

关于差压流量计范围度的研究

王建忠 (上海同欣自动控制工程有限公司, 上海 200070)

纪 纲 (上海同欣自动化仪表有限公司, 上海 200070)

提 要 叙述了制约节流式差压流量计范围度扩大的三个主要因素: 差压测量精确度、流出系数的非线性和可膨胀性系数变化, 分析了均速管流量计的范围度, 最后讨论了拓展范围度和提高系统精确度的方法。

关键词 差压流量计 均速管 范围度 不确定度 自动校正

1 概述

在流量测量仪表的工业应用中, 差压流量计是历史最悠久, 应用最广泛的仪表之一。其结构简单、牢固, 易于复制, 性能稳定可靠, 使用寿命长, 价格也便宜。尤其是标准节流式差压流量计, 无需实流校准, 只要按照相关标准设计、制造、安装和使用, 就能得到足够的测量精确度, 这在流量计中是少有的。

涡街流量计推广应用之后, 差压流量计的部分领地被涡街流量计占领, 但在高温、高压流体, 管径较大的测量对象和环境有振动等不适合涡街流量计的场合, 差压流量计仍是不可替代的。尤其是热电等行业, 仍然普遍使用差压流量计。

但是差压流量计也有不尽人意之处, 例如范围度不够大, 早期的文献资料一直认为只能达到 3:1, 近十多年以来, 有不少文献论述能达到 10:1, 下面就这个问题发表几点看法, 并介绍差压式流量计的一些新进展。

2 节流式差压流量计范围度不够大的原因

2.1 差压精确度的制约

节流式差压流量计范围度不够大主要受几个因素的制约, 其一是差压计精确度的制约。

节流式差压流量计输出信号与流量之间为平方关系, 在百分率流量 (相对于满量程用百分比表示的流量) 较小时, 差压信号相对值非常小, 这就导致测量误差相应增大。例如在流量为满量程的 20% 时, 差压信号理论值只有满量程的 4%, 如果选用的差压变送器是 0.1 级精确度, 则差压测量的不确定度就高达 $\pm 2.5\%$, 引入的流量测量不确定度为 $\pm 1.25\%$, 如果是老式的 1.5 级差压计, 则测量不确定度就将大得惊人。因此在差压测量精确度得到充分提高之前, 要拓宽流量测量范围度是不可能的。

2.2 流出系数非线性的制约

传统的节流式差压流量计, 是将流出系数 C 当常数来处理, 这在当时的技术发展阶段是不得已而为之。其实 C 并非常数, 对于一副具体的节流装置, 其流出系数是随雷诺数的变化而变化的。

GB/T 2624-93 给出了标准孔板流出系数随雷诺数变化的关系式 (以角接取压为例) [1]:

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5}(10^6 / Re_D)^{0.75} \quad (1)$$

式中 β —— 标准孔板开孔直径与管道内径之比;

Re_D —— 雷诺数。

为了更清楚地说明雷诺数对流量计范围度的制约, 图 1 画出了一台 DN50、 $\beta=0.6$ 的典型标准孔板流出系数随雷诺数变化的关系曲线, 从图中可清楚看出, 雷诺数 $< 10 \times 10^4$ 后, 所对应的 C 值与雷诺数为 1×10^6 时的 C 值之差已大于 0.6%, 比国标所规定的不确定度大, 因此, 只能规定此节流装置不能在 $Re_D < 10 \times 10^4$ 的条件下使用。而如果满量程所对应的雷诺数为 4×10^5 , 则仪表的范围度最大只可能为 4:1。

