一体化仪表

一体化标准差压流量计不确定度估算实例

Examples of Estimating Uncertainty of Integrated Differential Pressure Flowmeter

文_纪波峰 纪纲 上海同欣自动化仪表有限公司

一体化差压流量计是将差压装置、差压变送器、压力变送器（如果必须）等，在制造厂组合在一起。本文是以GB/2624-2006[2]和GB/21446-2008[3]为依据，对系统不确定度进行实例估算。因一体化导压管短，误差可最小，本文计算数据显示在流量测量范围各特征点的不确定度是不同的，所以对于一种型式的差压流量计，在承诺不确定度的同时，应注明该不确定度所对应的量程比，希望引起同行对此予以关注。

概述

标准孔板是标准差压流量计中精确度最高的，按照理论与实际的检定结果，通常认为，用来测量气体和蒸汽时能得到1.5%的系统不确定度，但是确切的不确定度计算，与下列具体的传感器、变送器的精度等级、测量范围等有关。

- 孔板开孔直径的实际误差；
- 管道内径的实际误差；
- 差压变送器精度等级与差压测量范围；
- 压力变送器精度等级与压力测量范围；
- 温度传感器精度等级与常用温度值；
- 流量测量量程比；
- 差压装置直径比等。

所以，具体的一套流量计，在被测流量为不同值时，能得到的系统不确定度是不同的。

笔者在参考文献[1]列举了一台DN200氧气流量计的不确定度估算实例，本文应编辑部的建议，将此段内容予以摘录，并增加流量满量程、各特征点流量的不确定度估算结果。然后绘制了不确定度与流量之间的关系曲线。

各特征点流量的不确定度估算结果

参照常用流量时的估算方法，对特征点不确定度进行估算，结果如下：

① 100%FS时的估算结果（式中FS为流量满量程值，下同）

$$\frac{\delta \triangle P}{\triangle P} = 0.043\%$$

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = 0.50\%$$

② 70%FS时的估算结果（估算步骤见本文第5节）

$$\frac{\delta \triangle P}{\triangle P} = 0.088\%$$

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = 0.51\%$$

③ 17.32%FS时估算结果

$$\frac{\delta \triangle P}{\triangle P} = 1.444\%$$

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = 0.88\%$$

④ 3%FS时估算结果

按笔者经验，差压式流量计如果只配一台差压变送器，系统不确定度是极差的，本实例中是除了一台高量程差压变送器之外，另配一台低量程差压变送器，组成双量程差压流量计[6][7]，3%FS流量点起作用的是低量程差压变送器，因变送器选的是3051CD–，所以$\frac{\delta \triangle P}{\triangle P}$与17.32%FS时具有近似相同的估算结果。即：

$$\frac{\delta \triangle P}{\triangle P} = 1.444\%$$

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = 0.88\%$$

⑤ 1%FS时估算结果

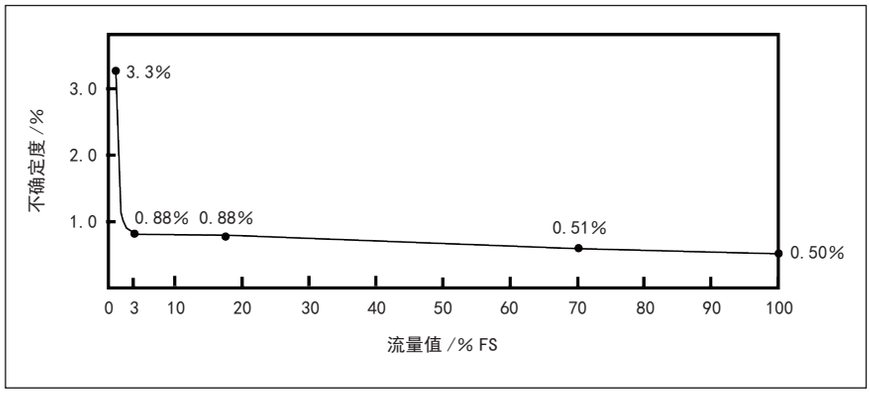
流量为1%FS时，差压值已很靠近零位，因为零位的误差限是基本允许误差的一半，所以在计算$\frac{\delta \triangle P}{\triangle P}$时，$\xi_{\Delta P}$取0.065/2。

$$\frac{\delta \triangle P}{\triangle P} = 6.5\%$$

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = 3.3\%$$

说明

① 上述各项计算是在流量演算器中完成的，因为计算是数字量运算，所以计算本身不引入误差，但是差压、压力、温度信号输入通道的A/D转换要引入误差，采用HART通信的方法将这些信号送入流量演算器，就消除了信号输入通道引入的误差。温度信号也可用电阻信号传送，流量演算器输入通道误差忽略。



