

提高流量测量仪表品质的途径

王志刚（苏州工业园区蓝天燃气热电有限公司，江苏 苏州 215126）

纪 纲（上海同欣自动化仪表有限公司，上海 200070）

提 要：流量测量仪表在过程控制、能源计量、贸易结算、储运和物流管理等系统中扮演着重要角色，但是国产流量表还不能完全担当此重任。由于流量测量的多样性和复杂性，流量测量技术正以很快的速度在发展。本文罗列了国际上这方面技术的新进展，供制造商和用户参考。

关键词：流量计品质 空管检测 空管置零 涡轮流量计 频谱分析 双量程差压流量计

1. 概述

提起产品质量，人们会马上想到经久耐用，寿命长。诚然，作为工业产品要经久耐用，寿命长，但这只是品质要求的一小部分，随着产品的特点和用户要求的多样性，对产品质量的要求也在发展变化。这些要求在产品质量标准和性能评定方法中有些已作了规定，而另有一些，则由需方直接与供方讨论决定。

这些要求一般用技术指标来描述，对于流量测量仪表来说，它要有精确度指标，稳定性指标，流体温度压力等物性影响指标，抗干扰能力指标，环境适应性指标，供电电源影响指标，多功能指标以及用户要求的其他性能指标。

随着我国社会主义经济事业的发展，仪表行业在残酷的市场竞争中存活了下来，但取胜的原因大多是低价，而非产品质量，为了从以价取胜转移到以质取胜，我们必须急起直追，不断创新，赶超国际先进水平。

本文罗列了几种流量测量仪表国际上的新进展，以期对仪表制造商和用户有所启发。

2. 电磁流量计

2.1 空管检测与空管置零

电磁流量计是专为测量导电液体的体积流量而设计的。测量原理是基于法拉第电磁感应定律。按照该定律，导电流体通过磁场作切割磁力线运动时，在垂直于磁场及流速的方向上产生感应电势，此电势由式（1）给出

$$E=K \cdot B \cdot \bar{V} \cdot D \quad (1)$$

式中： E —— 感应电势；

K —— 仪表常数；

B —— 磁感应强度；

$\bar{V}$ —— 平均流速；

D —— 测量管内径。

普通的电磁流量计都不允许测量管空管，因为测量管一旦空管，电极暴露在空气中，就会因信号源内阻特别大而感应励磁线圈的干扰，使得流量示值升到满度。

多年以来人们在寻找空管检测和空管置零的方法。

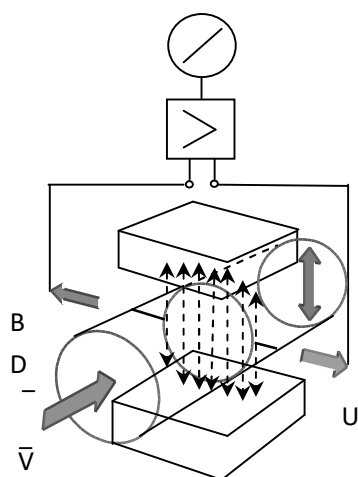


图 1 电磁流量计原理

图 2 所示是一个国外公司已成功运用的方法。

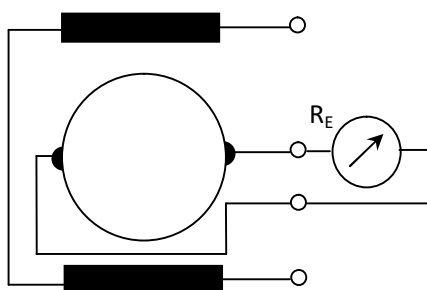


图 2 空管检测原理

这一方法是基于电导率测量。在图 2 中，两电极之间的电阻可用式 (2) 表示：

$$R_e = \frac{K}{E_f \sigma} \quad (2)$$

式中： R_e —— 电极电阻；

K —— 常数；

E_f —— 电极系数（与电极面积和测量管内径有关）；

σ —— 电导率。

从式 (2) 可得式 (3)

$$\sigma = \frac{K}{E_f \cdot R_e} \quad (3)$$

对于自来水以及酸、碱溶液等，满管时 R_e 约为 $10\Omega \sim 1k\Omega$ ，而空管时，液位低于电极，原理上 R_e 为无穷大。由于两个电极之间导管内壁可能潮湿，实际上 R_e 只为有限的阻值，但比正常操作时的电阻值大得多。一般判定是否空管的 R_e 值取正常操作时电阻值的 3 倍。

