

双量程差压流量计的新进展

程建三（上海市张江高科技园区热力有限公司，上海 201203）

纪 纲（上海同欣自动化仪表有限公司，上海 200070）

提 要 分析传统节流式差压流量计范围度较小的原因，提出增设低量程差压变送器以提高小流量时的测量精确度，并进行流出系数非线性补偿和可膨胀性系数变化的校正。文中重点讨论了高低量程的合理确定和差压信号的传递失真问题。

关键词 差压式流量计 双量程 范围度 量程选定 量程切换

1. 问题的提出

差压式流量计的多种优点，令其在很多方面仍具有突出的优势。这些优势包括：

- 优异的稳定性、可靠性和抗振动能力；
- 对高温、高压、低静压、低流速、低密度流体的适应性；
- 口径从小到大，系列齐全；
- 变更量程方便；
- 只要按照标准设计、制造、安装和使用，无需实流标定就能获得规定的准确度，因而为用户带来方便。

但是，差压式流量计也有它固有的缺陷，即范围度不理想，这主要是由其测量原理决定的。

节流式差压流量计的一般表达式为^[1]

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \sqrt{2\Delta p \cdot \rho_1} \quad (1)$$

式中 q_m —— 质量流量，kg/s；

C —— 流出系数；

β —— 直径比， $\beta = d/D$ ；

D —— 管道内径，m；

ε_1 —— 节流件正端取压口平面上的可膨胀性系数；

d —— 工作条件下节流件的开孔直径，m；

Δp —— 差压，Pa；

ρ_1 —— 节流件正端取压口平面上的流体密度，kg/m³。

为了分析的方便，我们对式（1）作适当的化简，即在某流体工况条件下，密度 ρ_1 为已知值，流出系数 C 、直径比 β 、可膨胀性系数 ε_1 和开孔直径 d 都近似为常数，则式（1）简化为式（2）。

$$q_m \approx K \sqrt{\Delta P} \quad (2)$$

经无量纲化处理后，就可得到如图 1 所示的 $q_m = f(\Delta P)$ 关系曲线。

在对式（1）进行分析后，可得这种测量方法获得的测量结果的不确定度同各因素不确定度之间的关系。

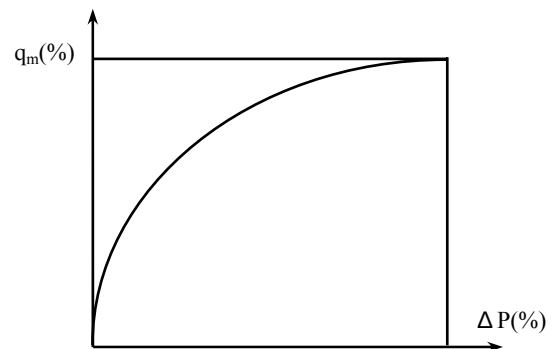


图 1 $q_m = f(\Delta P)$ 曲线

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \pm \left[\left(\frac{\delta C}{C} \right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times 100\% \quad (3)$$

式中： $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 为质量流量不确定度； $\frac{\delta C}{C}$ ， $\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}$ ， $\frac{\delta D}{D}$ ， $\frac{\delta d}{d}$ ， $\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$ ， $\frac{\delta \rho}{\rho}$ 分别为各参数的不确定度；各变量的系数为敏感度系数。

这里，我们着重分析流量测量不确定度与差压测量不确定度的关系。仅仅分析差压测量不确定度对流量测量不确定度的影响，可以采用偏微分的方法，从式（3）可得

$$\frac{\partial q_m}{q_m} = \frac{1}{2} \frac{\partial \Delta p}{\Delta p} \quad (4)$$

由于差压变送器的误差都是用引用误差来表示的，因此， Δp 的相对值为不同数值时 $\frac{\partial \Delta p}{\Delta p}$ 也不同。

例如，对于 0.075 级精度等级的变送器，在 $\Delta p=100\%FS$ 时 $\frac{\partial \Delta p}{\Delta p}=0.075\%$ ；在 $\Delta p=3.75\%FS$ 时 $\frac{\partial \Delta p}{\Delta p}=2\%$ ，由式（4）可知，在后一种情况下，对流量测量不确定度影响为 1%。

