

孔板流量计扩大范围度的一种方法

纪 纲 (上海宝科自动化仪表研究所 200940)

摘 要: 应用智能流量二次表实现流量系数修正和流束膨胀系数修正, 提高精度, 扩大范围度。并给出计算实例。

关键词: 孔板流量计 范围度 流量系数修正

差压式流量计是目前应用最广泛的流量仪表, 具有结构简单, 制造容易, 安装使用和维护都很方便, 可靠性高的优点。它有悠久的历史 and 可靠的实验数据, 只要按照国家标准计算、加工制造, 标准节流装置无需进行实流标定, 就能得到较高的测量精度。

但是, 由于节流装置输出的差压信号, 经开方后才与流量成正比关系以及流出系数受雷诺数等因数影响, 使得流量测量范围度的提高受到制约。因而扩大孔板流量计的范围度就成了不少研究者的研究内容。

一、历史状况

在孔板流量计中, 流量与自变量之间的关系可用下式表示:

式中:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2\Delta p} \cdot \sqrt{\rho_1} \quad (1)$$

q_m ——流体的质量流量;

C ——流出系数;

β ——孔板开孔直径与管道内径之比;

ε ——流束膨胀系数;

d ——孔板开孔直径;

ΔP ——差压;

ρ_1 ——节流装置入口端流体密度

在这个式子中, d 和 β 都是确定值。在测量过程中, ρ_1 可能有变化, 可以通过密度补偿的方法进行精确的修正。如果 C 和 ε 也是常数, 则孔板的输出信号差压 ΔP 就能精确地代表流量 q_m 。

差压要由差压计测量, 早期的差压计是机械式(准确度一般可达 1.5%)和气动式(准确度一般为 1%), 精度都不高。而且因为差压信号的平方根才与流量成正比关系。以精确度为 1.0% 的差压计进行分析, 在流量为 30%F.S 时, 差压值只为差压上限的 9%, 按 GB/T 2624-81 中不确定度估算方法可知, 该测量点差压测量的不确定度为流量测量值的 3.7%, 即

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = \frac{1}{3} \cdot \zeta \cdot \frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P} = \frac{1}{3} \cdot 1.0\% \cdot \frac{100\%}{9\%} = 3.7\% \quad (2)$$

式中: ζ ——精度等级

显然, 信号小于 30% 时, 不确定度更大, 不宜使用。

实际上, 在式(1)中, C 和 ε 也并非常数, 对于流体为气体和蒸汽而言, C 和 ε 是随着流

量的不同而变化的,在下面的举例中,列出了各个流量相对值所对应的 C 和ε值(见表 1)。

在传统的孔板流量计中,要对 C 和ε进行修正是件困难的事,为了减小 C 的影响,常常采用下面的措施:

- a. 将差压上限 $\Delta P_{\max}$ 尽可能取得大一些,从而使β小一些。
- b. 缩小管径,提高流速,从而使节流装置在较高雷诺数条件下使用。
- c. 限制流量计的使用下限(结合差压计精度的约束条件,一般测量下限不低于 25%F.S),因为流量越低,雷诺数越小, C 与常用流出系数 C_{com} 的差异越大。在早期的一些文献中①,由于 C 的在线修正难以实施,所以在设计节流装置时设法将流量测量下限对应的 C 和 C_{com} 之间的偏差规定为不大于 0.5%②,这样就产生了老版本节流装置设计手册中的 $m=f(\text{Re}D)$ 界限雷诺数图表①。

至于ε修正,修正公式早已趋于完善,但在机械式差压计和其他模拟仪表中,要实施这种补偿,却是极其困难的。

二、新的进展

1. 差压计精度得到大幅度提高

自从微机技术引入仪表后,孔板流量计的技术水平得到了新的提高,例如美国霍尼威尔公司和日本山武-霍尼威尔公司生产的 ST 3000 智能差压变送器,具有 0.1 级的精度,而且开平方后,仍能保持 0.1 级的精度,因为开平方运算是由差压变送器中的单片机完成的。按式(2)的计算方法,在流量为 10%F.S 时,其差压测量的不确定度为流量测量值的 3.3%,即

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = \frac{1}{3} \cdot \zeta \cdot \frac{\Delta p_{\max}}{\Delta p} = \frac{1}{3} \cdot 0.1\% \cdot \frac{100\%}{1\%} = 3.3\%$$

