

# 气体的膨胀性对流量测量的影响及对策研究

孙江平, 戴铮 上海飞机设计研究院 (201210)

蔡方明 斯派莎克工程(中国)有限公司 (201114)

纪纲, 纪波峰 上海同欣自动化仪表有限公司 (200070)

**摘要:** 流体流过某几种流量计, 都会产生一定的压力降, 因而引起出口静压降低。当被测流体为气体(含水蒸气)时, 由于气体的膨胀性, 这种静压的降低导致气体体积(流束)膨胀, 往往会引起流量测量误差。文中分析了标准孔板流量计、喷嘴流量计、线性孔板流量计、V 锥流量计、浮子流量计、涡街流量计的气体膨胀影响, 并给出了在流量二次装置中实现可膨胀性系数自动补偿方法。

**关键词:** 流量测量 气体膨胀 可膨胀性系数  $\epsilon$  自动补偿 内锥流量计

## Study on impact and countermeasure of expansion of gas on flow measurement

Sun jiangping, Dai zheng Shanghai aircraft design and research institute (Shanghai 201210)

Cai fangming Spirax Sarco engineering (China) Co., Ltd. (Shanghai 201114)

Ji gang, Ji bofeng Shanghai tontion automation instrumentation Co., Ltd. (Shanghai 200070)

**Abstract:** Fluid will produce a certain pressure drop when pass through some kind of flowmeter, and static pressure decreases at flowmeter outlet. If fluid is gas (steam), the static pressure decrease results in gas volume expansion, often cause flow measurement error. The article analyzes impacts of gas expansion of orifice, nozzle, linear orifice, V cone flowmeter, float flowmeter and vortex flowmeter, and provide a auto compensation method of expansibility factor in flow computer.

**Key words:** flow measurement expansion of gas expansibility factor  $\epsilon$  auto compensation cone flowmeter

## 1 从内锥流量计误差变化谈起

中国商飞将一台计量检定机构检定合格的内锥流量计, 放在正压法空气流量标准装置上复校, 流程如图 1 所示。将出口阀  $V_4$  关小使  $P_2$  升高到 0.2MPa 以上时, 误差为+1.5%。而将  $V_4$  开大使  $P_2$  降到 0.02MPa 时, 误差增大到+6.5%。该问题的存在, 严重影响试验的有效性。

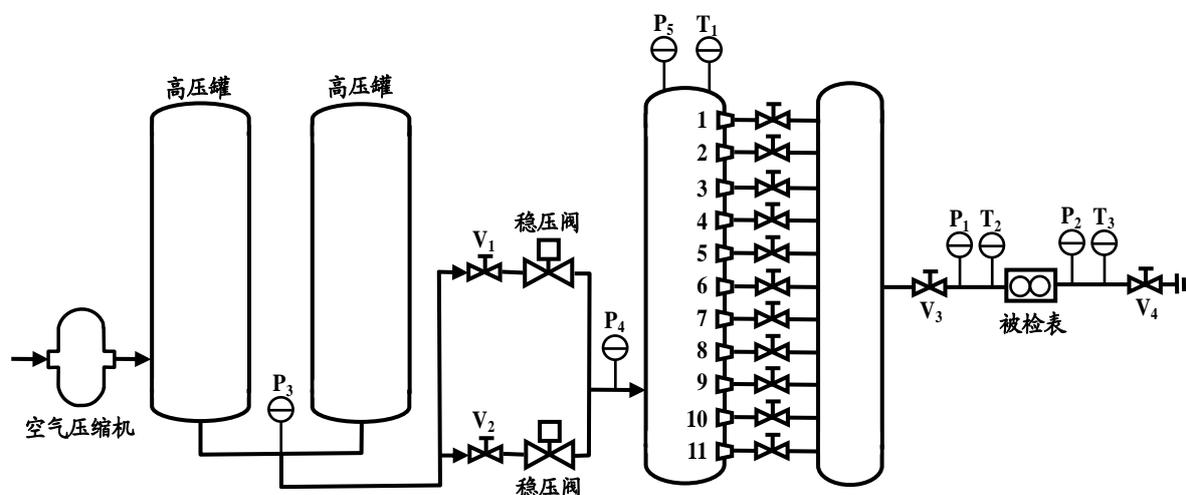


图 1 正压法空气流量检定系统(音速喷嘴)

