

# 新型差压流量计的结构与性能研究

纪波峰, 纪纲 上海同欣自动化仪表有限公司 (200070)

**摘要:** 尽管流量计的种类有一百种, 但由于被测流体的复杂性、要求的多样性和使用条件的特殊性, 直到现在仍有很多流量测量任务, 未能实现满意的测量。为此, 研究者还在坚持不懈地努力, 开发新型的流量计或改进现有的产品。本文所述的四种新型差压流量计中, 双量程差压流量计, 采用增设低量程差压变送器的方法, 提高量程低端的差压测量准确度, 从而提高量程低端流量测量准确度, 扩大量程比。双向孔板流量计, 是采用孔板不削斜角等方法, 实现双向流量测量。湿气体流量计, 是采用偏心孔板和弃用针形阀三阀组等方法, 消除积液带来的误差。耐腐蚀弯管流量计, 是采用新型氟塑料喷涂的方法, 提高耐腐蚀能力, 并用吹气和弯管管外伴热保温的方法防止介质的结晶和自聚, 从而提高系统的可靠性和延长使用寿命。

**关键字:** 新型流量计 双量程流量计 双向孔板流量计 湿气体流量计 耐腐蚀 介质结晶 自聚

## Research on structure and performance of the new differential pressure flowmeter

**Abstract:** Although there are more than one hundred kinds of flow meters, due to the complexity of the fluid, the diversity of requirements and the particularity of the conditions of use, many flow measurement tasks have not yet achieved satisfactory results. For this purpose, researchers are working hard to develop new flow meters or to improve existing products. Four new differential pressure flow meters described in this paper, adding a low-range differential pressure transmitter in the dual-range differential pressure flowmeter to improve the differential pressure measurement accuracy in the low range, thereby improving the accuracy of the low-range flow measurement and expanding the turndown ratio. The two-way orifice flowmeter is a two-way flow measurement by using a plate without cutting the bevel. The wet gas flowmeter uses a method such as an eccentric orifice plate and a disposable needle valve three-valve to eliminate the error caused by the liquid accumulation. Corrosion-resistant elbow flowmeter use new fluoroplastic coating method to improve corrosion resistance, and prevent crystallization and self-polymerization of medium by blowing air and heat insulation outside the pipe, thereby improving system reliability and prolonging service life.

**Key words:** new flowmeter dual range flowmeter two-way orifice flowmeter wet gas flowmeter corrosion-resistant medium crystallization self-polymerization

## 1. 引言

在流量测量中, 由于被测流体的复杂性, 要求的多样性, 使用条件的特殊性。尽管现在流量计的种类已有一百种, 但在现场仍有许多测量任务找不到满意的流量计, 于是工程师们还在不断研究和改进, 推出新型流量计。

差压式流量计是历史最悠久, 使用最广泛, 积累的资料最丰富的一类流量计。其中, 标准孔板、喷嘴和文丘里管差压装置, 已经实现标准化, 无需实流标定就能获得规定的准确度<sup>[1][2]</sup>。

在标准差压流量计之外, 又陆续出现了几十种非标差压流量计, 它们都是为了弥补标准差压流量计的不足而开发的。其中有的能解决低雷诺数问题; 有的能解决介质脏污问题; 有的能解决微小流量问题; 有的能解决低压损问题<sup>[3]</sup>……。改进还在继续, 下面所举的四个例子, 就是近十年以来, 差压式流量计改进的新成果中的一部分。在本文所述的几项成果中, 差压装置是以前就有的, 只是在系统结构上做了某些改进, 但实际效果是显著的。

## 2. 双量程差压流量计

### 2.1 双量程差压流量计工作原理

差压式流量计(除线性孔板之外)有它固有的缺陷, 即范围度不够理想, 这主要是由其测量原理决定的。

差压流量计的一般表达式为:

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

式中： $q_m$ 为质量流量，kg/s； $C$ 为流出系数； $\varepsilon_l$ 为节流件正端取压口平面上的可膨胀性系数； $d$ 为工作条件下节流件的开孔直径，m； $\Delta p$ 为差压，Pa； $\rho_l$ 为节流件正端取压口平面上的流体密度，kg/m<sup>3</sup>； $\beta$ 为直径比， $\beta = d/D$ ； $D$ 为管道内径，m。

由式(1)可知<sup>[1]</sup>，流量 $q_m$ 与差压 $\Delta P$ 的平方根成正比。因此，当 $q_m=10\%q_{mmax}$ 时，差压 $\Delta P$ 仅为差压上限 $\Delta P_{max}$ 的1%。

现在差压式流量计中所配用的差压变送器，大多已达到0.04级。不少人以为0.04级差压变送器就能获得0.04%的差压测量不确定度，已达到足够的测量精确度。其实不然，因为差压变送器的精确度等级是用引用误差表示的，只有在满量程附近才能得到最小的不确定度，而且测量值(MV)越低，不确定度越大。例如在 $\Delta P=1\%\Delta P_{max}$ 这一点，不确定度增大到满量程时不确定度的100倍。所以，在相对流量很小时，差压测量不确定度就成为流量测量系统的不确定度的决定因素<sup>[4]</sup>。

为了提高流量量程低端的测量精确度，必须大大提高低差压段的差压测量精确度，其中较为省力、有效的方法是增设一台低量程差压变送器，组成双量程差压流量计<sup>[5-6]</sup>。

例如有一气体流量测量对象，最大流量100t/h，最小流量3t/h。对此，高量程差压变送器选用0.04级中差压变送器，测量范围0~100kPa，低量程差压变送器选用0.04级低差压变送器，测量范围设定为0~3kPa。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，在流量量程3~100%范围内，能达到1%的流量不确定度。

## 2.2 双量程差压流量计不确定度分析

文献[4]详细分析了双量程差压流量测量系统不确定度的估算方法和估算实例。在差压变送器准确度等级为0.04，即 $\xi_{\Delta p}=0.04\%$ 时。将 $\xi_{\Delta p}$ 值代入差压测量不确定度计算公式<sup>[7]</sup>：

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

式中： $\xi_{\Delta p}$ 为差压变送器精确度等级； $\Delta p_{max}$ 为差压上限，Pa； $\Delta p$ 为常用流量对应的差压，kPa。

将 $\frac{\delta\Delta p}{\Delta p}$ 计算结果代入式(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：

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

式中： $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 为流量测量不确定度； $\frac{\delta C}{C}$ 为流出系数不确定度； $\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}$ 为可膨胀性系数不确定度； $\frac{\delta D}{D}$ 为管道内径不确定度； $\frac{\delta d}{d}$ 为孔板开孔直径不确定度； $\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$ 为差压测量不确定度； $\frac{\delta \rho_l}{\rho_l}$ 为孔板正端取压口处流体密度不确定度。

在采用式(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， $\frac{\delta \rho_l}{\rho_l}$ 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，常取其值为0.5%。按照GB/T 2624-2006， $\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}$ 用式(4)计算：

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

式中： $P_1$ 为节流件正端取压口处常用压力，kPa； $\kappa$ 为等熵指数。

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

以下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 $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 计算公式后得