2. 引入完善的修正技术

1) 流出系数 C 的修正

为了保证 10%FS 流量测量点的测量精度,还必须将流量公式中当作常数而实际上有一些变化的因素予以修正。国家标准 G B / T 2624—93《流量测量节流装置用孔板、喷嘴和文丘里管测量充满圆管的流体流量》为流出系数 C 的修正提供了实用的方法。在下面的例子中,在整个流量测量范围内选 10 个典型测量点 Q_n ,并计算出各点的雷诺数,查表得到各点的 C 值,然后用式(3)计算出各点 C 的修正系数 $K\alpha$ 。

$$K\alpha = \frac{C_n}{C_o} \quad (3)$$

式中: C_n —— 各典型测量点流出系数;

C_o —— 流量计满度流出系数。

然后将两组数据填入 FC 6000 型智能流量演算器的菜单第 55~74 项,由计算机完成修正,对于 $Q_1 \sim Q_{10}$ 之外的各点,采用线性内插法得到 $K\alpha$ 。

2) ε的修正

ε的修正在计算机中也是举手之劳。在 FC6000 型智能仪表中,根据 ISO 5167 规定,

$$\varepsilon = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \cdot \frac{\Delta P}{P_1} \cdot \frac{1}{\chi} \quad (4)$$

三种取压方式的 ε 计算采用式(4)。

式中： ΔP —— 当前孔板输出差压；

P_1 —— 孔板入口端流体压力；

χ —— (气体)流体等熵指数。

并由此计算结果进而按式(5)得到流束膨胀系数修正系数 K_ε 。

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_d} \quad (5)$$

式中： ε_d —— 设计状态气体流束膨胀系数。

具体操作时，将 β 、 $\Delta P_{\max}$ 、 P_1 、 χ 和 ε_d 填入菜单，通过面板操作写入 FC 6000 的内存中，仪表每一个采样周期将采得的差压信号(相对值)与 $\Delta P_{\max}$ 相乘得到 ΔP ，进而计算出 ε 和 K_ε ，并在副数据第 09 项中显示出来。下面举例中的 K_ε 就是从 FC 6000 中调出的数据。

3) 密度 ρ_1 的修正

在被测流体为气体或蒸汽时， ρ_1 的修正是极为重要的。

在 FC 6000 中，水蒸汽的密度是将密度表装入内存，通过查表可以准确地得到 ρ_1 值，对于差压式流量计，按式(6)进行密度修正。

$$K_\rho = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_d}} \quad (6)$$

式中：

K_ρ —— 密度修正系数；

ρ_d —— 设计状态介质密度。

FC 6000 计算得到的值在副数据第 06 项中显示。

4) 压缩系数 z 的修正

对于一般气体来说， z 有时不为 1，所以 FC 6000 中引入了 z 的修正。

三、流量测量总不确定度的讨论

孔板流量计的总不确定度，GB/T 2624-93 推荐采用下式估算：

$$\begin{aligned} \frac{\delta q_m}{q_m} = & \left[\left(\frac{\delta C}{C} \right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right) \cdot \left(\frac{\delta d}{D} \right) + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \cdot \left(\frac{\delta d}{d} \right)^2 \right. \\ & \left. + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \Delta P}{\Delta P} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \cdot \rho_1}{\rho_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (7)$$

1. 式(7)中的第一项是流出系数引入的不确定度估算。由于 C 已进行雷诺数修正，所以按照 GB/T 2624-93 规定，取 $\delta C / C = \pm 0.6\%$

2. 第二项为 ε 不确定度影响估算，由于 ε 已进行在线修正，故 $\delta\varepsilon/\varepsilon$ 忽略不计。

3. 第三项为管道内径实际尺寸偏离设计值引入的不确定度估算，由于前后直管管道内

壁经镗削加工，故管径误差忽略不计。

4. 第六项是流体密度偏离设计值引入的不确定度估算。由于 ρ_1 已进行在线补偿，而且补偿精度较高，故此项也可忽略不计。

5. 第四项是孔板开孔直径尺寸偏离设计值引入的不确定度估算。根据有关标准，取 $\delta d/d=\pm 0.07\%$ ，当 $\beta=0.5$ 时，第四项为 $(0.15\%)^2$ 。

