流量刻度; q_v : 流量计在刻度状态下的实际流量。

$$q_v = \frac{V}{t} \cdot B \quad (3-2)$$

$$B = \frac{p_s}{T_s} \left(\frac{T_k T_m}{P_k P_m} \right)^{1/2} \quad (3-3)$$

式中:

V : 流入气体装置的气体体积;

t : 流入的时间;

P_k, P_s, P_m : 分别为刻度状态、皂膜流量计、流量计入口处的气体绝对压力;

T_k, T_s, T_m : 分别为刻度状态、皂膜流量计、流量计入口处的气体热力学温度;

$P_k=101325\text{Pa}$, $T_k=293.15\text{K}$ 。

注: 式 (3-2) 与式 (3-3) 的来历: 皂膜流量计入口端温度与压力与浮子流量计入口端温度与压力略有不同, 故先将皂膜流量计工况下的流量转换为浮子流量计入口端工况下的实际流量 (浮子流量计工况下流量标准值), 然后通过刻度换算公式将该标准值转换为刻度状态下的实际流量 (浮子流量计刻度状态下流量标准值)。

4 气体输送时浮子流量计测量结果不确定度评定

4.1 浮子流量计测量结果不确定度来源

A 类: 重复性引入的标准不确定度分量是由直接观测的数据组成的, 故当调节浮子流量计时, 以皂膜流量计工况下实际流量作为重复性数据确定标准不确

定度分量 u_A 。

B 类：皂膜流量计准确度等级引入的标准不确定度分量 u_{B1} ；温度计准确度等级引入的标准不确定度分量 u_{B2} ；倾斜式微压计准确度等级引入的标准不确定度分量 u_{B3} ；标准量计算过程中的数据修约引入标准不确定度分量 u_{B4} 。

4.2 气体输送时浮子流量计测量不确定度评定过程

4.2.1 由重复性引入的 A 类不确定度评定分析

选用量程为 30~300mL/min，准确度等级为 4 级，型号为 LZB-3WB 的玻璃浮子流量计作为被测仪器，在温度 16.5℃，湿度 47%，大气压 91.63kPa 的环境下，分别在刻度流量 30mL/min、60mL/min、120mL/min、180mL/min、240mL/min、300mL/min 六个检定点测量 10 次，读取皂膜流量计工况下的流量值，数据如表 1 所示。

以 30mL/min 为例，根据贝塞尔公式和算术平均值公式计算该检定点算术平均值及其实验标准偏差，得到：

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 28.61 \text{ mL/min}$$

$$s(\bar{X}) = 1.876$$

因检定规程要求每个检定点检定 2 次，故在该检定点由重复性引入的标准不确定度分量为：

$$u_A = \frac{S(\bar{X})}{\sqrt{2}} = 1.326$$

以此类推，每个检定点由重复性引入的标准不确定度分量见表 2。皂膜流量计的分辨力为 0.1mL/min，假设其为均匀分布，由分辨力引入的标准不确定度分量为： $u_{分} = 0.29 \times 0.1 = 0.029 \text{ mL/min}$ ，较 240mL/min 检定点的标准不确定度 0.875mL/min 的三分之一还小很多，故可不考虑由皂膜流量计分辨力带来的不确定度影响。

4.2.2 计算皂膜流量计在刻度状态下的实际流量

皂膜流量计、浮子流量计入口端温度及压力数据。皂膜流量计与浮子流量计入口端温度通过温度传感器测量得到，经过测量两者入口端温度一致。入口端压力测量选用倾斜式微压计，通过公式：

$$P = \rho g (L \times \text{常数因子} \times 10^{-3}) + \text{大气压}$$

其中：

$$\rho = 810 \text{ kg/m}^3;$$

L 为酒精液柱长度，常数因子 = 0.6；

大气压 = 91.63kPa；

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2。$$

将酒精柱长度转换为皂膜流量计与浮子流量计入口端绝对压力，温度、压力在各检定点测量 10 次，计算平均值，数据见表 3。

结论如下：将表 1、表 3 数据代入公式 (3-2) 及 (3-3) 中，得到各检定点在刻度状态下的实际流量值，以检定点 30mL/min 为例，见下列公式，各检定点在刻度状态下的实际流量值汇总见表 4。

$$q_v = 28.61 \times \frac{91630}{18.13 + 273.15} \times \sqrt{\frac{293.15 \times 291.28}{101325 \times 92282.98}} = 27.20 \text{ mL/min}$$

4.2.3 B 类不确定度评析

①皂膜流量计准确度等级引入的标准不确定度分量 u_{B1} ，选用的皂膜流量计为 1 级，且以相对误差表示，假设其服从均匀分布，则各检定点的标准不确定度分量见表 5；

②温度计准确度等级引入的标准不确定度分量 u_{B2} ，选用的温度计分辨力为 0.1K，假设其服从均匀分布，则 $u_{B2} = 0.029 \text{ K}$ ；

③倾斜式微压计准确度等级引入的标准不确定度分量 u_{B3} ，选用的倾斜式微压计为 1 级，最大量程为 2000Pa，假设其服从均匀分布，则 $u_{B3} = 11.5 \text{ Pa}$ ；