从上面的分析计算可知，为了获得 $\pm 1\%$ 的流量测量精度，如果选用的是 0.075 精度等级的差压变送器，只有在差压大于 3.75%FS，即流量大于 19.36%FS 时，才能保证精度。

2. 扩展范围度的常用方法

2.1 多台流量计并联使用

采用两台甚至更多台差压式流量计并联使用，可以使范围得到成倍的扩展。在煤气行业，这种方法用得很普遍。图 1 所示是用四台 DN1000 的差压式流量计解决 DN2000 管道的煤气流量测量问题，当流量最大时，四台流量计全部投入使用，如果总管流量减小，可将投入使用的流量计减少到三台、两台或一台。如果一台流量计的范围度是 4 倍，则四台相同口径的流量计并联使用可将总管流量测量的范围度扩展到 16 倍。

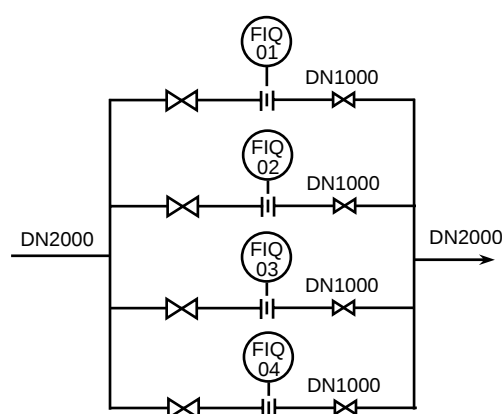


图 2 多台流量计并联使用

多台流量计并联使用解决的另一个问题是实现大管径流量测量。因为标准节流装置适用的最大口径仅 1000mm。

2.2 采用开孔直径不同的两个节流件

设计和制造大开孔直径和小开孔直径两个节流件，大开孔直径对应大的测量上限，小开孔直接对应小的测量上限。在流量较大的时候，使用大孔径孔板，流量较小的时候，使用小孔径孔板。

这种方法在采暖负荷为主要负荷的用户，使用较多。采暖季节流量较大，使用大孔径孔板；非采暖季节流量较少，使用小孔径孔板。

这种方法的使用要满足两个条件，一是大小流量的转换不能太频繁，二是要有机会停车更换节流件。在煤气行业，很多煤气流量测量点使用的可换式孔板，可在不停车、不断流的情况下更换孔板，而更多的不采用可换孔板的测量点，如果更换孔板那就很麻烦了。

2.3 采用线性孔板

从前一节的分析可知，标准孔板差压式流量计，其范围度之所以较窄，是因为节流件输出的差压信号与流量的平方成正比。在相对流量较小时，输出差压的相对值很小。而线性孔板就针对这一点做了关键性改进。

线性孔板又叫弹性加载可变截面变可变压头孔板。在这种节流装置中，有一个截面积经过特殊设计的纺锤形活塞，在承载弹簧的配合下，产生位移，改变孔板的流通截面，从而使其输出的差压同流量之间呈线性关系。其结构如图 3 所示^[4]。

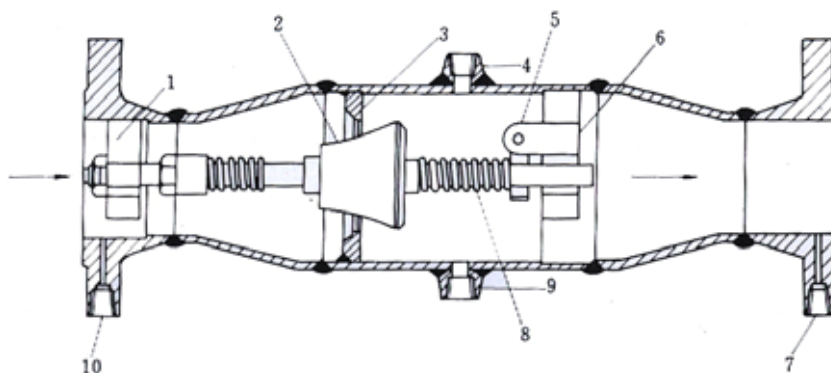


图 3 线性孔板 (GILFLO 型节流装置)

- 1 — 稳定装置；2 — 纺锤形活塞；3 — 固定孔板；4 — 排气孔；5 — 标定和锁定蜗杆装置；6 — 轴支撑；
7 — 低压侧差压检出接头；8 — 高张力精密弹簧；9 — 排水孔；10 — 高压侧差压检出接头

