

编者的话：现代流量仪表的种类繁多，日新月异，标注方法虽有相关标准作规定，但实际执行中仍然多种多样。不同精确度对应不同的量程比；一台仪表的精确度与整套仪表的精确度往往不一样。设计选用时必须搞清楚才能保证仪表的信誉，为此特请纪波峰、纪纲老师做深入探讨，指导大家的应用。

流量计精确度量程比与整套仪表精确度关系论证

纪波峰 纪纲 上海同欣自动化仪表有限公司（上海，200070）

1. 引言

关于误差、相对误差和引用误差的关系问题，还有精确度与量程比的关系问题，一台仪表与整套仪表的不确定度，都是相互关联而又不同的概念，也是很容易搞混的几个概念。

随着科学技术的发展，这些仪表名词术语也有发展和变化。为此，国际标准化组织（ISO）以及某些国际机构，已发布新的标准，做出新的定义和规定。所以，仪表专业人员需接受新事物，研究新情况，跟上时代步伐。

2. 增大量程比必须考虑不确定度的变化

2.1 不确定度和量程比有对应关系

GB/T 17611-1998 中，精确度（Accuracy）的定义是被测量的测量结果与（约定）真值间的一致程度。精确度的定量表示应采用不确定度^[1]。

不确定度与量程比有着密切关系。同一台仪表如果确定的精确度等级较高，只能在较低的量程比条件下得到，如果想得到较大的量程比，则必须降低精确度等级。例如腰轮流量计，量程比为 5:1 时，基本误差为 $\pm 0.2\%MV$ 。量程比为 10:1 时，则降为 $\pm 0.5\%MV$ 。因此，在承诺一台流量计不确定度时，同时要给出量程比数据。各段测量范围给出不同的不确定度。

有人将一台新型差压装置与差压变送器组成的流量测量系统放在流量标准装置上标定，发现在 3:1 量程比条件下，能得到 0.3%的线性度，同时又确定这种流量计的量程比为 10:1，但又没有验证过在 10:1 量程比条件下是否仍能达到 0.3%的精确度，也没做过不确定度分析计算，这是有问题的。殊不知，在满量程流量 10%处，差压只有满量程差压的 1%，0.065%精确度等级的差压变送器，此时的不确定度只能达到 4.3%^[2]，仅此一项就与 0.3%的承诺相去甚远。

2.2 标准差压流量计精确度等级的确定

精确度等级的确定必须以理论分析和实验数据为基础。

流量计不确定度的确定是一件非常慎重的事情，它是仪表制造厂对用户所做的承诺。要有充分而可靠的理论依据以及充分的实验数据来支持。没有依据的夸张不仅得不到用户的信任，而且会变成笑料造成恶劣影响。

曾经有一本杂志刊登了一幅广告，说某个仪表公司的差压流量计配用一台高精度差压变送器，用来测量天然气流量，精确度等级 1.5 级，量程比可达 65 倍。殊不知在满量程流量 1/65 处，差压只有满量程差压的 1/4225。且不说气体温度压力等因素对系统不确定度的影响，仅差压测量不确定度的影响就已相当可观，即使采用的是当今世界上精确度等级最高的 0.04%差压变送器，在差压为 0.024%FS 点，差压变送器输出为 0~0.064%FS 都有可能，这哪里还有精确度可言呢。

2.3 引用误差与相对误差表示的是不同的仪表精确度

在工业仪表中，在满量程时，能够得到的相对误差最小，而在 1%FS 处，对线性仪表来说，相

对误差值是引用误差值的 100 倍，必须标注清楚，不能相互混淆。

在有关的标准中，对测量误差、引用误差和相对误差这几个名词术语作了明确定义^{[1][3]}

(1) [测量] 误差 error [of measurement]

测量结果减去被测量的真值。

注：① 由于真值不能确定，实际上用的是约定真值。

② 当有必要与相对误差相区别时，此术语有时称为测量的绝对误差。注意不要与误差的绝对值相混淆，后者为误差的模。

(2) 相对误差 relative error

测量误差除以被测量的真值。

注：由于真值不能确定，实际上用的是约定真值。

(3) 引用误差 fiducially error

测量仪器或测量系统的误差除以仪器的特定值。

注：该特定值一般称为引用值，例如，可以是测量仪器的量程或标称范围的上限。

在这三个术语中，引用误差极易与相对误差混淆，因为引用误差也是用百分数表示的误差，只是在百分数的符号后面，多了一个 FS (full scale) 或 span，但是两者的意义却有本质的差别。例如现在使用很多的精确度 0.04 级的差压变送器，横河公司在他们英文资料《General Specifications: EJA910A Multivariable Transmitter》中，列出了差压部分的精度为“±0.04% span”。但在其中文官网中，则载明 EJX910A 多变量变送器差压部分精度为±0.04%。在其中文说明书中，span 或 FS 也不见了。