仪表一旦判定导管为空管，仪表中的单片机即采取两项措施，其一是使输出置零，其二是发出空管报警信号，从而杜绝空管时的错误计量或错误控制。

2.2 非满管检测

电磁流量计是速度式流量计中的一种。它给出的信号其实是流过导管的液体平均流速，在导管内液体充满的情况下，式（4）成立

$$q_v = A\bar{V} \quad (4)$$

式中： q_v —— 体积流量；

A —— 导管截面积；

$\bar{V}$ —— 平均流速。

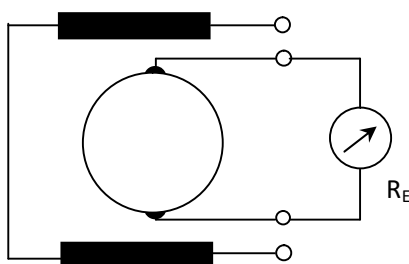


图 3 非满管检测原理

但若有非满管的情况存在，由于导管截面积的一部分被气体占据，以致液体实际流通截面积比 A 小，最后导致流量示值偏高。

电磁流量计大量应用于供水和给排水，水在水平管内流动，常因水温变化而析出气体，并聚集在水平管道的顶部，如果电磁流量计导管的顶部也存有气体，仪表的高精度特性就会大打折扣，因此非满管检测很早以前就已作为研究者的课题。

非满管检测也是基于电导率检测的方法。在图 3 所示的电磁流量传感器中，增加了一个（或一对）非满管检测电极，当导管内液体满管时，顶部电极与其他电极之间的电阻值很小，而当存在非满管情况时，顶部电极与导电液体之间有气体阻隔，所以电极电阻显著增大，从而做出非满管判断。

电磁流量计出现非满管情况，处理方法一般是在流量导管上游管道的顶部设置排气阀。

2.3 流体状况的测量与识别

一台电磁流量计，如果安装合格，内衬无变形，测量管完全充满而且底部无沉积物，则管内流体的流动状态应是对称的平稳的。反之，如果状态存在不对称或紊乱现象，则必然有某一项或多项原因所引起。由于这些原因是存在于管道内，无法直接观察到，而只能用间接的方法测量与识别。

在图 4 所示的原理中， I_1 为上线圈励磁电流， I_2 为下线圈励磁电流， U_1 为从 I_1 感应出的电压， U_2 为 I_2 感应出的电压，由于 I_1 和 I_2 在上下半个管道内产生相反的磁场，如果流态对称、平稳，则 U_1 与 U_2 幅值相同，因它们的方向又相反，所以合成后相互抵消，即

$$U_1 - U_2 = 0$$

如果 $U_1 \neq U_2$ ，则存在不对称或紊乱的流态。

出现不对称或紊乱的流态，可能的原因有：

- 测量管未完全充满；

- 测量管底部有沉积物；
- 传感器内衬变形；
- 安装不当，法兰间垫片向管内凸出等。

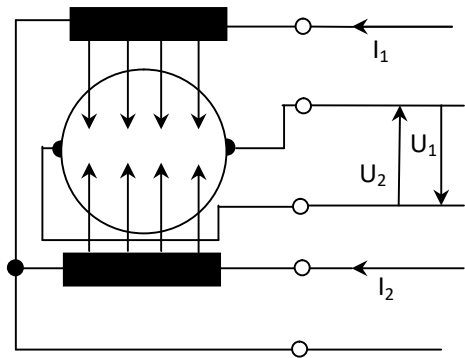


图 4 流态测量与识别原理

2.4 双频励磁

电磁流量计的励磁频率早已是人们的研究对象。励磁频率越低，正交干扰和同相干扰就越小，于是零点变动就能大幅度降低。但是又出现了新的问题，即流量测量反应速度慢，测量浆液时出现尖状干扰，测量低电导率流体出现流动噪声等新的矛盾。为了解决新问题，近些年来出现了一种用高频（75~160Hz）矩形波调制低频（1/8 工程频率）矩形波形成的双频励磁方式（如图 5 所示），兼有两者的优点，稳定性好，测量反应迅速^[1]。