2.4 采用两台差压变送器

从前一节的分析可知，由单一差压变送器与节流装置等组成的差压式流量计，在流量较小时，流量测量精度难以保证，主要是因一台差压变送器在相对流量较小时，差压测量不确定度太大。为了提高相对流量较小时的测量精确度，增设一台低量程差压变送器，是一个较好的方法。

3. 提高小流量时的差压测量精度

3.1 提高差压变送器的精度

自从差压式流量计投入工业应用以来，人们在提高差压变送器（差压计）的测量精度和其他性能指标方面作出了极大的努力，就精度等级而言，从五十年的 1.5 级，六十年代的 1 级，七十年代的 0.5 级，八十年代的 0.2 级，提高到九十年代的 0.1 级和 0.075 级，新世纪以来，更是提高到 0.04 级，这方面的提高，为差压式流量计扩大范围度提供了坚实的基础。所以选用精度高的差压变送器，是获得较大流量计范围度的一个重要方法。

3.2 增设一个低量程差压变送器

一台差压变送器，其差压低端的示值误差无法进一步减小的原因是其精度并非可以任意确定，而且受

膜盒面积等因素制约，其实膜盒面积制约的不仅仅是精度等级所对应的差压值，而且有环境温度影响以及长期漂移影响所对应的差压值。

为了提高相对流量较小时的差压测量精度，另外增设一台低量程差压变送器是一个行之有效的方法。

例如有一蒸汽流量测量对象，最大流量 160t/h，最小流量 6t/h，常用压力 1.1MPa，常用温度 250℃，公称口径 DN500，高量程差压变送器选用 0.075 级中差压变送器，测量范围：0 ~ 100kPa，低量程差压变送器选用 0.075 级低差压变送器，测量范围设定为 0 ~ 3.75kPa，这样，两台变送器在智能二次表的指挥下，自动切换，相互配合，保证 1%不确定度的量程比约为 27 倍，更小的流量，不确定度更大些。

3.3 其他因素的对策

从式 (1) 和式 (2) 可知，节流式差压流量计的测量不确定度不仅与差压测量的不确定度有关，而且与流量密度 ρ_1 、流出系数 C 的非线性以及可膨胀性系数 ϵ_1 的不确定度有关，为了消除或基本消除这些因素对流量测量不确定度的影响，可在二次表内按规定的数学模型进行密度补偿、流出系数补偿、可膨胀性系数校正等^[3]。

3.4 防止差压信号的传递失真

在式 (3) 所示的差压测量不确定度同流量测量不确定度的关系中，是假定差压变送器输入的差压值与节流装置所产生的差压值一致，但是，导压管在将节流装置所产生的差压引到变送器的过程中，由于多种原因，很容易产生差压信号传递失真。在这些原因中，有根部阀选型安装不合理，导压管坡度不符合要求，冷凝器安装高度不相同，导压管太长而且管内传输介质（液体）温度不相同等^[4]。在被测介质为干气体时，这种传递失真一般可忽略，在被测介质为湿气体和蒸汽时，一个不留心就会引起传递失真。

对于一个具体的流量测量装置，相同的差压信号传递失真，在流量为不同值时，其影响也不一定，其中相对流量较大时，影响较小，相对流量较小时，影响较大，这是因为相对流量较小时，节流装置送出的差压信号较小的缘故。所以，在双量程差压式流量计的设计和安装中，要特别注意差压信号的传递失真，想方设法尽量避免这种失真。

图 4 所示是采用一体化方法来避免差压信号传递失真的一个实例。图中用冷凝管代替冷凝器，导压管也很短，在节流装置和差压变送器之间，没有引起传递失真的零部件，只要管道的水平度较好，差压就会有较好的零点。如果直管段长度有保证，从两个方向引出的差压就有相同的数值，这一数值在仪表投入运行后，如果差压在低量程测量范围内，也可从两台差压变送器的输出信号数值进行观察比较。