6. 第五项是差压变送器引入的不确定度估算。在 10% F.S 测量点，按前面的计算所以

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \pm \left[(0.6\%)^2 + (0.15\%)^2 + (3.3\%)^2 \right]^{1/2} \\ = \pm 3.36\%$$

换算到引用误差即为 $\pm 0.336\% \text{ F.S.}$

7. 除了上述各项之外，还得考虑流量二次表的不确定度。根据上海宝科自动化仪表研究所说明书，FC 6000 型智能流量演算器误差限为 $\pm 0.2\% \text{ F.S.}$ ，按几何和误差合成方法计算系统不确定度为：

$$e = \pm \left[(0.336\%)^2 + (0.2\%)^2 \right]^{1/2} \text{ F.S.} = \pm 0.39\% \text{ F.S.}$$

显然，这样大的不确定度是可以接受的。

四、设计举例

1. 已知条件

- (1) 被测流体名称：空气；
- (2) 最大流量： $q_{m\max}=0.334722222 \text{ kg/s}$ ($=1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$)；
- (3) 最小流量： $q_{m\min} = 0.033472222 \text{ kg/s}$ ($=100 \text{ Nm}^3/\text{h}$)；
- (4) 工作压力： $P_1 = 4 \times 10^4 \text{ Pa}$ ；
- (5) 工作温度： $t_1=40^\circ\text{C}$ ；
- (6) 工作状态下被测流体相对湿度： $\varphi=0\%$ ；
- (7) 当地大气压： $P_A=101.325 \text{ kPa}$ ；
- (8) 标准状态温度： $t_n=20^\circ\text{C}$ ；
- (9) 标准状态下流体密度： $\rho_n=1.205 \text{ kg/m}^3$ ；
- (10) 20°C 时管道内径： $D_{20}=0.207\text{m}$ ；
- (11) 管道材质：20[#] 钢；
- (12) 差压计差压上限： $\Delta P_{\max}=2.5 \times 10^3 \text{ Pa}$ ；
- (13) 节流装置的取压方式：角接取压；
- (14) 管道材质的线膨胀系数： $\lambda_D=11 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$ ； (表 G-8) ^[4]
- (15) 孔板材质的线膨胀系数： $\lambda_d=16 \times 10^{-8} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$ ；

2. 求孔板开孔直径 d

- (1) 工作状态下管道内径：

$$D = D_{20} [1 + \lambda_D (t_1 - 20)]$$

$$= 0.207[1 + 11 \cdot 10^6(40 - 20)] = 0.20704554m;$$

(2) 工作状态下空气的黏度: $\mu = 19 \times 10^{-6}$

(3) 工作状态下空气的密度:

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \rho_n \cdot \frac{(101.325 + 40) \cdot (273 + 20)}{101.325 \cdot (273 + 40)} \\ &= 1.573304234 \text{ kg / m}^3\end{aligned}$$

(4) 工作状态下空气的等熵指数: $\chi = 1.40$

(5) 求最大流量条件下 (与 D 有关的) 雷诺数:

$$\begin{aligned}R_{eD} &= \frac{4 \cdot q_{\max}}{\pi D \cdot \mu} \\ &= \frac{4 \cdot 0.334722222}{\pi \cdot 0.20704554 \cdot 19 \cdot 10^{-6}} = 108337\end{aligned}\quad (8)$$

(6) 求 A_2 值:

$$\begin{aligned}A_2 &= \frac{\mu \cdot R_{eD}}{D_{20} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P_{\max} \cdot \rho_1}} \\ &= \frac{19 \cdot 10^{-6} \cdot 108337}{0.207 \cdot \sqrt{2 \cdot 2500 \cdot 1.573304234}} \\ &= 0.112116286\end{aligned}$$

