

双量程孔板流量计不确定度及量程比

陈勇¹，马璐文¹，陈新亮¹，叶海青²，纪纲³，纪波峰³

(山东新和成药业有限公司，山东 潍坊 261108；杭州市质量技术监督检测院，浙江 杭州 310019；

上海同欣自动化仪表有限公司，上海 200070)

提 要 ISO 5167:2003 (E) 总结了二十世纪九十年代之后国际上标准差压装置的最新研究成果，在 ISO 5167:1991 (E) 的基础上作了多项重大改进，其中标准孔板的不确定度上升到 0.5%，是很了不起的。在流量二次装置中按照标准所提供的模型对流出系数 C 的非线性进行补偿，对可膨胀性系数 ϵ 的非线性进行补偿后，保证系统不确定度 1.5% (气体、蒸汽)，和 1.0% (液体) 的量程比可达 10:1。为了扩大量程比，可增加一台低量程差压变送器，以提高量程低段的差压测量精确度，进而提高量程低段的流量测量精确度，并在流量二次装置中实现量程切换和各项补偿，量程比可达 100:1，从而将差压法流量测量技术提高到一个新水平。文中通过特征点不确定度估算进行了论证，并通过了在流量标准装置上的验证。

关键词 双量程 孔板流量计 不确定度 量程比 估算 验证

中图分类号: TH814

文献标志码: B

Uncertainty and turndown ratio for dual range DP flowmeters

Chen Yong¹, Ma Luwen¹, Chen Xinliang¹, Ye Haiqing², Ji Gang³, Ji Bofeng³

(1.Shandong Xinhecheng pharmaceutical Co., Ltd., Weifang, 261108, China;

2.Hangzhou QTSI institute, Hangzhou, 310019, China;

3.Shanghai Tontion automation instrumentation Co., Ltd., shanghai, 200070,China)

Abstract: ISO 5167:2003 (E) summarized latest international research results of standard differential pressure devices after 1990's, many improvements were made on the basis of ISO 5167:1991 (E). The most significant one was uncertainty of orifice reached to 0.5%. According to the model provided by Standard, if we made a nonlinear compensation to Discharge coefficient: C_d and expandable coefficient ϵ in flow computer, the turndown ratio could be 10:1 which system uncertainty is 1.5% (for gas、steam), and 1.0% (for liquid). To increase turndown ratio, we add a low range DP transmitter, it improves DP measurement accuracy in low range, and improves flow measurement accuracy as well. We switch high/low range at flow computer and make compensation, and turndown ratio reaches 100:1, the DP flow measurement steps on a high level. We estimate the uncertainty at separate point and verify on flow standard device.

Key words: dual range; orifice flowmeter; uncertainty; turndown ratio; estimate; verification

0. 概述

双量程差压流量计已有三十多年的历史，早在二十世纪七十年代国外就有将一台差压装置配大小量程两台差压计，并用阀门切换，实现双量程测量。二十世纪八十年代，国内出现用一台可变测量范围差压变送器与差压装置配合实现双量程测量，高低量程的切换由带电接点的动圈指示仪自动完成，从而省去了人工切换^[1]。现在的双量程差压流量计是基于智能化的流量二次表，不仅能自动切换量程而且能对差压装置流量系数 C 的非线性、可膨胀性系数 ϵ 的非线性进行自动补偿^{[2][3]}，而差压变送器的精确度等级也已经不是以前的 $\pm 1\%$ ，而是 $\pm 0.065\%$ (最高达 $\pm 0.04\%$)。三十多年来差压装置的

研究也取得了进展，流出系数 C 和可膨胀性系数 ϵ 的模型精度有了显著提高^[4]，从而为差压式流量计系统不确定度的提高和量程比的拓宽创造了条件。

双量程差压流量计的本质是一台低量程差压流量计与一台高量程差压流量计经流量二次表实现无缝连接^[5]。它是在完全独立的两套差压流量计的基础上发展起来的。以前人们用一套量程较低的差压流量计与一套量程较高的差压流量计并联使用，并用两个阀门进行切换，用以扩大量程比，如图 1 所示。但是量程切换不方便，而且担心切断阀

