

# 提高孔板流量计精确度的研究

张宝良 中石化天津分公司 (天津, 300271)

纪波峰, 纪纲 上海同欣自动化仪表有限公司 (上海, 200070)

**提 要:** 标准差压流量计在不同的发展阶段, 用不同的方法来保证测量精确度。其中, 在 GB2624-81 版及之前, 采用设置较大的界限雷诺数的方法和压缩量程比的方法, 例如将量程比压缩到 3:1, 所以形成了孔板量程比只能做到 3 倍的概念。这时, 将流量系数  $\alpha$  当常数来处理。到了 GB2624-93 版, 由于 CPU 进入工业仪表, 在流量变送器或流量显示装置中对流出系数的非线性进行自动校正已成为可能, 从而恢复了流出系数 (或流量系数) 非线性的本来面貌, 将流出系数当变量来处理, 即建立了  $C=f(\beta, Re_D)$  模型, 由流量显示装置或智能流量变送器对流出系数的非线性进行自动校正, 从而弥补差压装置的这一不足之处。可将流量测量量程比扩大到 10 倍 (单量程) ~30 倍 (双量程); 系统不确定度提高到 1.0%。文中还给出了不确定度曲线。

**关键词:** 标准孔板 量程比 界限雷诺数 流出系数非线性 雷诺数补偿

## Study on orifice accuracy improvement

Zhang Baoliang SINOPEC Tianjin branch (Tianjin, 300271)

Ji Bofeng, Ji Gang Shanghai Tontion Automation Instrumentation Co., Ltd. (Shanghai, 200070)

**Abstract:** Standard differential pressure flowmeter uses different methods to ensure measurement accuracy at different stages of development. Before GB2624-81 released, we set the boundaries of the larger Reynolds and compression turndown ratio range, for instance compress turndown ratio to 3:1. So people build the concept of orifice turndown ratio is 3:1. At this time, the flow coefficient  $\alpha$  was treated as constant. Till GB2624-93 released, it made possible for automatic correction of flow coefficient nonlinear in the flow transmitter or flow display device on account of CPU. Thus restoring the discharge coefficient (or flow coefficient) non-linear original appearance, treated discharge coefficient as variable, and built model of  $C=f(\beta, Re_D)$ . Correct discharge coefficient nonlinear automatically in the flow transmitter or flow display device to make up for its deficiencies. It improves turndown ratio to 10(single range) to 30 (dual range), and improves system uncertainty to 1.0%. The paper provides uncertainty curve.

**Keywords:** standard orifice turndown ratio limits Reynolds discharge coefficient nonlinear Reynolds compensation

### 1. 概述

差压流量计是历史最悠久、研究最深入、积累的资料最丰富, 也是应用最广泛的一种流量计。已经实现标准化的标准孔板、喷嘴和文丘里管, 只要按照标准设计、制造、检验、安装和使用, 不经实流标定就能得到规定的准确度。

但它有一个显著的弱点, 即量程比不尽人意。自从二十世纪八十年代 CPU (计算机技术) 进入工业仪表之后, 这一情况有了改观, 人们引入了流出系数非线性的校正技术, 可膨胀性系数  $\epsilon$  的自动校正技术, 再加上差压测量精确度的大幅度提高 (从

二十世纪七十年代的  $\pm 1.5\%$  提高到现在的  $\pm 0.04\%$ ), 使差压式流量测量的系统不确定度有了显著提高, 同时量程比也得到显著的拓展, 从早先的 3:1, 扩大到 10:1<sup>[1][2][3]</sup>。

后来有的仪表公司推出了双量程差压流量计, 即增设了一台低量程差压变送器以及用 HART 通讯的方法传送差压信号, 可将量程比扩大到 30:1<sup>[4][5][6]</sup>, 但是质疑声有之, 理由是差压装置 (老标准中称节流装置) 的量程比只有 3:1, 差压测量精确度提得再高也解决不了问题。