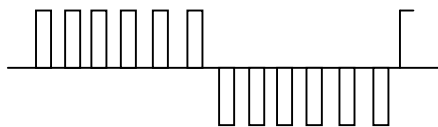


图 5 双频调制波

3. 涡街流量计

3.1 涡街流量计抗振能力的重要性

涡街流量计是一种流体振荡型流量计。在涡街流量传感器中，流体流过旋涡发生体时，在发生体两侧就会交替地分离出卡曼涡街。旋涡频率与流过发生体两侧的流体平均流速成正比。

此旋涡经检测元件转换成电脉冲信号。检测元件的种类很多，其中使用最多的是压电晶体。

安装涡街流量传感器的工业现场和管道，难免有一定的振动，压电晶体在受到振动后，也产生相应的脉冲输出。这种干扰脉冲与旋涡产生的脉冲混在一起，很难将其分离开来，这是因为：

- ① 干扰脉冲的幅值与涡街信号的幅值相当，甚至高于涡街信号；
- ② 干扰脉冲的频率在旋涡频率范围之内。

这种干扰严重威胁涡街流量计的品质。例如有一个外国知名度很高的品牌，在引入频谱分析技术之前，抗振性能很差，尤其是公称通径大的仪表，不用说管道振动引起仪表示值升高，就是在仪表接线盒附近用力拍手，也会引起仪表示值升高，或出现“无中生有”现象。

3.2 提高抗振能力的途径

现在，国产品牌涡街流量计就品牌数量来说相当可观，但技术水平不高，绝大多数还停留在用

硬件方法组成的带通滤波器上。所以要进一步提高仪表的抗振能力，只能借助于软件方法。目前，技术指标先进的外国品牌大多采用自适应滤波法，频谱分析法，快速付里叶变换（FFT）法等^[2]。从而提高了抗振能力。

例如前面的例子所述的涡街流量计，从 2005 年引入了频谱分析技术后，抗振能力从原来的 0.5g 提高到 2g。

3.3 涡街流量计抗振能力的一般试验

3.3.1 型式试验所用的方法

仪表型式试验中的振动试验，GB/T2423.10 描述了常用的程序。作为用户来说，往往不具备这一试验的条件，而且也不一定有此必要。

3.3.2 现场装置所用的方法

用户在使用现场对安装完毕的涡街流量计进行抗振试验，往往采用简单而直观的方法。例如用小锤对涡街流量计的适当部位外加机械振动。

对于抗振性能较差的涡街流量计，在测量管内流速为零时，只需轻轻敲击仪表的颈部，其输出就会迅速上升。而抗振指标先进的仪表，只有对其颈部进行连续不停地快速地用力敲击，仪表才会有输出。

4. 涡轮流量计

涡轮流量计结构简单、紧凑、轻巧，安装维护方便，流通能力大。尤其是精确度高，重复性好，在油品计量中，使用很普遍。在有机液体、液化气、天然气等的计量中，使用也很广。

但涡轮流量计也有其固有的缺点，即叶轮连续不停地旋转，轮轴与轴承之间的磨损在所难免，国产涡轮流量计的平均无故障间隔时间（MTBF）一般确定为 8000~20000h。

国外先进水平的设计是采用宝石轴承与镍基碳化钨转轴配合，减少磨损，可将寿命延长数倍^[3]。

碳化钨材料硬度极高，宝石轴承既硬又光滑，摩擦系数极小，采用这种组合不仅寿命长，而且阻力矩大幅减小，从而可使测量范围度得以扩大。

5. 差压式流量计

差压式流量计是历史最悠久的流量测量仪表之一，但针对其不足和存在的问题，现在仍在发展和改进。

5.1 标准节流装置国际标准的改进

国际标准化组 ISO 正式公布了最新国际标准 ISO5167:2003 (E)，该标准与 ISO5167-1 (1991) 相比，有下列主要改进：

(1) 孔板的流出系数用 R/G 公式（Reader-Harris/Gallagher 公式取代 stolz ISO5167 公式（具体公式略）。

在 $Re_D > 4000$ 时，按全部数据库计算：R/G 公式的标准偏差为 0.259%；若在 stolz 公式所包括的范围内比较，R/G 公式的标准偏差为 0.245%。因此，精确度有了明显提高。

(2) 采用如式 (5) 所示的新公式计算孔板的介质可膨胀性系数 ϵ 。

$$\epsilon = 1 - (0.351 + 0.256 \beta^4 + 0.93 \beta^8) \left[\left(1 - \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \quad (5)$$

式中 ε —— 可膨胀性系数；
 β —— 直径比， $\beta = d / D$ ；
 d —— 工作条件下节流件的开孔直径，m；
 D —— 管道内径，m；
 P_2 —— 节流件负端取压口绝压，Pa；
 P_1 —— 节流件正端取压口绝压，Pa；
 κ —— 等熵指数。