4. 高低量程的选定

对于一套双量程差压流量计，高低量程切换点的选定是设计的重要内容，不仅受范围度要求的制约，允许压损的制约，系统不确定度的制约，而且受差压变送器规格的制约。

具体设计计算时需遵循下面的原则：

- 在压损允许的前提下，将高量程的差压上限尽量选得大一些。这样，最小流量所对应得差压值可相应大一些，以减小各种干扰因素对小流量测量精度的影响。
- 系统不确定度能满足用户的要求。尤其要保证大流量时的系统不确定度。
- 不必强调节流装置的不确定度，因此流量在很大的范围内变化，流出系数相应的变化和可膨胀性系数相应的变化都较大，但是，这些变化都可以在二次表内得到补偿和校正。最终对系统不确定度的影响仍

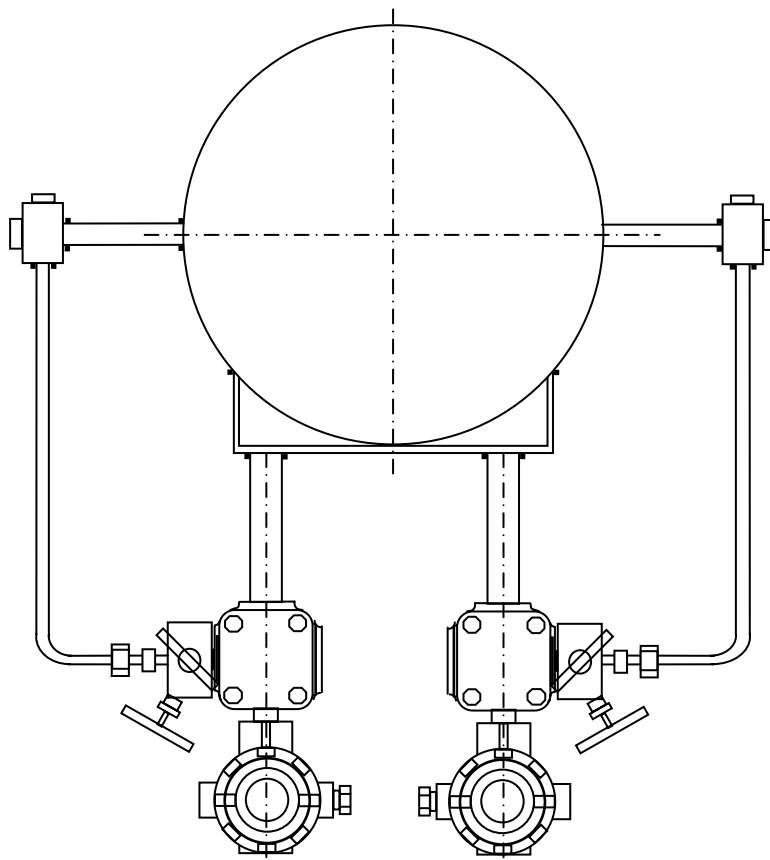


图 4 典型双量程一体化节流式流量计结构图

可忽略。

遵循这些原则，在上面的例子中，高量程差压上限取 100kPa，选用中差压变送器。而低量程差压上限选 3.75kPa，选用低差压变送器，相应的流量切换点为 30.976t/h。这样，在切换点处，高量程变送器的差压不确定度为 $\pm 2\%$ ，对流量测量系统不确定的影响为 $\pm 1\%$ 。而低量程时，差压测量不确定度为 $\pm 2\%$ 所对应的差压值为 0.14kPa，对应的流量值为 5.99 t/h，此值虽比用户提出的最小流量值略大一些，但大流量时的系统精度有了保证。在被测流量小于 6 t/h 后，虽然系统不确定度比 $\pm 1\%$ 略大，但由于这一不确定度所对应的流量绝对数值较小，所以用户并不计较。

5. 高低量程的切换

高低量程的切换是要完成下面的表达式：

当开平方运算在流量二次表内完成时，

$$\begin{cases} q_f = \sqrt{A_{iL}} \cdot FS_L & (A_{iL} \leq 100\%) \\ q_f = \sqrt{A_{iH}} \cdot FS_H & (A_{iL} > 100\%) \end{cases} \quad (5)$$

当开平方运算在差压变送器内完成时，

$$\begin{cases} q_f = A_{iL} \cdot FS_L & (A_{iL} \leq 100\%) \\ q_f = A_{iH} \cdot FS_H & (A_{iL} > 100\%) \end{cases} \quad (6)$$