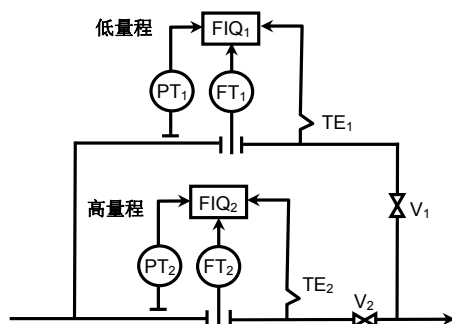


图1 两台流量计并联使用扩大量程比
关不死，引起测量误差。

也有人将两套差压式流量计串联安装在同一根管道上，用以扩大量程比，如图2所示，虽免除了切换阀的麻烦，但永久性压损成倍增大。

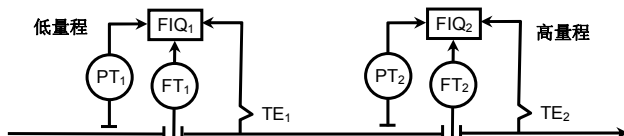


图2 用串联的两台流量计扩大量程比

除此之外，用完全独立的两套流量计完成一个测量任务，投资也大幅度增大。

新型的双量程差压流量计，用一台低量程差压变送器和一台高量程差压变送器与同一台差压装置配用，并用流量二次表自动切换量程，既节约了投资又解决了永久性压损增大问题。这种方法的意义是提高量程低段的流量测量精确度，扩大量程比。途径是提高流量量程低段的差压测量精确度。由于多方面的改进，新型双量程差压流量计的量程比比单一量程差压流量计量程比提高一个数量级，系统不确定度也有显著改善。

1. 新型双量程差压流量计的不确定度

新型双量程差压流量计的不确定度与被测流体的种类有关，而且同所配用的差压变送器精确度等级有关。

当所配用的差压变送器为0.065级或优于0.065级并且合理确定低量程上限时，系统不确定度和量程比为：

被测流体：液体

$\pm 1.0\%$ 读数值 3%~100% FS 区间

$\pm 1.0\%$ 低量程上限 1%~3% FS 区间

量程比：100:1

被测流体：气体、蒸汽

$\pm 1.5\%$ 读数值 3%~100% FS 区间

$\pm 1.0\%$ 低量程上限 1%~3% FS 区间

量程比：100:1

不确定度估算符合 GB/T2624-2006 和 GB/T 21446-2008。

低量程差压上限一般取高量程上限 FS 的 17.321%^{[5][6]}。这时低量程变送器差压上限值为高量程变送器的差压上限值 3%。开平方运算在差压变送器中完成。小信号切除点一般可取 1%FS，当被测流体为干气体时，可更小一些。低量程差压变送器和高量程差压变送器的输出与流量之间的应有关系如图3所示。

从图3中可看出，低量程差压变送器最小输出为 4.92mA，从数量级来看是个不小的数值。

图4所示为系统不确定度与相对流量的关系。

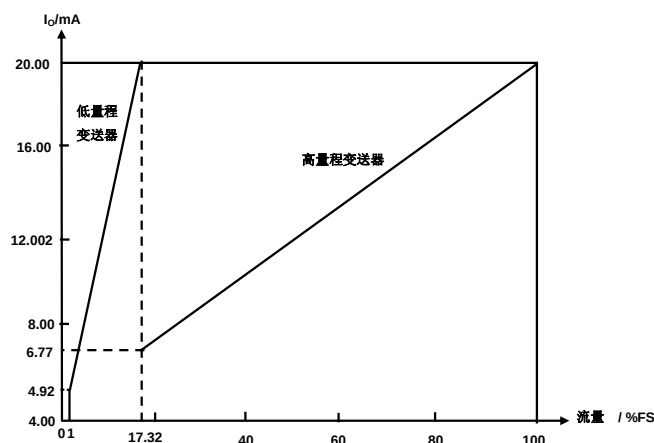


图3 变送器输出与流量的关系

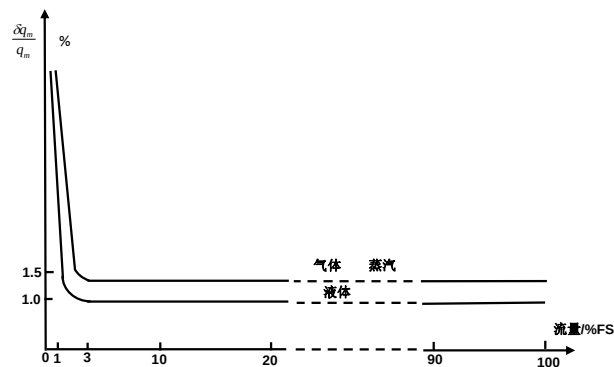


图4 系统不确定度与流量的关系

2. 特征点流程测量不确定度估算实例

测量结果不确定度估算是件难度很高的工作，理论性强，方法较多，较难掌握，但是，就一套具体的流量测量仪表来说，按照有关标准进行不确定度估算又不怎么难。

由于在一套仪表的整个测量范围内，不同的点所对应的不确定度是不同的，因此，不确定度又与量程比密切相关。

在双量程差压流量计中，如果选定低量程上限为 17.321%FS，则高量程段不确定度最差的点在 17.321%FS 处，如果该点的不确定度能达到预定的指标，则流量 > 17.321%FS 时系统不确定度只会优于预定的指标。同样的道理，在低量程段，3%FS