仅看中文资料的人，理所当然将这种仪表的±0.04%误差当作相对误差，而实际上这个±0.04%是引用误差，因为在工业仪表中，只有流量仪表习惯上用相对误差表示。对于压力仪表（差压仪表），历来都是用引用误差表示的。

当被测量为满度时，这一混淆带来的影响不明显，以 0.04 级差压变送器为例，在满度这一点，其最大允许相对误差和最大允许引用误差是相等的，都是±0.04%，但是在被测量相对值较小时，两者之间就大相径庭。例如在满量程差压 1%处，此精确度等级的差压变送器，最大允许误差仍然是±0.04%FS，而换算成相对误差后，就变成了±4%。所以是相当可观的。

增大了 100 倍，很多场合不合需要，由于对定义不清楚，导致现场出错，也影响有关各方的声誉

3. 要澄清的概念

不能将一台表的不确定度与整套仪表的不确定度混为一谈

一套流量计往往由若干组成部分构成。作为用户来说，最关心的是整套流量计的测量精确度，而不是个别单元的精确度。以标准差压式流量计为例，用来测量气体和蒸汽流量时，必要的组成部分就有差压装置、差压变送器、压力变送器、温度传感器、流量计算机等。按照 GB/T 2624-2006 和 ISO5167:2003(E)的规定，整套仪表的不确定度由 6 个不确定度分量组成^{[4][5]}，即

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

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；

$\frac{\delta \rho_1}{\rho_1}$ —— 孔板正端取压口处气体密度不确定度。

按照 JJF1059-2012 的定义^[6]，这是个相对合成标准不确定度的模型。在该模型中，每一个不确定度分量都对流量测量不确定度起作用。但在具体估算 $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 时，针对流量测量条件的不同，各个分量所起作用大小有很大差异。

当流量计运行在常用流量附近，起关键作用的是 $\frac{\delta C}{C}$ ，对于标准孔板来说， $\frac{\delta C}{C} \approx 0.5\%$ ；当流量在宽广范围之内变化时，起关键作用的是 $\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$ 。而流量在全量程范围之内变化时， $\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}$ 都起显著作用^[7]。

在 V 锥流量计被教授吹得神乎其神的那几年，曾经有上门推销人员拿着一张 V 锥节流件流出系数 C 的标定报告向用户介绍，说它是当今最先进的差压流量计，精度 $\pm 0.5\%$ ，而孔板只能达到 2%。

此人混淆了一个概念，即他宣传的 V 锥数据，是 3 倍量程比条件下得到的流出系数非线性误差，与式 (1) 中的 $\frac{\delta C}{C}$ 差不多，而孔板流量计的 2% 是整个测量系统的误差，属 $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 性质，两者有着本质差别。

为什么说此人说的孔板流量计 $\pm 2\%$ 误差也不算错呢？因为在 GB2624-81 中，孔板的数学模型精度较差。在 36 年前，差压计的精度等级只有 1.5%，所以当时的水平只能达到 $\pm 2\%$ 的系统精确度。在 GB 2624-81 之后，在 GB/T 2624-93 和 GB/T 2624-2006 中，数学模型经过两次重大的改进，模型精度有了显著提高。更重要的是差压测量仪表的精确度从 $\pm 1.5\%FS$ 提高到现在的 $\pm 0.04\%FS$ 。因此，现在的系统不确定度已提高到 1.0%^[7]。

其实，就流出系数不确定度而言，标准孔板也是 0.5%，而且没有量程比的约束条件。按照 GB/T 2624-2006 规定，在 $0.2 \leq \beta \leq 0.6$ 范围之内 (β 为直径比)，只要雷诺数大于 5000，都能达到 0.5% 的 $\frac{\delta C}{C}$ 。而与量程比无关。

这种概念混淆的事情不仅在中国有，在外国同样发生。在“Canadian School of Hydrocarbon Measurement 2005”登载了一段关于孔板流量计量程比的文章：

以前一般采用切换差压变送器或切换孔板的方法，来扩大孔板流量计的量程比，而且保持流量测量精度。而现在不再有此必要。因为现在差压测量单元的量程比已经提高到 200: 1，所提供的流量量程比可达 14: 1。

上述结论存在两个问题：

一是将差压测量量程比同流量测量量程比画等号是不对的。正如前面所述，流量在宽广的范围之内变化，可膨胀性系数 ε 会有显著的变化。由于雷诺数也在宽广的范围内变化，所以，流出系数也会有显著的变化，忽略了这两个变化，将会使流量不确定度增大。

第二个问题是将引用误差与相对误差相混淆。这位老外论据中的 200 倍量程比，说的应是现在最新型的差压变送器具有 200 倍的量程比。应当说制造厂所做的承诺是能做到的，但只是引用误差。例如 $\pm 0.04\%$ span 精确度的差压变送器，在全量程范围之内，除了零点之外，各点的允许误差都是 $\pm 0.04\%$ span。这样的精确度，在接近满量程处，不确定度 $\frac{\delta\Delta p}{\Delta p}$ 是非常小的，但是在满量程

