

双量程差压流量计的关键

The Key of Double-range Differential Pressure Flowmeter

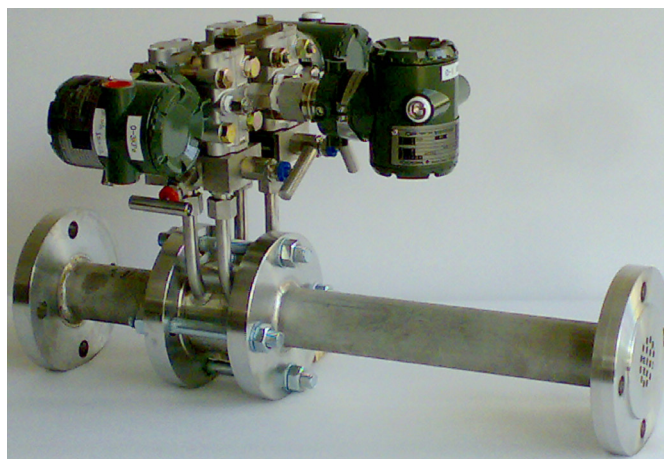
文_徐 锋 上海申能星火热电有限责任公司
纪波峰 上海同欣自动化仪表有限公司

万用表的量程自动切换，大家都很熟悉，在流量测量中，也可借用这个方法。在蒸汽供热网中，某些时候蒸汽相对流量非常小，这就对流量计的量程比提出了很高的要求。

如果采用单一量程差压式流量计来测量，量程比只能达到10:1。

为提高测量量程比，可增设一台低量程差压变送器，以提高量程低段的测量精度。在此基础上按国家标准进行雷诺数和可膨胀性系数补偿，能将量程比提高到100:1。

另外，进行合理安装，减小差压信号传递失真，保证小流量时的测量精度。经实验证明，采用双量程的测量方法可以很好解决实践中出现的量程比大的问题。



引言

在蒸汽供热网中，要对交付给热用户的蒸汽质量流量进行计量，对管网的损耗进行实时监控和统计，以便掌握热网的运行状况，需要在相应的节点对管道内的蒸汽流量进行准确测量。在这项任务中，对蒸汽流量计的设计选型是一项至关重要的工作。目前市场上能够买到的各种不同原理的流量计据说有一百多种，但是在热网的蒸汽流量测量中真正获得广泛应用的就是两种类型，即涡街流量计和差压式流量计^[1]。

在流量计的设计选型中，公称口径的选定往往比较简单，而量程比的问题却异常复杂，设计人员不得不花费大量精力去认真对待。例如有一DN500供热总管常用压力1.0MPa（G），常用温

度280℃，最大流量80t/h，如果选用横河公司的涡街流量计，就应选DN300高温型产品，该产品在上限流速80m/s时的流量为97t/h，而保证准确度的下限流量约为4t/h^[2]。

但是该计量点在某些季节的夜间有可能流量很小，如果预计的最小流量小于4t/h，则测量结果就会因进入小信号切除区而显示零，给经营管理和运行管理造成损失。

我们再来看看差压式流量计怎么样。

差压式流量计的一般表达式为^{[3][4]}：

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

式（1）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。

在用差压式流量计测量蒸汽质量流量时，制造厂普遍承诺能达到1.5%的系统精度，而保证这个精度的量程比，有多种说法，在三十五年前，只能达到3:1，后来随着差压变送器精度的提高和其他方面的改进，提高到5:1，现在单一

量程的标准孔板流量计，保证1.5%精度的量程比也只能做到10:1^{[5][6]}。

为什么差压式流量计量程比不够宽

■ 量程比不宽是差压流量计的特点

在众多型式的差压式流量计中，除了斯派莎克公司的线性孔板GILFLO之外，都存在量程比不够宽的缺陷，GILFLO又称弹性加载可变面积可变压头孔板，在相对流量小的时候，流通面积变小，所以输出的差压信号增大，而且与流过孔板的流量呈近似线性关系，保证精度的量程比可达100:1^[7]。但是流通截面积不会变的孔板就没有那么幸运了。