式中： q_f —— 未经补偿的流量，单位由 FS 定；

A_{IL} —— 低量程变送器输出信号，0 ~ 100%；

A_{IH} —— 高量程变送器输出信号，0 ~ 100%；

FS_L —— 低量程满度流量，kg/h、t/h 或 Nm^3/h 等；

FS_H —— 高量程满度流量，kg/h、t/h 或 Nm^3/h 等；

在切换点附近的切换，一般在智能化二次表内由软件完成，一般约定，低量程变送器信号 $\leq 100\%$ (20mA) 时，低量程变送器信号有效；低量程变送器 $> 100\%$ 时，高量程变送器信号有效。

从前面的分析可知，由于高量程差压变送器总有一定的误差存在，低量程差压变送器和二次表的输入通道也会有一定的误差存在，在进行高低量程切换时， q_f 值极限跳动幅度约为 $\pm 1\%$ ，这主要是由高量程差压变送器的误差引起的。

为了防止在切换点附近出现频繁切换和与之相伴随的流量示值的晃动，在设计切换程序时，一般应考虑设计一个切换死区。

6. 讨论

过范围运行问题

在双量程差压流量计中，低量程差压变送器有很多时候是在过范围的条件下工作，过范围的差压值尽管不是很可观，但毕竟已使变送器内的膜盒进入过载保护状态。

由于现代新型的差压变送器内的传感器特殊设计的过载保护结构，使得它具有优秀的单向过压性能，即使过压 16MPa，也能完全恢复而不留痕迹^[5]。

开平方运算放在差压变送器内进行较有利

在差压式流量计中，不可避免地要进行开平方运算，在变送器和二次表中，开平方运算都是由单片机完成的，所以不管开平方运算是在差压变送器中完成还是在流量二次表中完成，开平方运算本身都不增加误差，因为都是数字量运算。但是，差压变送器测得的差压值（数字量）经 D/A 转换成 4 ~ 20mA，送入流量二次表后再经 A/D 转换成数字量的过程中，要损失二次精度。从图 1 可看出，在开平方的过程中，经无量纲化处理的信号，其幅值总是得到放大，例如 1%FS 的流量值，幅值放大了 10 倍，而较大幅值的模拟信号在转换和传送过程中，损失的精度相对要小些，因此，在用模拟信号传送此信号时，开平方运算放在差压变送器中完成较合理。

如果采用数字信号传送此信号，则无上述差异。

用数字信号传送差压信号

现在市场上销售的差压变送器，大多数已实现智能化。在差压变送器中，膜盒感知的未经处理的差压信号，由数字运算部分进行温度补偿、静压补偿、非线性补偿等处理之后，可以数字通讯的方式输出，也可经 D/A 转换将此数字信号转换成 4~20mA 信号，然后输出。

后级仪表流量演算器如果以数字通讯的方法接受差压信号，则完全不损失精度。而如果以其模拟输入口接受差压信号，则由于 D/A 和 A/D 的两次转换，损失相应的精度。这种精度的损失，在相对流量高的区间，影响约为 0.3%，但在相对流量低的区间，影响显著增大，相对流量越小，影响越小。所以推荐用数字量传送差压信号。

7. 结束语

双量程差压式流量计的关键是提高相对流量较小时的差压测量精确度，但须同时进行流出系数非线性补偿和可膨胀性系数校正，才能使小流量时的系统精确度进一步提高。

合理确定高低量程测量范围，才能满足用户对系统精确度、范围度和允许压损的要求。

在结构设计上应注意差压信号的传递失真，在相对流量较小时，这一点至关重要。

将开平方运算放在差压变送器内进行和用数字通信的方法传递差压（流量）信号，对提高系统精度和拓宽范围度，都有显著效果。

增设一台低量程差压变送器组成双量程差压流量计，是一种实施简单、花费不多、效果很好的方法，已在现场广泛使用。

参考文献

1. ISO5167-2 (2003E) Measurement of fluid by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full-part2: orifice Plates
2. ISO/TR 5168: 1998 Measurement of fluid flow-Evaluation of uncertainties
3. 王建忠, 纪纲. 差压流量计范围度问题研究. 自动化仪表, 2005(8)
4. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧. 北京: 化学工业出版社. 2003
5. 横河电机公司. EJA 智能变送器选型样本. 2005

（摘自《石油化工自动化》2009 年第 2 期：54-57 页）