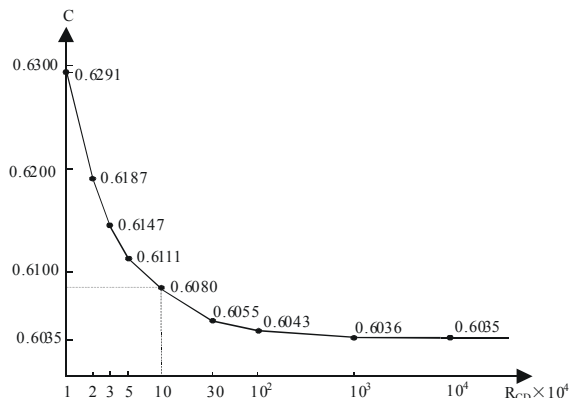


图 1 DN50 $\beta=0.6$ 标准孔板 $C = f(Re_D)$ 关系曲线

2.3 可膨胀性系数的制约

如果测量蒸汽或气体流量，还要受到膨胀性系数的制约。

蒸汽和气体流过节流件时，总是有一定的压降，此压降导致蒸汽和气体密度减小。可膨胀性系数 ε 是对流体流过节流件时密度发生变化而引起的流量系数变化的修正。

常用流量条件下的 ε 已在设计节流装置时予以解决，也就是说，如果仪表在常用流量条件下使用， ε 不引起附件误差。但是偏离常用流量之后，必定引起附加误差。

GB/T 2624-93 给出了标准孔板 ε 关系式，即角接取压、法兰取压和径距取压， ε 都可用式（2）表示^[1]。

$$\varepsilon_1 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \times \frac{\Delta P}{p_1} \times \frac{1}{\kappa} \quad (2)$$

式中 ε_1 —— 使用状态下的可膨胀性系数；

β —— 直径比；

ΔP —— 差压，Pa；

p_1 —— 使用状态下节流件前流体绝对压力，

Pa；

κ —— 等熵指数。

实际可膨胀性系数偏离设计状态可膨胀性系数时引起的附加误差可用式（3）表示。

$$\frac{\delta_{\varepsilon_1}}{\varepsilon_{1d}} = \frac{\varepsilon_{1f} - \varepsilon_{1d}}{\varepsilon_{1d}} \quad (3)$$

式中 $\frac{\delta_{\varepsilon_1}}{\varepsilon_{1d}}$ —— 偏离常用流量时 ε_1 引入的附加误差；

ε_{1f} —— 使用状态 ε_1 值；

ε_{1d} —— 设计状态（常用流量条件下） ε_1 值。

表 1 所示为一台 D_N150 、 $0 \sim 6000 \text{kg/h}$ 、 $\Delta P = 40 \text{kPa}$ 、 $p_1 = 0.8 \text{MPa}$ （绝压）的蒸汽流量计的各特征点 ε 值^[3]。从表中可清楚地看出，如果常用流量为 $70\% q_{m \max}$ ，则实际流量为 $40\% q_{m \max}$ 时， ε 引起的误差已大于 0.6% 。

$\% q_{m \max}$	ε_1	$\% q_{m \max}$	ε_1
0	1.00000	60	0.992986592
10	0.999805183	70	0.990453973
20	0.999220732	80	0.987531720
30	0.998246648	90	0.984219833
40	0.996882930	100	0.980518313
50	0.995129578		

在流量小于常用流量时， ε_1 偏大，所以引入的流量示值误差为负值。

2.4 节流式差压流量计的不确定度

节流式差压流量计的不确定度由好几个部分组成，GB/T 2624-93 给出了标准节流式差压流量计不确定度公式^[1]：

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \left[\left(\frac{\delta C}{C} \right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} \right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right) \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right) \left(\frac{\delta d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \Delta P}{\Delta P} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \rho_1}{\rho_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中 $\frac{\delta C}{C}$ —— 流出系数不确定度；

$\frac{\delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1}$ —— 可膨胀性系数不确定度；