后来咨询了专业人士，认为这是因为内锥流量计用来测量气体流量时，存在气体膨胀性影响。可膨胀性系数  $\varepsilon_1$  与流量计后静压-流量计前静压之比有关，即<sup>[1]</sup>

$$\varepsilon_1 = f(\beta, \kappa, P_2/P_1) \quad (1)$$

式中  $\varepsilon_1$  —— 可膨胀性系数，纯数；  
 $\beta$  —— 节流件直径比，纯数；  
 $\kappa$  —— 等熵指数，纯数；  
 $P_2$  —— 差压装置负端取压口绝对静压，Pa；  
 $P_1$  —— 差压装置正端取压口绝对静压，Pa。

分析这一实例，因为在《差压式流量计计量检定规程》中，完全没有提到可膨胀性问题<sup>[2]</sup>。在《流量积算仪计量检定规程》中，也完全没有提到可膨胀性问题<sup>[3]</sup>。但是这个问题是客观存在的。因此，用户要自己注意。

类似的事情在标准孔板流量计上也有发生。

浙江宁波北仑地区，有两热力公司联合对一个大用户供汽，在两个供方和一个需方的管道上各装有一套相同规格的孔板流量计，测量范围均为 0~100t/h。系统图如图 2 所示。

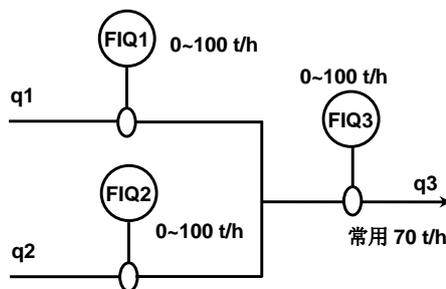


图 2 蒸汽计量系统图

据热力公司介绍，图中  $q_1$  对  $q_3$  单独供汽，两台表示值基本相符。 $q_2$  对  $q_3$  单独供汽，两台表示值也基本相符，但两个供方联合对  $q_3$  供汽时， $q_1$  和  $q_2$  之和比  $q_3$  小 1.5~3%<sup>[4]</sup>。

为什么会这个情况？经细致分析发现：

① 由  $q_1$  单独向  $q_3$  供汽或由  $q_2$  单独向  $q_3$  供汽时，两套表均工作在较理想的区间，约为满量程流量的 60~80%。而且两套表又是相同规格，两套表之间示值基本相符是应该的。

② 在  $q_1$  和  $q_2$  联合对  $q_3$  供汽时， $q_3$  仍然运行在较理想的区间，偏离常用流量不远，但  $q_1$  和  $q_2$  实际使用区间比常用流量低得多。其对应的差压值只有常用流量的 1/4。此时，流出系数  $C$  的非线性约引起仪表示值偏低 0.1%，可膨胀性系数非线性约引起仪表示值偏低 1.5%<sup>[4]</sup>。

## 2 气体的膨胀性与流量计中的可膨胀性系数

以差压式流量计为例，其流量方程式如式 (2) 所示。

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

式中  $q_m$  —— 质量流量，kg/s；  
 $C$  —— 流出系数；  
 $\beta$  —— 直径比， $\beta = d/D$ ；  
 $D$  —— 管道内径，m；

$\varepsilon_1$  —— 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；

$\Delta p$  —— 差压，Pa；

$\rho_1$  —— 节流件正端取压口平面上的流体密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

在用差压式流量计测量液体流量时，由于液体可以认为是不可压缩流体，所以式中的  $\varepsilon_1$  始终为 1，这样， $\varepsilon_1$  的不确定度  $\frac{\delta\varepsilon_1}{\varepsilon_1}$  即为 0，而且由于工况条件下的流体密度  $\rho_1$  受温度的影响也很小，一般不需要进行温度补偿。因此，流量测量准确度也可高一些。

但是在用差压式流量计测量气体流量时，情况发生了变化。

由于气体的膨胀性，在压力变化时，式（2）中的  $\rho_1$  和  $\varepsilon_1$  两个变量均产生相应的变化：

① 压力变化引起气体密度  $\rho_1$  变化。

② 压力变化（另外还有压差  $\Delta P$  的变化）引起可膨胀性系数  $\varepsilon_1$  变化。

对于第①种变化，人们早就非常重视，并引入温度、压力补偿予以解决。这种补偿的实质是补偿因流体温度、压力变化引起的流体密度变化对流量测量结果的影响。

但是对于  $\varepsilon_1$  的变化，人们往往重视不够，或因关系复杂，生怕应用不当而带来损失，象图 2 所示的例子就属后者。

气体的膨胀性及可膨胀性系数可作如下描述：

差压式流量计（孔板、喷嘴、文丘里管等）在用来测气体和蒸汽流量时，流体流过差压装置，在节流件两边都要产生一定的压差，节流件的下游静压降低，因而出现流束膨胀，流束的这种膨胀使得差压装置的输出（差压）—输入（流量）关系同不可压缩流体之间存在一定的偏差，如果不对这种偏差进行校正，将会导致流量示值偏高千分之几到百分之几，在  $\beta$  和  $\Delta p / P_1$  均较大的情况下甚至可达 10% 的误差。可膨胀性系数(expansibility factor)  $\varepsilon$  就是为修正此偏差而引入的变量。ISO 4006 中对气体可膨胀性系数定义为：在计算可压缩流体流量时，考虑膨胀性的一个系数<sup>[5]</sup>。