② 本实例计算的是双量程孔板流量计，如果不设低量程差压变送器，则在（3~17.32）%FS区间，不确定度就要大大增大，在10%FS时，不确定度约为1.5%，这时，量程比只能做到10:1。

不确定度曲线

将上述计算结果填入平面坐标系，就得到系统不确定度随流量变化曲线。

文献[1]中的孔板流量计系统不确定度估算实例

■ 已知条件

① 介质名称：氧气；

② 流量测量上限：

q_{mmax}=33288 kg/h；

常用流量：q_m= 23302 kg/h；

③ 管道内径：D_{20} = 207mm；

孔板开孔直径：d_{20} = 90.712mm；

直径比：β = 0.4382224；

④ 差压上限：Δp_{max} = 60kPa；

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} = 4MPa；

压力变送器准确度等级：

ξ_p = 0.065%；

常用压力：p_1 = 3.5 MPa G；

当地平均大气压：P_a = 89.04 kPa；

⑥ 温度传感器准确度等级：B级；

常用温度：t_1=37℃。

■ 不确定度计算所依据的标准和公式

① 所依据的标准

ISO 5167：2003（E）和GB/T 2624–2006及GB/T 21446–2008。

② 所依据的公式[2] [3]

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

式（1）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。

■ 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 $0.2 \leqslant \beta \leqslant 0.6$区间，所以：

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

（2）可膨胀性系数不确定度的计算

按照GB/T 2624，用式（3）计算：

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

式（3）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。

从孔板计算书（见附件）知：

p_1 = 3500 kPa（表压力） (4)

κ = 1.461 (5)

因为：

$$\Delta p = \left(\frac{q_m}{q_{m\,max}}\right)^2 \Delta p_{max} = \left(\frac{23302}{33288}\right)^2 \times 60 = 29.401\text{kPa} \quad (6)$$

将式（4）（5）（6）的值代入式（3）得：

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = 3.5\frac{29.401}{1.461(3500+89.04)}\% = 0.02\% \quad (7)$$

（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±0.02mm范围内，即

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

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±0.01mm范围内，即：

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

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：

$$\frac{\delta\Delta p}{\Delta p} = \frac{2}{3}\zeta_{\Delta p} \times \frac{\Delta p_{max}}{\Delta p} \quad (9)$$

式（9）中：

$\xi_{\Delta P}$—— 差压变送器准确度等级；

Δp_{max}—— 差压上限，kPa；

Δp——常用流量对应的差压，kPa；

因为：

$\xi_{\Delta P}$= 0.065%

Δp_{max}= 60 kPa

Δp = 29.401 kPa

代入式（9）得：

$$\frac{\delta\Delta p}{\Delta p} = 0.088\% \qquad (10)$$

（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：

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

（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[5]：

$$\triangle T_1 = 0.485K \qquad (12)$$

因为：t_1=37℃

所以：ΔT_1 = 0.485K

因为：

$$T_1 = 273.15+t_1 = 310.15K \qquad (13)$$

所以：

$$\frac{\delta T_1}{T_1} = \frac{2}{3}\frac{\triangle T_1}{T_1} = 0.1\% \qquad (14)$$

（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：

$$\frac{\delta P_1}{P_1} = \frac{2}{3}\zeta_P\frac{P_k}{P_1} \qquad (15)$$

式（15）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（$P_1 = p_1 + P_a$），kPa。