④标准量计算过程中的数据修约引入的标准不确定度分量 u_{B4} ，在计算皂膜流量计在刻度状态下的实际流量时，最终结果修约至 0.1mL/min，假设其为均匀分布，则 $u_{B4} = 0.029 \text{ mL/min}$ （见表 5）。

4.3 扩展不确定度

4.3.1 标准不确定度分量合成

因为 $q_v = q_c \frac{P_s}{T_s} \left(\frac{T_k T_m}{P_k P_m} \right)^{1/2}$ ，为幂函数，所以 B 类标准不确定度合成按 $\left| \frac{u_y}{y} \right| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[P_i u(x_i) / x_i \right]^2}$ 计算，得到结果再与 A 类标准不确定度进行合成。其中各量的灵敏系数分别求偏导，见表 6；由幂函数方和根公式合成标准不确定度，结果见表 7。

4.3.2 测量结果扩展不确定度

因被测值是通过调节浮子流量计确定的，并且整个系统中都是在确定 q_v 值，所以扩展不确定度如表 8 所示。评定结果的扩展不确定度基本满足不大于被检仪器最大允许误差（12mL/min）的 1/3 的要求。

参考文献：

- [1] 王池. 流量测量技术全书 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012-6.
- [2] JJG 257-2007. 浮子流量计检定规程 [S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007(8):9-10.

表1 皂膜流量计重复性数据表

(单位: mL/min)

检定点	皂膜流量计在 16.5℃, 91.63kPa 下的实际流量										$\bar{X}$
30	30.0	30.2	33.0	27.5	27.4	27.6	27.7	27.6	27.8	27.3	28.610
60	63.6	63.0	63.2	68.5	64.6	64.1	64.1	64.1	63.0	63.5	64.233
120	132.1	129.9	130.7	127.1	130.2	129.2	134.3	130.5	135.4	131.2	131.060
180	187.6	181.5	184.2	182.1	185.7	187.9	186.7	188.5	181.8	185.4	184.867
240	254.5	258.7	256.3	258.1	258.1	256.3	256.3	255.1	257.5	255.7	256.900
300	310.3	311.1	304.4	308.5	307.7	309.4	310.3	307.7	307.7	307.7	308.278

表2 由重复性引入的标准不确定度分量汇总表

(单位: mL/min)

检定点	30	60	120	180	240	300
u_A	0	1.200	1.701	1.864	0.875	1.363

表3 皂膜流量计与浮子流量计入口端温度、压力

检定点 /mL/min	入口端温度 /K	浮子流量计入口端压力 /Pa	皂膜流量计入口端压力 /Pa
30	291.28	92282.98	91630
60	291.44	92271.07	91630
120	291.65	92260.12	91630
180	291.84	92261.55	91630
240	292.19	92252.97	91630
300	292.47	92253.45	91630

表4 流量计在刻度状态下实际流量及示值误差数据表

(单位: mL/min)

检定点	30	60	120	180	240	300
刻度状态实际流量值 / q_v	27.2	61.0	124.5	175.6	243.9	292.5
绝对误差	2.8	-1.0	-4.5	4.4	-3.9	7.5
最大允许误差绝对值	$4\% \times 300 = 12$					
结论	符合要求					

表5 皂膜流量计准确度等级引入的标准不确定度分量 u_{B1}

(单位: mL/min)

检定点	30	60	120	180	240	300
u_{B1}	0.1732	0.3464	0.6928	1.0392	1.3856	1.7321

表6 各因变量灵敏系数

因变量	灵敏系数	检定点 / (mL/min)					
		30	60	120	180	240	300
q_c	q_v/q_c	0.9506	0.9504	0.9501	0.9498	0.9493	0.9488
P_s	q_v/P_s	0.0003	0.0007	0.0013	0.0019	0.0027	0.0032
T_s	$q_v/(-T_s)$	-0.0934	-0.2095	-0.4299	-0.6017	-0.8346	-1.0001
T_m	$q_v/2T_m$	0.0467	0.1047	0.2150	0.3008	0.4173	0.5001
P_m	$-3q_v/2P_m$	0	0	0	0	0	0

表7 标准不确定度分量汇总表

检定点	A类	B类					$u_{合成}$
	重复性 u_A	皂膜流量计 u_{B1}	温度计准确度等级 u_{B2}	倾斜式微压计准确度等级 u_{B3}	数据修约 u_{B4}	u_B	
30	1.326	0.1732	0.029K	11.5Pa	0.029	0.1592	1.336
60	1.200	0.3464				0.3143	1.240
120	1.701	0.6928				0.6262	1.813
180	1.864	1.0392				0.9381	2.007
240	0.875	1.3856				1.2493	1.525
300	1.363	1.7321				1.5600	2.012

表8 量程为 10-300mL/min 浮子流量计扩展不确定度

(单位: mL/min)

检定点	$u_{合成}$	U
30	1.336	3
60	1.240	3
120	1.813	4
180	2.007	4
240	1.525	3
300	2.012	4