β —— 直径比；

$\frac{\delta D}{D}$ —— 管道内径的不确定度；

$\frac{\delta d}{d}$ —— 节流件开孔直径的不确定度；

$\frac{\delta \Delta P}{\Delta P}$ —— 差压计的不确定度；

$\frac{\delta \rho_1}{\rho_1}$ —— 流体密度测量的不确定度。

上面的讨论仅仅涉及到公式（4）中的 C 、 ε_1 和 ΔP ，从数据分析的结果可清楚地看出，被测流量偏离常用流量后，从测量原理来说，就将引起附加误差，而且，百分率流量越小，附加误差越大，因而仪表范围度受到制约。

3 均速管流量计

有些均速管流量计资料介绍，范围度可达 10:1，这是由其结构决定的。首先，均速管测量的是管道流通截面上的平均流速，因而受雷诺数影响不明显。

图 3 所示为管道内流速分布同管道雷诺数的关系图^[2]。在雷诺数大到一定数值时，为充分发展管流，管道中心与其他部位的流速差异较小。而在雷诺数较小时，管道中心流速比其他部位高得多，而标准节流装置的差压信号是从管壁上取出的。因而随着雷诺数的减小，负误差相应增大。



图 3 管内流速分布与雷诺数的关系

均速管流量计的可膨胀性系数影响也较小，这是因为插入测量管内的检测杆对流体的阻力小，因而输出的差压信号很小，这就使得 ε 总是接近 1，这从式（2）中可清楚看出。

均速管流量计在这两点上比节流式差压流量计有优越性，仅从这两点出发，均速管本身应具有比标准孔板高得多的测量精确度和大得多的范围度，但就整个测量系统来说，这一结论不一定是正确的。因为同样是差压信号小这一点，对于减小 ε 影响来说是积极的作用，但对差压测量来说却是负面影响。

均速管流量计常用来测量低静压、低流速、大口径气体流量，在此类应用场合，差压信号往往只有几十帕，因为均速管流量计的满量程差压不象节流式差压流量计那样可由设计者选取。而微差压变送器精确度等级一般只能做到 0.5 级，因此，要得到大的范围度，可能性也不大。即使是密度较大，流速也较高的流体，常用流量条件下，差压也只有几千帕，如果被测流体为干燥气体，条件尚好，如果是湿气体或蒸汽，由于差压信号在从均速管传送到差压变送器过程中，很容易产生传送失真，从而使系统误差增大。曾经有一个用户反映，采用了一种新型差压式流量计测量蒸汽流量，满量程差压 8kPa，流量计投入运行后，发现示值显著偏低，在流量为零时，差压变送器输出大大低于 4mA（差压计零位是准的），经分析，此反向差压是由于引压管线安装欠合理引起。而满量程差压太小，使得差压信号传送失真对系统的影响变得严重。

在节流式差压流量计用来测量蒸汽流量时，人们大多喜欢取满量程差压在 40~60kPa 之间，为的就是在永久性压损不太大而能被工艺所接受的前提下，尽量使差压信号大一些。从而降低对差压信号传送失真的要求。

由上述分析可知，不能只谈均速管本身能够达到的精确度和范围度，而更具实用价值的是流量测量系统的精确度和范围度。因为均速管输出的差压信号，总要有差压测量仪表和显示仪表的配合，使用者才能获得流量读数。

4 节流式差压流量计范围度的拓宽

与均速管差压流量计相比,节流式差压流量计的满量程差压可根据测量点条件选择一个最佳值,这是其优点。但是流出系数的非线性和可膨胀性系数变化影响大是它固有的不足。如果不顾 C 和 ε 的影响,只是简单地换上高精度差压变送器,百分率流量较小时,系统精确度仍旧提不高,所以范围度仍然得不到拓宽。值得庆幸的是,自从仪表实现智能化以后,人们获得了有力的工具,因为仪表的计算功能大大增强,在智能化仪表中,可以根据公式(1)在线计算流出系数,从而对雷诺数对流出系数的影响予以修正。

在节流式差压流量计用来测量蒸汽或气体流量时,人们不仅可经智能流量二次表对温度压力工况的变化进行恰到好处的补偿,而且能根据公式(2)对 ε 影响进行在线修正,从而将差压流量计的范围度拓宽到 10:1。