的 1/200 处， $\frac{\delta\Delta p}{\Delta p}$ 就是一个非常大的数字。

关于差压不确定度与差压变送器精确度等级的关系，GB/T 21446-2008 中有下面的关系式^[2]：

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

式中： $\xi_{\Delta P}$ ——差压变送器准确度等级；

Δp_{\max} ——差压上限值，kPa；

Δp ——预计差压测量值，kPa。

在满量程 1/200 处， $\Delta P = 0.005 \Delta P_{\max}$ ，因为 $\xi_{\Delta P} = 0.04\%$ ，代入式 (2) 得 5.3%。当然，由于这一试验点已靠近零点，可能实测误差要比估算值小一些。但还是一个很大的数字，因此 $\frac{\delta q_m}{q_m}$ 就

与预定的等级相去甚远，所以，不能把引用误差当相对误差来处理。

4. 范围度定义和分界流量的定义

4.1 范围度的定义

国际标准化组织 (ISO) 于 1998 年颁发国际标准 ISO 11631 《流体流量测量—规定流量仪表性能的方法》，对范围度作了重新定义。GB/T 22133-2008 等同采用了该标准^[8]。

(1) 可调比 (turn down, turn down ratio) 是测量范围的最大流量被最小流量除的值。

(2) 范围度 (rangeability) 是“范围最大上限值”与“最小上限值”间的比。

重新定义适应了流量测量技术发展的需要。老式的流量计只有一档量程，以前用英文 rangeability 并无歧义，但现在有很多流量计，测量范围可以根据使用需要设定，于是重新定义的术语 rangeability 专门用于描述范围变更能力。

还有一个重要概念，即可调比或量程比指的是保证精确度的最大流量与最小流量之比。有些流量计，在百分比流量很小时仍可测量，但精确度保证不了，例如涡街流量计，在雷诺数 ≥ 5000 后就有稳定的旋涡产生，但一直到雷诺数 ≥ 20000 后才能保证精确度，所以，计算量程比中的最小流量只能取 $Re_D = 20000$ 所对应的流量值^[9]。

4.2 分界流量的定义

在 JJG 1030-2007 中，分界流量 (transition flowrate) 定义是在最大流量和最小流量之间的流量值，它将流量范围分割成允许误差不同的两个区，即“高区”和“低区”^{[10][11]}。

例如外夹式超声流量计用来测量液体流量时，在分界流量到最大流量之间，往往确定为 1% 精

确度。而在最小流量到分界流量之间，精确度确定为 2%。这就解决了在整个测量范围内不同精确度的描述问题，因为百分数流量很小时，能够达到的精确度比百分数流量大的高区要低一些。而流量计的使用者对“低区”的精确度也很关注。

“低区”的精确度除了用示值误差表示之外，有的也用引用误差来描述。

“高区”和“低区”的分界大多用百分数流量表示，有的也用流速表示。

5. 结束语

① 流量测量的不确定度与其量程比有着密切的关系，制造厂在给出流量不确定度（或精确度）的同时，应同时做出量程比的承诺。

② 绝对误差、相对误差和引用误差三者的关系，国家标准和国际标准都有明确的规定。但相对误差与引用误差极易相混。因为两者都是用百分数表示的。为了避免相混，人们在相对误差的百分符号后面注上“读数”、“rd”、“MV”等，如果不做任何标注，也不算错。因为标准中未强调要标注。而在引用误差的百分符号后面注上“FS”或“span”都是必不可少的，如果是制造厂故意省去“FS”或“span”，恐怕会有混淆视听、混水摸鱼之嫌。

③ 一套流量计的流量测量不确定度，由组成该流量计的各相关部分的不确定度，按一定的规律合成得到。各分量的不确定度既与整个系统的不确定度相关联，又不能混为一谈。

④ 我国现在正处在全民创新，经济转型，改善经济增长方式的大好形势下。仪表制造厂应提高技术水平，练好真功夫，增强竞争力，才能持续发展，立于不败之地。

参考文献

1. GB/T 17611-1998 封闭管道中流体流量的测量术语和符号
2. 中石油工程设计有限公司西南分公司.GB/T 21446-2008 用标准孔板流量计测量天然气流量[S]. 北京：中国标准出版社，2008.
3. JJF 1001-2011 通用计量术语及定义
4. 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.
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.
6. JJF1059.1-2012 测量不确定度评定与表示.
7. 纪波峰, 纪纲. 双量程差压流量计的成功应用探讨. 仪表世界. 2017.6: 27~31
8. 上海工业自动化仪表研究所.GB/T 22133-2008 流体流量测量—规定流量仪表性能的方法[S].北京：中国标准出版社，2009
9. 姜仲霞, 姜川涛, 刘桂芳. 涡街流量计[M]. 北京：中国石化出版社，2006.
10. 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
11. 中国计量科学研究院.JJG 1030-2007 超声流量计检定规程[S].北京：中国标准出版社，2007

摘自《仪表世界》2017年第12月号