(7) 设: $C_{\text{con}} = 0.6060$

(8) 据

$$\begin{aligned}X_n &= \frac{A_2}{C_{(n-1)} \cdot \varepsilon_{(n-1)}} \\ \beta_n &= [X_n^2 / (1 + X_n^2)]^{0.25} \\ \varepsilon_n &= 1 - (0.41 + 0.35\beta_n^4) \cdot \frac{\Delta P}{\chi \cdot P_1}\end{aligned}\quad (9)$$

$$\begin{aligned}C_n &= 0.5959 + 0.0312\beta_n^{2.1} - 0.1840\beta_n^8 \\ &\quad + 0.0029\beta_n^{2.5} \cdot (10^6 / R_{eD})^{0.75} \\ &\quad + 0.0900 \cdot L_1 \cdot \beta_n^4 \cdot (1 - \beta_n^4)^{-1} - 0.0337 \cdot L_2 \cdot \beta_n^3\end{aligned}\quad (10)$$

因为采用角接取压, 所以上式中 $L_1 = L_2 = 0$

$$\delta = A_2 - X_n \cdot C_n \cdot \varepsilon$$

从 $n=3$ 起求 X_n

精确度判断公式 $En = \delta_n / A_2$

判别条件 $|En| \leq 5 \times 10^{-10}$

(上述 n 为 0, 1, 2, 3, 4…… n)

用迭代法求 x_n ; β_n ; C_n ; δ_n ; E_n ;

在精确度足够后, 得到

$$\begin{aligned}\beta &= 0.397173707 \\ \varepsilon &= 0.99470939\end{aligned}\quad (11)$$

$$C = 0.601800403$$

(9) 求 d :

$$d = D \cdot \beta = 82.23304464 \text{ (mm)}$$

(10) 求 d_{20} :

$$d_{20} = \frac{d}{1 + \lambda(t - 20)} = \frac{82.23304464}{1 + 0.000016(40 - 20)} = 82.21 \text{ (mm)}$$

3. 求各典型测量点流出系数修正系数 $K\alpha$ 和膨胀系数修正系数 $K\varepsilon$

1) 按式(8)计算各典型测量点雷诺数。计算结果列于表 1。

2) 按式(11)中的 β 值和各典型测量点雷诺数, 分别代入式(10), 得到各点 C 。并按式(3)计算 $K\alpha$, 列于表 1。

3) 将各典型测量点对应的差压 ΔP 分别代入式(4)得到各点 ε 值, 并按式(5)计算 $K\varepsilon$, 列于表 1。

将表 1 中的相对流量值换算成 q_m , 连同各点 $K\varepsilon$ 填入流量演算器菜单, 就得到后面所附的数据表。

表 1

%q _m max	ReD	C	$K\alpha$	ε	$K\varepsilon$
10	10834	0.608864948	1.01174	0.999947093	1.00527
20	21667	0.605378709	1.00595	0.999788375	1.00511
30	32501	0.60404006	1.00372	0.999523845	1.00484
40	43335	0.603309087	1.00251	0.999153502	1.00447
50	54168	0.602841309	1.00173	0.998677347	1.00399
60	65002	0.602513174	1.00118	0.998095380	1.00340
70	75836	0.602268656	1.00078	0.997407601	1.00271
80	86670	0.602078535	1.00046	0.996614009	1.00191
90	97503	0.601925946	1.00021	0.995714606	1.00101
100	108337	0.601800403	1.00000	0.99470939	1.00000

五、结束语

1. 从以上分析不难看出、在孔板流量计中, 由于差压计精度的提高和智能流量二次表对制约孔板流量计范围度扩大的几个因素的准确的修正, 不仅能大幅度提高流量测量的准确度, 而且能使范围度扩大到 10: 1。

2. C 和 ε 的实际修正系数表明, 进行这两项修正是必要的, 在该例中, 如果不进行修正。流量为 30%F.S 时, 示值将会引入-0.9%(读数)的误差。流量为 10%F.S 时, 示值将会引入-1.7%(读数)的误差。

3. 用上述方法配置的孔板流量计二十多套, 在现场实际运行两年多, 稳定可靠, 故障率低, 计量精度高, 而且操作使用和维护都很方便, 收到良好效果。

参考文献

- (1) 石油化工自动控制设计手册 石油化学工业出版社, 1978 年
- (2) GB 2624-81 流量测量节流装置的设计安装和使用, 上海工业自动化仪表研究所 1981 年
- (3) FC 6000 型通用流量计算机操作说明书 上海宝科自动化仪表研究所
- (4) GB/T 2624-93 流量测量节流装置用孔板、喷嘴和文丘里测量管充满圆管的流体流量 1993 年

（本文原载于《自动化仪表》1998 第 6 期）