本文先就这一问题做分析, 然后提出提高测量

精确度和扩大量程比的实用方法。

## 2. 事出有因

在国际标准 ISO5167:2003 (E) 和国家标准 GB/T2624-2006 中,并未对标准中所涉及的几种差压装置能达到的量程比做规定,只对能达到的不确定度做规定,例如大家所熟悉的标准孔板,只要满足下列使用条件就能得到 0.5% 的不确定度<sup>[7][8]</sup>。

$$50 \leq D \leq 1000 \text{mm}$$

$$d \geq 12.5 \text{mm}$$

$$0.2 \leq \beta \leq 0.6$$

$$Re_D \geq 5000$$

所谓流量量程比就是保证精确度的最大流量  $q_{\max}$  与最小流量  $q_{\min}$  之比<sup>[9]</sup>。在常用压力和常用温度条件下,雷诺数与流量成正比关系,所以,如果  $q_{\max}$  与  $q_{\min}$  之比为 10,就意味着  $Re_{D\max}$  与  $Re_{D\min}$  之比为 10,而在上述标准中, $Re_{D\max}$  与  $Re_{D\min}$  之比差 10 倍、100 倍甚至更大的倍数,标准中规定的  $C=f(\beta, Re_D)$  的模型都能达到规定的精确度。

所以能够做到这一点是因为 GB/T 2624 从 93 版开始,就已经不再将流出系数 C 当常数来处理,而是当变量来处理,在 GB/T 2624-93 (等同于 ISO5167:1990 (E) 中,给出了  $C=f(\beta, Re_D)$  的关系式,到了 GB/T 2624-2006,在总结了十多年的最新研究成果之后,对这一模型作了进一步完善,诞生了精确度更高的关系式,式(1)所示是标准孔板(角接取压)的关系式。

$$C = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521 \left( \frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.7} + \left[ 0.0188 + 0.0063 \left( \frac{19000 \beta}{Re_D} \right) \right] \beta^{3.5} \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.3} \quad (1)$$

式中: C —— 流出系数;

$\beta$  —— 直径比;

$Re_D$  —— 与 D 有关的雷诺数。

这个公式看上去很复杂,但若用图形来表示,就清晰明了,直观形象。

从图 1 可看出,当雷诺数  $Re_D$  较大时,流出系数 C 近似成水平线,即 C 为常数,但随着  $Re_D$  的减小,流出系数 C 逐渐增大。而若将  $\beta$  和  $Re_D$  代入公式计算出 C 的数值,就可基本消除雷诺数对流出系数的影响,保证 0.5% 的不确定度。

那在差压装置制造厂提供的设计计算书中为什么规定 3: 1 的量程比呢? 因为节流装置制造厂不知道用户将差压装置买回去是否进行流出系数

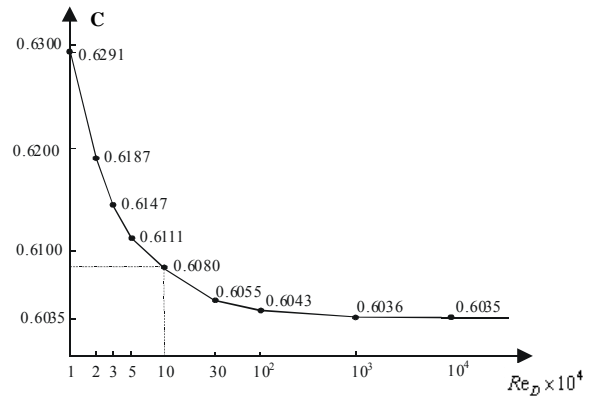


图 1 典型标准孔板流出系数随雷诺数变化曲线 ( $\beta = 0.6$ )

非线性补偿,而且从分工来说,流出系数非线性补偿也不是机械厂力所能及的事。而在他的计算书中,需要向订货单位交待他所提供的产品的不确定度是多少,如果最小流量太小,将会导致不确定度严重恶化,无法向用户交待。

孔板制造厂解决这一问题的方法一是缩小量程比,几十年的传统是将量程比压缩到 3 倍,这时,提供给用户的流出系数是常用流量对应的流出系数。按照国家标准的规定,这一点的不确定度是比较小的,而偏离常用流量之后,例如在 30% $q_{\max}$  或 100% $q_{\max}$  点,不确定度将显著增大。