到的计算结果。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：

$$\frac{\delta\Delta p}{\Delta p} = 0.054\%$$

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

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

依此方法，可得其余各特征点的流量不确定度。

② 在  $q_m = 100\% q_{mmax}$  特征点， $\frac{\delta q_m}{q_m} = 0.51\%$ 。

③ 在  $q_m = 17.32\% q_{mmax}$  特征点， $\frac{\delta q_m}{q_m} = 0.67\%$ 。

④ 在  $q_m = 3\% q_{mmax}$  特征点（低量程差压变送器有效）， $\frac{\delta q_m}{q_m} = 0.67\%$ 。

⑤ 在  $q_m = 1\% q_{mmax}$  特征点（低量程差压变送器有效）， $\frac{\delta q_m}{q_m} = 2.0\%$ 。

### 2.3 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，即可得不确定度曲线。双量程孔板流量计不确定度曲线如图 1 所示<sup>[8]</sup>。

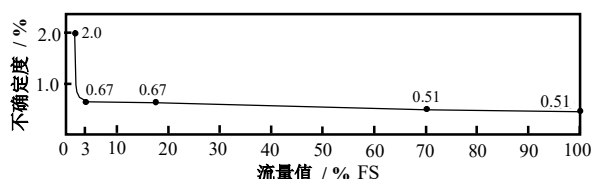


图 1 双量程孔板流量计不确定度曲线

## 3. 双向孔板流量计

### 3.1 双向流测量的特殊性

能够用于双向流测量的流量计，有容积式流量计、涡轮流量计、电磁流量计、热式流量计、科里奥利质量流量计等多种，但若被测流体为蒸汽，因流体温度高等原因，上述这几种流量计均无法适应。这时，采用双向孔板流量计，具有显著的优越性。

而在另一些流程中，有时会遇到一些空气、氮气等一般气体的双向流测量需求。双向孔板流量计也具有优势。

### 3.2 双向孔板流量计工作原理

在国家标准 GB/T 2624-2006 中，双向孔板有详细的规定，与普通孔板流量计相比，具有以下特殊之处<sup>[1]</sup>。

#### (1) 双向孔板。

- ① 孔板不切斜角。
- ② AB 两个端面均应符合国标中关于上游端面的规定。
- ③ 节流孔的两个边缘均应符合上游边缘的规定。

单向孔板如图 2 (a) 所示，双向孔板如图 2 (b) 所示。

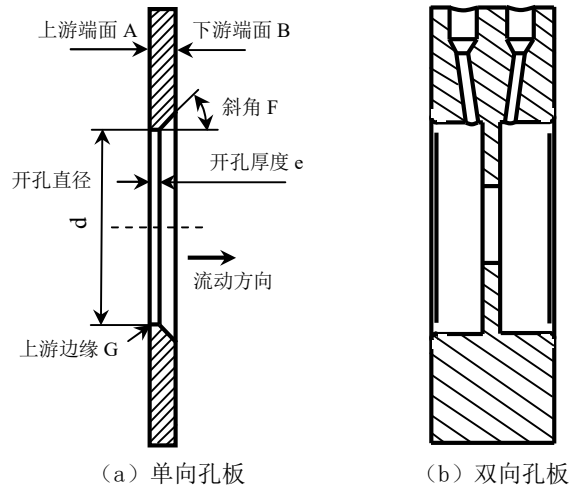


图 2 孔板示意图

**(2) 对直管段的要求。**

仪表的两个直管段，都应满足国家标准中前直管段的要求。

**(3) 正端取压口压力  $P_1$  的计算。**

仪表的节流件正端取压口压力  $P_1$ ，用压力变送器测量<sup>[9]</sup>。该变送器安装在正向流的正端取压口。在流体反向流动时，该点压力变成了反向流的负端取压口。根据正端取压口压力、负端取压口压力和差压的定义，可知：

$$P_1' = P_1 + \Delta p'$$

式中： $P_1'$  为反向流正端取压口压力，Pa； $P_1$  为正向流正端取压口压力，Pa； $\Delta p'$  为反向流差压，Pa。

其实  $P_1'$  就是正向流的负端取压口压力，只因该点未安装压力变送器，所以，只能用间接的方法得到。

**(4) 正负差压的测量。**

双向孔板输出的正反向差压信号，通常采用一台具有正负差压测量能力的差压变送器测量。

其中，正差压对应正向流量，负差压对应负向流量。正负差压测量结果可用 HART 通信的方法传送到流量二次表<sup>[10]</sup>。双向孔板流量计系统如图 3 所示。