人们很早就已发现气体的可膨胀性会给差压式流量带来误差，但在模拟仪表时代，由于关系复杂，只能爱莫能助。所以在 GB 2624-81 中，只能将  $\varepsilon$  当常数来处理，并命名为“被测介质的膨胀校正系数”<sup>[6]</sup>。直到 GB 2624-93（ISO 5167:91）中，才给出了  $\varepsilon_1$  的计算公式<sup>[7]</sup>。

这些模型都是经验模型，是在大量实验的基础上建立起来的。

由于节流件种类不同，可膨胀性系数模型也有很大差异。

对于标准孔板， $\varepsilon_1$  公式如式（3）所示<sup>[8][9]</sup>：

$$\varepsilon_1 = 1 - \left( 0.351 + 0.256 \beta^4 + 0.93 \beta^8 \right) \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\kappa} \right] \quad (3)$$

式中： $\varepsilon_1$  —— 节流件正端取压口可膨胀性系数；

$P_2$  —— 节流件负端取压口流体绝对静压，Pa；

$P_1$  —— 节流件正端取压口流体绝对静压，Pa；

$\kappa$  —— 等熵指数。

对于 ISA1932 喷嘴、长径喷嘴和文丘里管，可膨胀性系数可由式（4）求得<sup>[8][9]</sup>。

$$\varepsilon_1 = \left[ \left( \frac{\kappa \tau^{2/\kappa}}{\kappa - 1} \right) \left( \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \tau^{2/\kappa}} \right) \left( \frac{1 - \tau^{(\kappa-1)/\kappa}}{1 - \tau} \right) \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中： $\varepsilon_1$ ——节流件正端取压口可膨胀性系数；

$\kappa$ ——等熵指数；

$\tau$ ——压力比， $\tau = P_2/P_1$ ；

$P_2$ ——节流件负端取压口流体绝对静压，Pa；

$P_1$ ——节流件正端取压口流体绝对静压，Pa；

$\beta$ ——直径比。

这些模型的建立和完善，是全球最著名的十几个实验室，付出巨大的人力、物力、财力，经过多年的努力，获得大量的试验数据，并在国际标准化组织的推动下，采用数学回归分析的方法拟合得到的，从而提高了 ISO 5167:2003 的技术水平，所以，很不容易。

### 3 非标差压流量计的可膨胀性系数

#### 3.1 线性孔板流量计的可膨胀性系数

非标差压流量计就没有标准差压流量计那么幸运了。因为没有国际力量的助力，只能依靠自己的力量完成建模。在这方面，斯派莎克公司是卓有成效的。该公司的专利产品弹性加载可变面积可变压头孔板流量计，俗称线性孔板流量计，由于各个不同通径的流量计，其节流件直径比  $\beta$  都取 0.6124，因此  $\beta$  即为常数。在被测流体为蒸汽时，等熵指数  $\kappa = 1.30$ ，从而使可膨胀性系数  $\varepsilon_1$  只与  $\Delta P/P_1$  有关。

他们经过试验取得数据，建立了自己的经验模型<sup>[10]</sup>：

$$\varepsilon_1 = 1 - 0.3206 \frac{\Delta P}{P_1} \quad (5)$$

式中  $\varepsilon_1$ ——可膨胀性系数；

$\Delta P$ ——差压，Pa；

$P_1$ ——节流件正端取压口绝压，Pa。

在式（5）中，差压  $\Delta P$  由式（6）计算得到：

$$\Delta P = \frac{I_{\Delta P} - 4mA}{16mA} \Delta P_{\max} \quad (6)$$

式中  $\Delta P$ ——差压，Pa；

$I_{\Delta P}$ ——差压变送器输出的电流，mA；

$\Delta P_{\max}$ ——差压上限，各种通径均取 49.8 kPa。

此项计算，在他们的专用流量计算机 M841 中完成。

#### 3.2 内锥流量计的可膨胀性系数

内锥流量计是一种年轻的而又结构独特的非标差压流量计，在页岩气、煤层气等湿气体的流量测量中，具有独特的优势。

内锥流量计的可膨胀性系数的研究，近年来也取得了不小的进展，其中天津大学建立的模型具

有很高的精度<sup>[1]</sup>。

$$\varepsilon_1 = 1 - (0.7428 + 0.5531\beta^4) \frac{\Delta P}{\kappa P_1} \quad (7)$$