这一方法使用了几十年<sup>[10]</sup>,而且在 GB 2624-1981 中用标准的形式固定下来<sup>[11]</sup>。图 2 所示

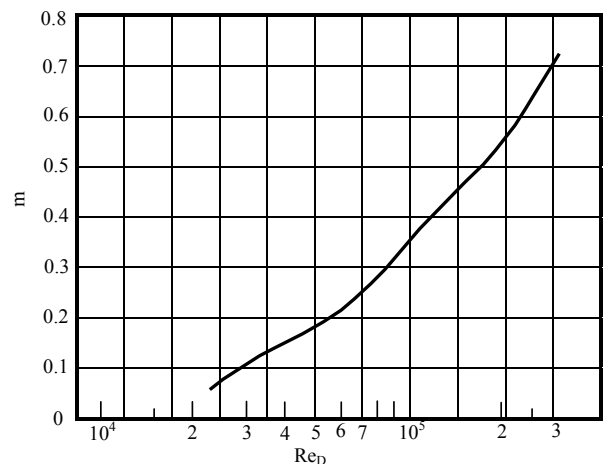


图 2 标准孔板的界限雷诺数(老标准)

的标准孔板直径比(图中的纵坐标  $m = \beta^2$ )与界限雷诺数的关系,就是节流装置设计计算中必用的工具。从图中可查得, $\beta = 0.1$  时,雷诺数必须  $\geq 30000$  才能保证精确度; $\beta = 0.5$  时,雷诺数必须  $\geq 1.5 \times 10^5$  才能保证精确度<sup>[12]</sup>。

在 GB2624-1981 中,流出系数也不是按照公式计算出来的,而且查图得到的。图 3 所示的就是一

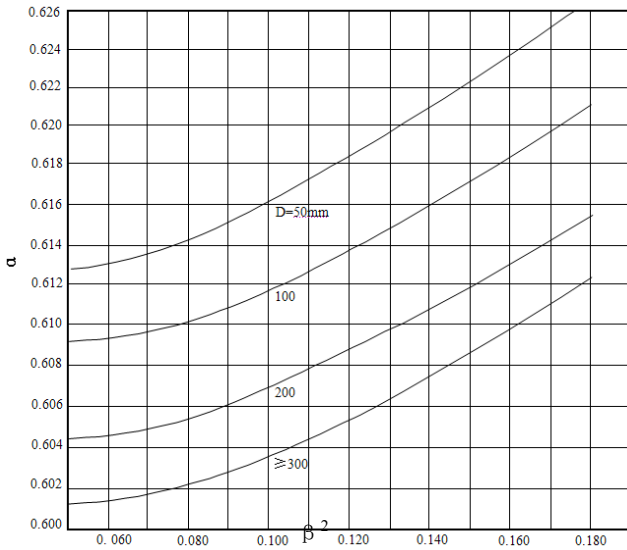


图 3 流量系数  $\alpha$  与直径比平方  $\beta^2$  的关系

是一幅流出系数(图中是流量系数  $\alpha, \alpha = C / \sqrt{1 - \beta^4}$ )与  $\beta^2$  和  $D$  的关系,在这幅图中,流出系数不仅与直径比有关,而且与管径  $D$  有关,这反映了管道内壁绝对粗糙度相同的前后直管段,由于管道内径不同,其速度分布也不同,所以  $\beta$  虽相同流量系数却不同。

在这幅图中,还有一个奇怪的现象,即流出系数与雷诺数没有关系。这是在实际雷诺数大于界限雷诺数之后,  $C=f(\beta, Re_D)$  曲线已经接近水平,所以忽略了雷诺数的影响。

上述方法在差压流量计实现智能化之前,使用了几十年,因为要用模拟式仪表解决流出系数随雷诺数变化引起的非线性问题,几乎是不可能的事情。

俱往矣。自从 CPU 进入工业仪表,情况发生了革命性的变化,因为按照标准所提供的  $C=f(\beta, Re_D)$  模型,实时计算流出系数已不是一件困难的事情,或者在差压装置设计计算时提供一张折线表(一般是 10 个或 16 个点),用户拿到这张折线表,将各个点的坐标值写到流量二次表内,就可实现流出系数非线性的在线补偿。对于差压装置制造厂来说,就可理直气壮地注明,他制造的孔板,不确定度是 0.5%,而不再是  $<1\%$ 。量程比不再受孔板的约束。