该式描述的是一根关于 $\varepsilon = f(\Delta p)$ 的曲线。而如式（6）所示的老公式描述的是一根关于 $\varepsilon = f(\Delta p)$ 的直线。两者相比，曲线偏离实验点更小^[5]。

$$\varepsilon = 1 - (0.41 + 0.35) \beta^4 \frac{\Delta p}{\kappa P_1} \quad (6)$$

式中 Δp —— 差压，Pa。
 其余同式（5）。

（3）其他方面的改进

ISO5167: 2003（E）还对上下游最小直管段长度、孔板的温度修正，上游管道内壁粗糙度等也提出了新的限制要求。

5.2 C 和 ε 的在线补偿

目前，国内差压流量计制造行业已普遍执行新标准，相应的国家标准是 GB/T2624-2006。按照新标准设计制造节流装置，只意味着在常用流量这一点，流量测量不确定度进一步减小，但若不对流出系数 C 和可膨胀性系数 ε 进行补偿，则被测流量偏离常用流量后，不确定度就相应增大。这是因为 C 和 ε 客观上是个变量，将其简化成常数，必然带来非线性误差。

在流量标准装置上对一套差压式流量计实施检定时，也证明了这一点。

标准孔板差压流量计放在水流量标准装置上检定，如果不进行流出系数非线性在线补偿，满量程流量的 20% 以下部分，误差就将大于 1%MV，也即做到 5:1 的量程比已很费力。而若进行 C 的在线补偿，满量程流量的 10%~100% 范围内，误差都可以控制在 1% 范围内。

关于 C 和 ε 在线补偿的实际效果，在气体标准装置上的验证，也得到了证实^[6]。

5.3 提高测量点的差压测量精确度与双量程差压流量计

上面说到的引入 C 和 ε 补偿后，10%FS 处的系统误差有了保证，其实，此时制约系统精确度的已变成差压测量的不确定度，因为在 10%FS 流量计量点，差压值只有满量程差压的 1%，而差压变送器的精确度又是按照引用误差定义的，精确度等级再高的差压变送器在此条件下，测量不确定度也增大到惊人的数值。所以欲扩大范围度，必须另配一台低量程差压变送器，供流量量程低端差压测量之用。

例如在用双量程差压式流量计测量蒸汽流量时，常将流量量程分为两段，0~17.32%FS 的一段为低量程，配一台 0~3kPa 差压变送器；17.32%FS~100%FS 的一段为高量程，配一台 0~100kPa 差压变送器，两台变送器在流量二次表的配合下协调动作，自动进行量程切换和计算，从而将量程低端的系统精确度大大提高一步。

在流量标准装置上所做的检定也证实,设计和安装合理的双量程差压流量,量程比可达到 30:1,可测最小流量可达流量测量上限的 1%^[7]。

图 7 的图片所示是一台 DN500 双量程流量计在某石化厂的实际运行曲线。数据采集历史曲线图中的黑、紫、浅蓝、深蓝等四根曲线,分别是蒸汽压力、蒸汽温度、蒸汽密度和蒸汽质量流量。其中,质量流量测量上限为 100t/h(对应差压 100kPa),在读数线所对应的时刻,质量流量读数为 0.93t/h,这时,低量程差压变送器(带开平方)输出电流约为 4.86mA。从而将原本已进入小信号切除区的流量予以可靠显示。



图 6 双量程差压式流量计运行曲线

参考文献

1. 蔡武昌, 应启夏主编. 新型流量检测仪表. 北京: 化学工业出版社, 2006.
2. 姜仲霞, 姜川涛, 刘桂芳. 涡街流量计. 北京: 中国石化出版社, 2006.
3. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧(第二版). 北京: 化学工业出版社, 2009.
4. ISO5167-2: 2003(E) Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full—Part 2 : Orifice plates
5. HEADER—HARRIS, M.J..the equation for the expansibility factor for orifice plates.In Proc.of FLOMEKO 98, Lund, Sweden, June 1998, pp.209-214.
6. 王建忠, 纪纲. 差压流量计范围度问题研究. 自动化仪表, 2005, (8) .
7. 国家质检总局计量司等组编. 2008 全国能源计量优秀论文集. 北京: 中国计量出版社, 2008.

本文源自《化工与医药工程》2022 年第 2 期