因本例中：

ξ_P= 0.065%

p_k = 4.0MPa

p_1 = 3.5MPa

代入式（15）得：

$$\frac{\delta P_1}{P} = \frac{2}{3}\times\frac{\zeta_p p_k}{p_k+P_a}\times\left(\frac{p_k+p_a}{p_1+p_a}\right) = \frac{2}{3}\times\frac{0.00065\times4000}{4000+89.04}\times\frac{4000+89.04}{3500+89.04} = 0.048\% \qquad (16)$$

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：

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \left(0.5^2+0.02^2+\frac{1}{4}\times0.088^2+\frac{1}{4}\times0.10^2+\frac{1}{4}\times0.048^2\right)^{0.5}\% = 0.51\% \qquad (17)$$

IWM

一体化节流式流量计设计计算书

订货单位：宁夏某能源集团公司　　设计单编号：100404
合同号：　　产品串号：100404
联系电话：　　安装地点所在城市：宁夏
联系人：　　设计标准：GB/T 2624-2006

流体名称	氧气	安装方式	孔板 / 水平
常用（表面）压力 P_1	3.50MPa	管道内径 D_{20}	207.00mm
常用温度 t	37℃	管道外径	219.00mm
刻度流量 q_{mmax}	33288kg/h	管道材质	304SS
常用流量 q_{mcom}	23302kg/h	管道状况	光管
最小流量 q_{mmin}	612.499kg/h	管道线膨胀系数 λ_D	0.000016℃ $^{-1}$
介质密度 ρ_1	45.49000kg/m^3	节流件线膨胀系数 λ_d	0.000016℃ $^{-1}$
介质粘度 μ	0.00002089Pa·s	节流件材质	304SS
等熵指数 κ	1.4610	最大压损	47.487kPa
介质湿度 φ	0	安装地点平均大气压	89.04kPa
计算结果			
D_{20} 实测数	207.00mm	常用雷诺数 ReDcom	1905346.288
节流件开孔直径 d_{20}	90.71205mm	误差校核 δ	0.0000000000
直径比 β	0.4382224	粗糙度修正系数	1.00000
流出系数 C	0.601871588	差压计精确度等级	0.065
差压上限Δ P_{max}	60000Pa	压力变送器精确度等级	0.065
可膨胀性系数 ε_1	0.99796927	系统不确定度	1.50%
前直管长 L_1	3.79m	后直管长 L_2	1.04m

雷诺数补偿折线表

q_{f0}	000000	kg/h	$k\alpha_0$	1.00320	q_{f5}	009321	kg/h	$k\alpha_5$	1.00037
q_{f1}	001165	kg/h	$k\alpha_1$	1.00320	q_{f6}	011651	kg/h	$k\alpha_6$	1.00026
q_{f2}	002330	kg/h	$k\alpha_2$	1.00175	q_{f7}	016311	kg/h	$k\alpha_7$	1.00012
q_{f3}	004660	kg/h	$k\alpha_3$	1.00089	q_{f8}	023302	kg/h	$k\alpha_8$	1.00000
q_{f4}	006991	kg/h	$k\alpha_4$	1.00055	q_{f9}	034953	kg/h	$k\alpha_9$	0.99990

低量程：0~1.8kPa 对应 0~4330Nm^3/h　　高量程：4330~25000Nm^3/h
操作员：姜璐　　计算日期：2010-04-02

本文参考资料

[1]纪纲，纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦. 北京：化学工业出版社，2012，264-268

[2]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

[3] GB/T 21446-2008 用标准孔板流量计测量天然气流量

[4]纪纲. 流量测量仪表应用技巧. 北京：化学工业出版社，211-214

[5] JB/T 8622-1997 工业铂热电阻技术条件及分度表

[6]陈勇，马璐文，陈新亮，叶海青，纪纲，纪波峰. 双量程孔板流量计不确定度及量程比. 石油化工自动化，2013(5)：52-56

[7]魏峰，谢林，纪波峰，陈杰，纪纲. 双量程差压流量计不确定度和量程比的验证. 石油化工自动化，2013(6)：54-57

本文参与有奖征文评选

欢迎您对本文发表评论，也希望您能参加“台湾捷流®杯”有奖征文评选活动，期待您的来稿！

评论和投稿请发送至：

vum@jixunmedia.com