### 3. 精准级差压流量计的开发

精准级差压流量计开发的目标有两个,一个是

提高系统精确度,二是将保证精确度所对应的量程比扩大。

#### 3.1 精准级双量程差压流量计

文献[6]中详细分析了双量程孔板流量计达到 1.5% 不确定度而且量程比达到 30:1 的实现方法。其中,所用的差压变送器是 0.065% 精确度等级,而现在,差压变送器精确度等级已经提高到 0.04%,即  $\xi \Delta p = 0.04\%$ ,将此值代入差压测量不确定度计算公式<sup>[6]</sup>:

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

式中:  $\xi_{\Delta p}$  —— 差压变送器精确度等级;

$\Delta p_{\max}$  —— 差压上限, kPa;

$\Delta p$  —— 常用流量对应的差压, kPa。

就可使  $\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$  减小到原来的 0.615 倍,将此值代入式

(3) 就可计算流量不确定度。从而使系统不确定度显著减小。

在 GB/T 2624-2006 中,给出了差压式流量计的系统不确定度估算公式:

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \left[ \left( \frac{\delta C}{C} \right)^2 + \left( \frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + \left( \frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \left( \frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left( \frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \left( \frac{\delta d}{d} \right)^2 + 4 \left( \frac{\delta \Delta p}{\Delta p} \right)^2 + 4 \left( \frac{\delta \rho_1}{\rho_1} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

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;

$\frac{\delta \rho_1}{\rho_1}$  —— 孔板正端取压口处流体密度不

确定度。

在利用式(3)对流量不确定度进行估算时,  $\frac{\delta D}{D}$  和  $\frac{\delta d}{d}$  一般可以忽略,  $\frac{\delta \rho_1}{\rho_1}$  作用也很小<sup>[6]</sup>, 其余三个因子起关键作用。其中  $\frac{\delta C}{C}$  对于标准孔板来说, 常取其为 0.5%, 按照 GB/T 2624-2006,  $\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}$  用下式计算:

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = 3.5 \frac{\Delta p}{\kappa P_1} \% \quad (4)$$

式中:  $\Delta p$  —— 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;  
 $\kappa$  —— 等熵指数。

所以求得  $\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$  和  $\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}$  后, 就可计算  $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 。

下面是各特征点关键因子  $\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$ 、 $\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}$  的计算结果,

以及将其代入流量不确定度  $\frac{\delta q_m}{q_m}$  计算公式, 然后得到的系统不确定值。其中差压装置流出系统不确定度仍保持 0.5%。

① 在  $q_m = 70\% q_{mmax}$  特征点

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = 0.54\%$$

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = 0.02\%$$

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

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

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

$\frac{\delta q_m}{q_m}$  —— 流量测量不确定度。

② 在  $q_m = 100\% q_{mmax}$  特征点

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = 0.026\%$$

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = 0.04\%$$

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = 0.5\%$$

③ 在  $q_m = 17.32\% q_{mmax}$  特征点

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = 0.89\%$$

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = 0$$

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = 0.67\%$$

④ 在  $q_m = 3\% q_{mmax}$  特征点 (低量程差压变送器有效)

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = 0.89\%$$

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = 0$$

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = 0.67\%$$

⑤ 在  $q_m = 1\% q_{mmax}$  特征点 (低量程差压变送器有效)