式中  $\Delta P$  —— 差压, Pa;

其余的  $\varepsilon_1$ 、 $\beta$ 、 $\kappa$ 、 $P_1$  与式 (3) 同。

该公式是在特定前锥角和后锥角的 L 型悬臂内锥样机上, 经实流试验得到的<sup>[1]</sup>。

从其对流量测量结果的影响分析, 大约比标准孔板大 80% 左右, 所以引起人们的注意, 绝不能等闲视之。

#### 4 可膨胀性系数校正的实现

自从 CPU 应用到工业仪表后, 流量测量技术发生了革命性的变化。本来很复杂的算法, 在模拟式仪表中根本无法想象, 但在智能化流量仪表中, 变得轻而易举。例如在典型的流量二次表 FC6000 中 (当然在 DCS 中也可实现), 用图 3 所示的框图, 就可实现各种差压式流量计可膨胀性系数的自动校正<sup>[4]</sup>。

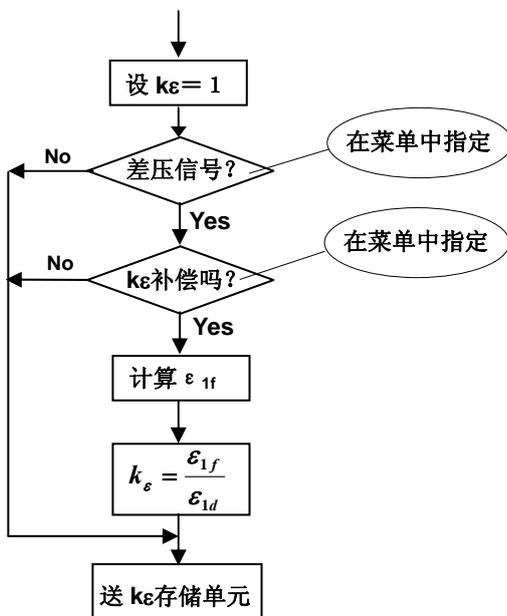


图 3  $k_\varepsilon$  计算框图

典型菜单如图 4 所示。在填入  $\varepsilon_d$  (设计状态  $\varepsilon$  值)、 $\beta$ 、 $K$  值并指定节流件种类后, 就可实现  $\varepsilon$  的自动校正。

项 目	描 述	缺省值
5.6 <b>Q: 流束膨胀系数</b> <b>补偿 <math>K_\varepsilon</math></b> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">           不要            ▲ 孔板            ▼ 喷嘴文丘里            内锥         </div>	选择要否流束膨胀系数补偿及节流件的种类	孔板
5.7 <b>34 设计状态流束膨</b>	写入设计状态流束膨胀系数	1.00000

	胀系数 $\varepsilon_d$		
5.8	35 节流件直径比 $\beta$	写入节流件开孔直径与管道内径之比	0.50000
5.9	36 气体等熵指数 $\kappa$	写入被测气体等熵指数	1.30000

图4 典型  $\varepsilon_1$  自动校正菜单

有了  $\varepsilon$  自动校正之后，人们关心的下一个问题是校正精度的检验。欲完成此项工作，必须先人工计算出校正系数  $k\varepsilon$  应有值（或理论值），如果  $\varepsilon_1$  计算公式较简单，如内锥公式，人工计算并不费力，如果计算公式较复杂，可查阅 GB/T 2624-2006 中的可膨胀性系数  $\varepsilon$  值进行校验<sup>[8]</sup>。

## 5 其他流量计的气体可膨胀性影响

人们研究了气体可膨胀性对差压式流量计影响，其实，还不仅仅是差压流量计。浮子流量计用来测量气体流量时，也存在气体可膨胀性系数影响。

### 5.1 气体可膨胀性对浮子流量计的影响

浮子流量计流量方程如式（8）所示<sup>[12]</sup>。

$$Q = \alpha \varepsilon \Delta F \sqrt{\frac{2gV_f(\rho_f - \rho)}{\rho F_f}} \quad (8)$$