点具有与高量程段 17.321%FS 相同的特点。为此将 3%FS 点作为特征点估算系统不确定度。

另外, 量程下限也作为特征点计算其系统不确定度也是用户所关心的。

下面以参考文献[6]附录 D 中的已知条件为基础, 计算特征点的不确定度。

3. 双量程孔板流量计 3%FS 特征点不确定度估算 (实例)

3.1 已知条件^[6]

- ① 介质名称: 氧气
等熵指数 $\kappa = 1.461$
- ② 流量测量上限 $q_{m\max} = 33288 \text{ kg/h}$
常用流量 $q_m = 23302 \text{ kg/h}$
- ③ 管道内径 $D_{20} = 207 \text{ mm}$
孔板开孔直径 $d_{20} = 90.712 \text{ mm}$
直径比 $\beta = 0.4382224$
- ④ 差压上限 $\Delta p_{\max} = 60 \text{ kPa}$
差压变送器准确度等级: $\xi_{\Delta p} = 0.065\%$
- ⑤ 压力变送器测量上限 $p_{\max} = 4 \text{ MPa}$
压力变送器准确度等级 $\xi_p = 0.065\%$
常用压力 $p_1 = 3.5 \text{ MPa G}$
当地平均大气压 $P_a = 89.04 \text{ kPa}$
- ⑥ 温度传感器准确度等级: B 级
常用温度: $t_1 = 37^\circ\text{C}$
- ⑦ 高低量程分段
低量程: $0 \sim 1.8 \text{ kPa}$ 对应 $0 \sim 5765.7 \text{ kg/h}$ (变送器为 3051CD)
高量程: $0 \sim 60 \text{ kPa}$ 对应 $0 \sim 33288 \text{ kg/h}$
即低量程差压上限 $\Delta p'_{\max} = 1.8 \text{ kPa}$
低量程流量测量上限 $q'_{m\max} = 5765.7 \text{ kg/h}$

3.2 不确定度计算所依据的标准和公式

① 所依据的标准

ISO5167: 2003 (E) 和 GB/T 2624-2006 及 GB/T 21446-2008

② 所依据的公式^{[7][8]}

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \left[\left(\frac{\delta C}{C} \right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta Z_1}{Z_1} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta T_1}{T_1} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta P_1}{P_1} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

式中: $\frac{\delta q_m}{q_m}$ —— 流量测量不确定度;

$\frac{\delta C}{C}$ —— 流出系数不确定度;

$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}$ —— 可膨胀性系数不确定度;

$\frac{\delta D}{D}$ —— 管道内径不确定度;

$\frac{\delta d}{d}$ —— 孔板开孔直径不确定度;

$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$ —— 差压测量不确定度;

$\frac{\delta Z_1}{Z_1}$ —— 孔板正端取压口处气体压缩系数不确定度;

$\frac{\delta T_1}{T_1}$ —— 孔板正端取压口处气体热力学温度测量不确定度;

$\frac{\delta P_1}{P_1}$ —— 孔板正端取压口处气体压力测量不确定度。

3.3 各因子数值的计算

(1) 流出系数不确定度 $\frac{\delta C}{C}$ 的计算

按照 GB/T 2624, 本例中 β 在 $0.2 \leq \beta \leq 0.6$ 区间, 所以

$$\frac{\delta C}{C} = 0.5\% \quad (2)$$

(2) 可膨胀性系数不确定度 $\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}$ 的计算

按照 GB/T 2624, 用下式计算:

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = 3.5 \frac{\Delta p}{\kappa P_1} \% \quad (3)$$

式中: Δp —— 常用流量时的差压, kPa;

P_1 —— 节流件正端取压口处常用压力, kPa;