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = 4.0\%$$

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = 0$$

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = 2.0\%$$

### 3.2 双量程孔板流量计不确定度曲线的绘制

将上述各特征点不确定度计算结果, 在平面坐标系中标出, 然后连线, 就得不确定度曲线, 如图 4 所示。

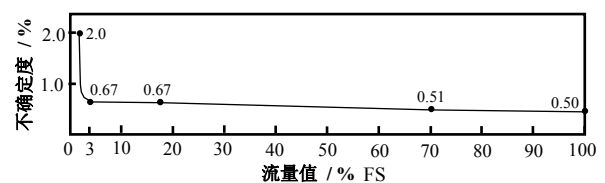


图 4 双量程孔板流量计不确定度曲线

### 3.3 精准级单量程孔板流量计不确定度的估算及曲线

上面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，这时只要将 10%FS 和 3%FS

流量点的  $\frac{\delta q_m}{q_m}$  计算出来，就可绘制不确定度曲线。

#### ① 10%FS 点不确定度估算

用一台差压变送器测量时，在 10%FS 流量点，参照上述计算方法计算可得到

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = 1.33\%$$

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = 0$$

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = 0.83\%$$

#### ② 3%FS 流量点不确定度估算

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = 14.8\%$$

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = 0$$

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = 7.4\%$$

#### ③ 不确定度曲线

单量程差压流量计的系统不确定度随流量变化的关系曲线如图 5 所示。

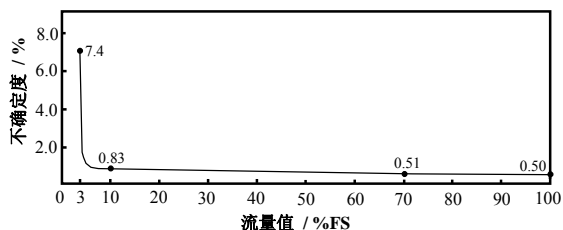


图 5 单量程孔板流量计不确定度曲线

## 4. 结束语

① 二十世纪八十年代，标准差压流量计的差压装置流出系数  $C$ ，是作为常数来处理。由于实际的  $C$  是受雷诺数影响的，所以带来较大误差，在常用流量点，流量系统不确定度也只能达到 2%，而且可使用的流量测量范围也只能达到 3:1。

② GB/T 2624-1993 标准发布后，引入了雷诺数影响校正和可膨胀性系数校正，从而使标准差压

装置不受量程比约束。

③ 差压测量仪表的进步，为提高系统不确定度创造了条件。采用 0.04% 精确度等级的差压变送器与标准孔板组成的一体化标准孔板流量计，用来测量气体和蒸汽流量时，不经实流标定，系统不确定度就能达到 1.0%，对应的流量量程比为 10:1；而如果增设一台低量程差压变送器，则量程比可扩大到 30:1。

④ 不确定度曲线能将流量系统不确定度与量程比的关系表达得更直观、清晰。

⑤ 技术的进步，甩掉了标准孔板流量计“误差大”、“量程窄”的帽子。从而以新的面貌赢得市场。

### 参考文献

- 王建忠, 纪纲. 差压式流量计范围度问题的研究. 自动化仪表, 2005, (8).
- 王建忠, 纪纲. 节流式差压流量计为何仍有优势. 自动化仪表, 2006, (7).
- 郑灿亭, 孙晓峰, 吴兆喜, 金涛. 蒸汽计量中存在的两大难题. 石油化工自动化. 2007, (1):85
- 程建三, 纪纲. 双量程差压流量计的新进展. 石油化工自动化, 2009, 45(2):54~57.
- 袁均钢, 倪长旺, 纪纲. 双量程差压流量计原理与应用: 2008 全国能源计量优秀论文集[C]. 北京: 中国计量出版社, 2008:554~559.
- 陈勇, 马璐文, 陈新亮, 等. 双量程孔板流量计不确定度及量程比[J]. 石油化工自动化, 2013, 49(5).
- ISO. ISO 5167-2: 2003 (E) Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full[S]. Switzerland: ISO, 2003.
- 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.
- 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, 2012:18~23
- 纪纲. 流量测量仪表应用技巧[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2009:55
- 国家仪器仪表总局标准化研究院. GB2624-81 流量测量节流装置的设计安装和使用[S]. 1981.12
- 上海工业自动化仪表研究所. 流量测量节流装置设计手册. 北京: 机械工业出版社. 1966, 172~208

13. 魏崢, 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 [J], 石油化工自动化.

2013(6):54-57

摘自《石油化工自动化》2017.53 (04)