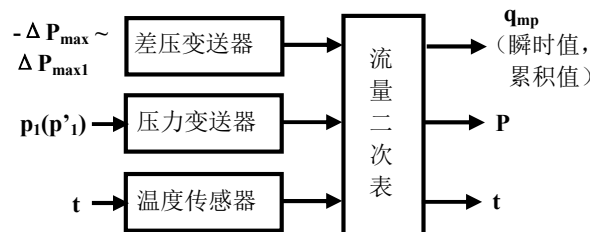


图 3 双向孔板流量计系统示意图

**(5) 流量显示装置的功能。**

用于双向蒸汽流量测量的流量显示装置，应对流动方向作出判断，而且需对正向瞬时流量、正向累积流量、反向瞬时流量、反向累积流量分别进行计算和显示。

除此之外，流量显示装置还需完成流体温度压力补偿、流出系数自动补偿和可膨胀性系数自动补偿等任务。

## 4. 湿气体用差压流量计

常见的湿气体有湿空气、湿煤气、煤层气、井口气、吸收尾气等。人们在测量低静压、低流速、大口径的湿气体流量以及气态氨之类的流体流量时，普遍选用标准差压流量计。但使用一段时间后，经常发现冷凝液在节流件前聚积、在三阀组通道内聚积、在差压变送器高低压室内聚积，引起流量计严重失准。针对这一问题，人们开发了湿气体流量计，主要作了以下三点改进。

- ① 用偏心孔板代替标准孔板，从而杜绝节流件前积液。
- ② 用不锈钢球阀代替针形三阀组，从而杜绝三阀组内积液。
- ③ 将差压变送器布置在差压装置上方，遇有高低压室内生成冷凝液时，依靠冷凝液与气体的密度差，让冷凝液自行流回母管。

经改进的流量计，在含冷凝液的气体流量测量对象中使用，效果极好，从未发生过冷凝液聚积引起的失准。

图 4 所示为 FDIh 型湿气体差压流量计外形图。



图 4 FDIh 型湿气体流量计外形（偏心孔板）

## 5. 耐腐蚀型弯管流量计

### 5.1 腐蚀性介质测量任务的特点

弯管流量计投入现场应用已有几十年的历史。它的显著优点是无压力损失，运行能耗低<sup>[1]</sup>。但对于强腐蚀介质，普通弯管流量计仍不适用。因为对于强腐蚀介质，采用 316L 材质制成的弯管流量传感器也会很快被腐蚀掉。

在流量测量中，被测介质多种多样，介质特性异常复杂。一台品质一流的流量计，有时因为对介质的某一个特性认识不够准确，会导致无法实现正常测量或很快损坏。

例如介质脏污容易将差压信号取压口堵塞。介质结晶容易在法兰膜片隔离式差压变送器中的敏感膜片上，生成一层结晶物，以致无法测量。

介质的低静压，由于达不到足够的流速，以致耐腐蚀性很好的科氏力质量流量计无法实现正常测量。

为了解决此类特殊介质流量测量问题，耐腐蚀型弯管流量计应运而生。

### 5.2 耐腐蚀型弯管流量计的结构

耐腐蚀型弯管流量计由耐腐蚀弯管流量传感器和带吹气差压变送器组成。带温度压力补偿时，还配有温度传感器（管外安装）和压力变送器、流量演算器等。其中，压力变送器接在差压变送器正压端。

- ① 弯管流量计中，与介质接触的是弯管流量传感器，因此，防堵、防结晶、防介质自聚、耐腐蚀等问题，都得在此传感器中解决。

弯管内壁与腐蚀性介质接触的部分，采用氟塑料喷涂。在强腐蚀介质工艺流程中，工艺管道大多采用衬玻璃或衬氟塑料的方法。依次类推，弯管流量传感器的材质采用 316L，并在其内壁及与被测介质接触的其他部分，采用喷涂氟塑料的方法，是一种简单、有效的方法。