将节流装置、差压变送器、压力变送器、温度传感器及它们的辅助装置组合起来组成的智能一体化节流式流量计,不仅安装简单,工期缩短,而且因为引压管线短,配置合理,所以不会产生差压信号传送失真,对保证系统精确度有显著效果。

智能一体化节流式流量计中的显示装置,除了可引入流出系数在线校正、 ε_1 自动补偿之外,还可用折线法对差压变送器各校验点的误差进行自动修正,因而系统精确度大大提高。在此基础上,范围度可提高到 10:1 以上^{[5][6]}。

5 在流量标准装置上的验证

上面对差压式流量计范围度的分析和所提出的拓宽范围度、提高系统精确度的方法是否真的有效,须由实践来检验。为此作者分别在(容积法)水流量标准装置和(钟罩)空气流量标准装置上作了验证。

其中差压测量采用 EJA110A 型差压变送器,雷诺数对流出系数影响和可膨胀性系数对计量精确度的影响(介质为空气时)均按 GB2624-93 中的表达式,在流量显示装置中进行补偿(测量空气流量时,还进行了温度压力补偿和压缩系数补偿),验证结果如下:

在水流量标准装置上,验证了 D_N50 和 D_N100 一体化节流式流量计,在满量程的 10%~100%范围内,取 6 个试验点,最大系统误差为示值的 0.80% (各点误差数据从略)。

在空气标准装置上,验证了 DN100 和 DN150 一体化节流式流量计,在满量程的 10%~50%范围内,取 5 个试验点,(由于钟罩的压头不足,流量只能升到 50%FS)最大系统误差为示值的 1.40% (各点误差数据从略)。

展望未来,前景更加光明。我国现在实施的国家标准 GB/T 2624-93 流量测量节流装置 用孔板、喷嘴、文丘里管测量充满圆管的流体流量,是等效采用国际标准 ISO 5167-1 (1991),国际上经过十多年的大量实验研究与总结,在 2003 年 3 月由国际标准化组织 ISO 正式公布了最新的国际标准 ISO 5167:2003 (E),流出系数和可膨胀性系数采用了精确度更高的公式,可以相信,待我国采用最新的国际标准化后,我们按照新的国家标准制造和使用的节流式差压流量计,能获得的系统精确度将更高。

6 结束语

① 节流式差压流量计由于受差压计精确度的制约,流出系数 C 非线性的制约以及可膨胀性系数 ε_1 变化影响,在引入先进的校正方法之前,范围度一般只能达到 3:1。

② 均速管差压流量计由于其原理和结构的特殊性,使其受雷诺数影响和可膨胀性系数变化影响忽略不计,但因均速管输出的差压信号值往往很小,差压信号传送失真和差压测量精确度的矛盾突出,系统精确度和范围度仍然提不高。

③ 节流式差压流量计实现智能化后,流量系数非线性和可膨胀性系数影响,可得到恰到好处的校正,差压变送器所固有的误差,也可用折线法得到校正,因而系统精确度大大提高,范围度可提高到 10:1 以上。

④ 智能一体化节流式差压流量计,由于其结构特点,使其安装简单,工程量减小,工程费用降低。而且因为引压管线短,不会产生差压信号传送失真,因而系统精确度和范围度均得以提高。

参考文献

1. GB/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
2. 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲. 流量测量方法和仪表的选用. 北京:化学工业出版社, 2001, 14
3. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧. 北京: 化学工业出版社. 2003 100,216
4. GB/T 17167-1997 企业能源计量器具配备和管理导则
5. 纪纲, 章小风, 郝建庆. 孔板流量计扩大范围度的一种方法. 自动化仪表. 1998(6): 7~10
6. 骆美珍, 龚毅, 陈少华. 提高差压法流量测量精度点滴. 石油化工自动化. 1998(5): 41~43