κ —— 等熵指数。

从已知条件知:

$$p_1 = 3500 \text{ kPa (表压力)} \quad (4)$$

$$\kappa = 1.461 \quad (5)$$

$$\text{因为 } \Delta p = \left(\frac{q'_m}{q_{m\max}} \right)^2 \Delta p_{\max} \quad (6)$$

$$= \left(\frac{0.03 \times 33288}{33288} \right)^2 \times 60$$

$$= 0.054 \text{ kPa}$$

将式 (4) (5) (6) 的值代入式 (3) 得

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = 3.5 \frac{0.054}{1.461(3500 + 89.04)} \% = 0.000036\% \quad (7)$$

予以忽略。

(3) 管道内径不确定度 $\frac{\delta D}{D}$ 的确定

本例中, 20℃条件下的 D 应为 207mm, 因管道内壁经精密加工, 内径误差控制在 $\pm 0.02\text{mm}$ 范围内, 即

$$\frac{\delta D}{D} \leq 0.01\% \quad (8)$$

对 $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 的贡献太小, 予以忽略。

(4) 孔板开孔直径不确定度 $\frac{\delta d}{d}$ 的确定

本例中, 20℃条件下的 d 应为 90.662mm, 因孔板开孔直径经精密加工, d_{20} 误差控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 范围内, 即

$$\frac{\delta d}{d} \leq 0.012\%$$

对 $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 的贡献太小, 予以忽略。

(5) 差压测量不确定度 $\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$ 的计算

根据 GB/T 21446-2008 的规定, $\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$ 用式 (9) 估算:

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = \frac{2}{3} \xi_{\Delta p} \cdot \frac{\Delta p'_{\max}}{\Delta p} \quad (9)$$

式中: $\xi_{\Delta p}$ —— 差压变送器准确度等级;

$\Delta p'_{\max}$ —— 低量程差压上限, kPa;

Δp —— 特征点流量对应的差压, kPa;

因 $\xi_{\Delta p} = 0.065\%$

$$\Delta p'_{\max} = 1.8 \text{ kPa}$$

$$\Delta p = 0.054 \text{ kPa}$$

代入式 (9) 得

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = 1.44\% \quad (10)$$

(6) 压缩系数不确定度 $\frac{\delta Z_1}{Z_1}$ 的计算

本例中因被测流体为永久性气体, 在常用温度和常用压力条件下的压缩系数 Z_1 与标准状态条件下压缩 Z_n 近似相等, 不确定度忽略, 即

$$\frac{\delta Z_1}{Z_1} = 0 \quad (11)$$

(7) 温度测量不确定度 $\frac{\delta T_1}{T_1}$ 的计算

被测气体在操作条件下的热力学温度测量的不确定度, 其值按温度测量误差限与 T_1 之比值的 2/3 估算。

因温度传感器 (B 级铂热电阻) 在常用温度条件下的误差限为^[10]

$$\Delta T_1 = (0.30 + 0.005 |t_1|) \quad (12)$$

因为 $t_1 = 37^\circ\text{C}$

所以 $\Delta T_1 = 0.485\text{K}$

因为 $T_1 = 273.15 + t_1 \quad (13)$

$$= 310.15\text{K}$$

所以 $\frac{\delta T_1}{T_1} = \frac{2}{3} \frac{\Delta T_1}{T_1} \quad (14)$

$$= 0.1\%$$

(8) 压力测量不确定度 $\frac{\delta P_1}{P_1}$ 的计算

被测气体在操作条件下节流件正端取压口绝对压力测量的不确定度, 其值用式 (15) 估算:

$$\frac{\delta P_1}{P_1} = \frac{2}{3} \xi_p \frac{P_k}{P_1} \quad (15)$$

式中: ξ_p —— 压力变送器准确度等级

($\xi_p = \xi_p P_k / P_k$);

P_k —— 压力变送器上限对应的绝对压力 ($P_k = p_k + P_a$), kPa;

P_1 —— 常用绝对压力 ($P_1 = p_1 + P_a$), kPa。

因本例中:

$$\xi_p = 0.065\%$$

$$p_k = 4.0 \text{ MPa}$$

$$p_1 = 3.5 \text{ MPa}$$

代入式 (15) 得

$$\begin{aligned} \frac{\delta P_1}{P_1} &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\xi_p P_k}{p_k + P_a} \cdot \left(\frac{p_k + P_a}{p_1 + P_a} \right) \quad (16) \\ &= \frac{2}{3} \cdot \frac{0.00065 \times 4000}{4000 + 89.04} \times \frac{4000 + 89.04}{3500 + 89.04} = 0.048\% \end{aligned}$$