研究发现，以前在防腐蚀领域广泛使用的 F46 材料，虽然能耐一般腐蚀，但氯离子之类的物质，仍能渗透内衬将金属材料腐蚀。而新型氟塑料却只有微小的渗透性。

② 耐腐蚀型弯管流量计采用聚四氟乙烯管传输差压信号。

③ 耐腐蚀型弯管流量计采用氮气吹气的方法，将微差压变送器（或低差压变送器）与腐蚀性介质隔离，并可防止脏污介质堵塞取压口。

④ 弯管传感器采用电伴热，从而避免自聚物和结晶物的生成。

⑤ 弯管流量传感器采用法兰连接，以便于拆装和对脏污介质的清洗。

弯管流量传感器的外形如图 5 所示。

现场使用实践表明，上述措施是有效的。



图 5 耐腐蚀型弯管流量传感器

### 5.3 超声流量计在腐蚀性介质中的应用

外夹式超声流量计在腐蚀性介质流量测量中，具有独特的优势。该流量计不与腐蚀性介质直接接触。但由于声阻抗的约束条件，被测气体的压力必须高于一定值才能实现正常测量。例如 GC868 型外夹式超声流量计，被测气体压力一般需高于 0.6MPa；而弗莱克森公司外夹式超声流量计，此压力一般应高于 0.4MPa。

对于带非金属内衬的管道，用超声流量计测量管内介质流量，仪表制造厂总是强调在内衬与金属管之间不能有气隙，但是在实际的内衬管，在内衬与金属管之间，无法保证完全没有气隙。

## 6. 结束语

在流量测量中，被测流体的复杂性，要求的多样性和工况的特殊性，为测量带来了困难。但这些特点也推动了这门技术的发展。于是，流量计种类虽然已经有了一百多种，但每年仍有新型流量计问世。

标准差压式流量计量程比不够宽，主要制约因素是量程低端差压测量精确度。在原有差压流量计的基础上，增设一台低量程差压变送器，藉以提高量程低端的差压测量准确度，构成双量程差压流量计，就可大大拓宽量程比。

标准孔板不切斜角后就可测量双向流量。在气体和蒸汽的双向流测量中，标准孔板双向流量计具有显著的优越性。

在湿气体流量测量中，孔板前积水、三阀组内积水和差压变送器高低压室内积水的现象普遍存在。针对这三个问题做了改进后的湿气体流量计，可靠性和准确度大大提高。

强腐蚀、易结晶、低静压介质的流量测量，具有较高难度。采用新型氟塑料喷涂的弯管流量传感器，配以吹气和伴热保温等措施，能使问题得到解决。

## 参考文献

1. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国国家标准化管理委员会. 用安装在圆形管道中的差压装置测量满管流体流量: GB/T 2624-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007

2. 全国流量容量计量技术委员会.差压式流量计检定规程:JJG 640-2016 [S].北京:国家质量监督检验检疫总局,2017.
3. 蔡武昌,孙淮清,纪纲.流量测量方法和仪表的选用[M].北京:化学工业出版社, 2001.
4. 纪纲,纪波峰.流量测量系数远程诊断集锦[M].北京:化学工业出版社, 2012.
5. 纪纲.流量测量仪表应用技巧[M].二版.北京:化学工业出版社, 2009.
6. 王建忠,纪纲.差压式流量计范围度问题研究[J].自动化仪表, 2005,(8): 4~6.
7. 石油工业油气计量及分析方法专业标准化技术委员会.用标准孔板流量计测量天然气流量:GB/T 21446-2008[S].北京:国家质量监督检验检疫总局,2008.
8. 张宝良,张恩科,纪波峰,等.提高孔板流量计精确度的研究[J].石油化工自动化,2017, 53(4): 48~51.
9. 叶非,叶海青,纪纲.双向蒸汽流量的测量[J].石油化工自动化,2012, 48(2): 56~59.
10. 张宝良,纪波峰,纪纲.基于 HART 总线的双量程差压流量计[J].自动化仪表,2016,37(8): 93~95.
11. 苏彦勋,梁国伟,盛健.流量计量与测试[M].二版..北京:中国计量出版社. 2007.

本文源自于一自动化仪表 2019.4