式中  $Q$  —— 体积流量， $m^3/s$ ；

$\alpha$  —— 仪表的流量系数，因浮子形状而异；

$\varepsilon$  —— 被测流体为气体时气体膨胀系数；

$\Delta F$  —— 流通环形面积， $m^2$ ；

$g$  —— 当地重力加速度， $m/s^2$ ；

$V_f$  —— 浮子体积，如有延伸体亦应包括， $m^3$ ；

$\rho_f$  —— 浮子材料密度， $kg/m^3$ ；

$\rho$  —— 被测流体密度，如为气体是在浮子上游横截面上的密度， $kg/m^3$ ；

$F_f$  —— 浮子工作直径（最大直径）处的横截面积， $m^2$ ；

从式（8）可知， $\varepsilon$  也在起作用，只是因为浮子式流量计的定压降特性，以致在全量程范围内， $\varepsilon$  接近一个常数，而且在出厂校验时，已经将  $\varepsilon$  引起的误差予以校正，所以用户感觉不到它的存在。

### 5.2 气体可膨胀性对涡街流量计的影响

人们极少讨论气体可膨胀性对涡街流量计的影响，但是有多项实验表明，涡街流量计用水标定出来的流量系数  $K$ ，在空气流量标准装置上复校，发现流量系数变掉了。

天津大学许文达等研究了气体可膨胀性对涡街流量计流量系数的影响，得出的结论是：随着流速的增高，流量系数  $K$  相应增大，与水流量标准装置上标定得到的流量系数相比，在空气流量标准装置上测试，在  $V = 60 m/s$  时， $K$  增大了 1.54%<sup>[13]</sup>，由此可见，不能忽视。

横河公司用“误差告知”的方法解决这一问题。

横河公司在其产品样本和使用说明书中承诺，其 DY 型数字式涡街流量计，当被测流体为液体时，精确度为  $\pm 0.75\%$ ；当被测流体气体时，若流速  $\leq 35m/s$ ，精确度为  $\pm 1.0\%$ ；若流速  $> 35m/s$ ，精度为  $\pm 1.5\%$ 。而且在其产品中设计了一个“可压缩性补偿”功能选项，若选择“要”，则可进行此项补偿。但从式（1）可知，可膨胀性补偿的补偿量与  $K$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  有关，而  $P_2$  又与密度  $\rho$  有关，

由于变量较多，所以难以做到精确补偿。

## 6 结束语

① 流体流过差压式流量计等几种流量计，都会产生一定的压力降，因而引起出口静压降低。当被测流体为气体（含水蒸气）时，由于气体的可膨胀性，这种静压的降低导致气体体积（流束）膨胀，往往会引起流量测量误差。引入可膨胀性系数  $\epsilon$ ，就可对这种误差进行校正。

② 人们对已经实现标准化的差压流量计的可膨胀性系数的研究，已经进行了好几十年，经过多次改进，精度已经很高。其中喷嘴和文丘里管的可膨胀性系数模型与标准孔板的模型差异很大，仪表使用中，不能搞错。

③ 由于差压检测件的种类很多，结构的差异也很大，可膨胀性系数模型各不相同。非标差压流量计，不能随意套用标准差压流量计模型。

线性孔板采用经验模型，收到良好的效果。天津大学的内锥流量计  $\epsilon$  模型，也具有较高的精度，都是成功的典型。

④ 用流量演算器、流量计算机或 DCS，可对各种差压式流量计的可膨胀性误差进行自动校正。校正得是否精准，可用人工计算法进行验证。也可用相关标准中“可膨胀性系数值”表格进行验证。

⑤ 浮子式流量计和涡街流量计测量气体流量时，同样存在可膨胀性误差。处理方法与标准差压流量计不同。

## 参考文献

1. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧. 第二版. 北京:化工工业出版社, 2009
2. JJG 640-2016 中华人民共和国计量检定规程差压式流量计
3. JJG1003-2016 中华人民共和国国家计量检定规程 流量积算仪
4. 纪纲, 纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦. 北京: 化学工业出版社. 2014
5. ISO 4006: 1991 Measurement of fluid flow in closed conduits—Vocabulary and symbols
6. GB 2624-81 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
7. GB 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
8. 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
9. ISO 5167:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full
10. 于阳, 纪纲, 徐华东. GILFLO 流量计在蒸汽计量中的应用. 上海计量测试, 2008(2)
11. 徐英等. L 悬臂型内锥流量计可膨胀系数仿真与实验研究. 天津大学学报. 2009[11]: 945~951
12. 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
13. 许文达, 张涛, 毕英, 刘伟光, 辛龙海. 气体可膨胀性对涡街流量计计量性能影响分析. 电子测量与仪器学报. 2013, 27(9): 797~802

摘自《石油化工自动化》2018.54（5）