3.4 计算 $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 的值

将式 (2) (7) (10) (14) 和 (16) 的值代入式 (1) 得:

$$\begin{aligned} \frac{\delta q_m}{q_m} &= \left(0.5^2 + \frac{1}{4} \times 1.44^2 + \frac{1}{4} \times 0.10^2 + \frac{1}{4} \times 0.048^2 \right)^{0.5} \% \quad (17) \\ &= 0.88 \% \end{aligned}$$

3.5 二次表显示值的不确定度 $\delta q_m' / q_m$ 计算

式(17)为二次表之外的系统不确定度。

因为二次表在温度压力信号输入通道分别输入常用温度和常用压力标准信号,差压信号输入通道输入常用流量对应的差压标准信号时,二次表的流量显示值相对误差不会大于0.2%,所以整个系统的不确定度为:

$$\frac{\delta q_m'}{q_m} = \left[\left(\frac{\delta q_m}{q_m} \right)^2 + 0.2\%^2 \right]^{0.5}$$

$$= 0.9\%$$

3.6 在流量标准装置上的验证

DN200 双量程孔板流量计一套,在上海自动化仪表研究院静态容积法水流量标准装置上验证,标准装置不确定度0.05%,验证点6个,在被校表安装后做一次调零,然后不做任何调整,各试验点误差如下:

试验点%FS	3	12.5	30	40	70	100
被试表示值 kg/h	8819	34368	83083	110770	200820	274388
标准器示值 kg/h	8824	34262	82873	110469	200192	272836
误差%	-0.06	0.31	0.25	0.28	0.32	0.57

允许误差: ±1.0%

最大误差: 0.57%

试验日期: 2013 年 1 月 6 日

3.7 结论

① 本流量测量系统在满量程流量 3%这个特征点处的不确定度为 0.9%,优于差压式气体流量计的预定指标 1.5%。

② 在流量标准装置上验证结果表明,计算结果是正确的,而且在 3%~100%范围之内,实际误差也都大大小于规定的技术指标。

4. 结束语

① 新型双量程差压式流量计,由于引入了一台低量程差压变送器和具有双量程演算功能的二次表,使一台差压式流量计变成高低量程两台差压式流量计,从而大大提高了量程低段的流量测量精确度。

② 单一量程差压流量计,在引入流出系数 C 非线性补偿和可膨胀性系数 ε 非线性补偿,并配以高精度差压变送器后,量程比可达 10:1。而典型的双量程差压流量计在采用这些技术的基础上,由于量程低段差压测量精确度提高了 33 倍,因而使量程低段的系统精确度大幅度提高,从而使量程比提高了一个数量级。

③ ISA 1932 喷嘴的不确定度可达 0.8%^[7],比标准孔板略差。但从上面的估算中可发现,确定不确定度指标中还留有余地,因此,用 ISA 1932 喷嘴组成的双量程差压流量计,也能达到 100:1 的量程

比。

④ 应用此项技术组成的双量程差压流量计,再采用一体化结构,清除了差压信号传递失真,从而使系统精确度有了保证。经在流量标准装置上验证,上面的估算结果是正确的。

⑤ 流量显示装置采用 HART 通讯的方法去两台差压变送器和一台压力变送器读取测量值,不仅杜绝 D/A 及 A/D 转换引入的误差,使系统精确度更有保证,而且可节省信号电缆。

参考文献

1. 纪纲, 张延华, 郭绮就. 双量程差压式流量测量系统[G]//机械工业部工业自动化仪表科技情报网流量专业网, 中国仪器仪表学会过程检测仪表学会流量专业委员会. 流量测量和能源管理经验汇编. 重庆, 1982: 6-8~6-17.
2. 王建忠, 纪纲. 差压流量计范围问题研究[J]. 自动化仪表, 2005, 26(8): 7~9.
3. 王建忠, 纪纲. 节流式差压计为何仍有优势[J]. 自动化仪表, 2006, 27(7): 63~66.
4. 孙延祚. 国际标准 ISO 5167:2003(E) 的主要变化及应采取的应对办法[J]. 中国计量, 2004(7): 38~41.
5. 程建三, 纪纲. 双量程差压流量计的新进展[J]. 石油化工自动化, 2009, 45(2):54~57.
6. 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, 2012:264~268.
7. 上海工业自动化仪表研究所. 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. 中石油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.
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 .211~214.
10. 上海工业自动化仪表研究所. JB/T 8622-1997 工业铂热电阻技术条件及分度表[S]. 北京: 机械工业出版社, 1997.

刊登在《石油化工自动化》2013,49(5):52-56