从式(1)可知，在运行工况与设计条件一致的情况下，差压装置输出的差压与流量的平方成正比，即 $q_m=100\%FS$ 时， $\Delta P=100\%$ ，而流量为满量程的10%时，输出的差压只有满量程差压的1%。这一关系用图1所示的曲线表示则更为明了^{[8][9]}。

由于差压信号太小，所以差压变送器对此差压信号进行测量时，产生较大误差。

■ 差压测量不确定度的估算及对系统的影响

式(1)可简化为式(2)：

$$q_m = kC \varepsilon_1 \sqrt{P_1} \times \sqrt{\Delta P} \quad (2)$$

差压测量不确定度对流量测量不确定度 $\frac{\partial q_m}{q_m}$ 的影响，可采用偏微分的方法进行分析。如式(3)所示：

$$\frac{\partial q_m}{q_m} = \frac{1}{2} \frac{\delta \Delta P}{\Delta P} \quad (3)$$

式(3)中 $\frac{\delta \Delta P}{\Delta P}$ ——差压测量不确定度。

差压测量的不确定度可用式(4)估算^[10]：

$$\frac{\delta \Delta P}{\Delta P} = \frac{2}{3} \zeta_{\Delta P} \frac{\Delta P_k}{\Delta P_i} \quad (4)$$

式(4)中 $\zeta_{\Delta P}$ ——差压仪表的准确度等级；

ΔP_k ——差压变送器上限值(20mA输出对应的差压值)；

ΔP_i ——预计差压测量值。

现在差压式流量计中所配用的差

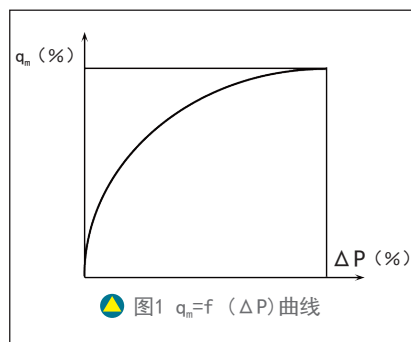


图1 $q_m = f(\Delta P)$ 曲线

压变送器，大多已达到0.065级。不少人以为0.065级差压变送器就能获得0.065%的差压测量不确定度，测量精度足够了。其实不然，因为差压变送器的精度等级是用引用误差表示的，只有在满量程附近才能得到0.065%的不确定度甚至更好些，其余各点都达不到如此好的不确定度，而且测量值(MV)越低，不确定度越大。例如在 $q_m=10\%FS$ 时，差压为满量程的1%，即 $\Delta P_i=1\% \Delta P_k$ ，由于精度等级 $\xi_{\Delta P}=0.065\%$ ，将这些数值代入式(4)得， $\frac{\delta \Delta P}{\Delta P}=4.3\%$ ，在对变送器的实测中，得到的实际不确定度要比此理论值略好一些，因为此时的差压值已非常靠近零点，一般估算可按理论值的一半考虑，即按 $\frac{\delta \Delta P}{\Delta P}=2.15\%$ 计算，将此值代入式(3)可计算得到 $\frac{\partial q_m}{q_m}$ ，即在此计量点，差压测量不确定度引起的系统不确定度为1.025%。由于还有其他几个因素也对系统不确定度产生影响，所以此时的系统不确定度只能勉强达到1.5%。

如何拓宽量程比

■ 解决关键问题

从以上分析可知，在差压式流量计中，制约量程比的关键因素是相对流量较小时，差压测量不确定度太大，解决这一难题的方法之一是进一步提高差压变送器的精度等级，譬如将变送器的精度等级从0.065进一步提高到0.04，从数量级分析，似乎已经接近极限，进一步提高的潜力已极其微小。方法之二而且是更简单有效的方法，是增加一台低量程差压变送器，从而大幅度提高量程低段的差压测量精度。

例如本文开头所述的测量对象，高量程差压变送器测量范围取0~100kPa，除此之外，再增加一台0~3kPa的低量程差压变送器，仪表的精度等级仍选0.065级，即 $\xi_{\Delta P}=0.065\%$ ，则高量程差压变送器不确定度，按式(4)计算：

在 $\Delta P_i=100kPa$ 时，

$$\begin{aligned} \frac{\delta \Delta P}{\Delta P} &= \frac{2}{3} \times 0.065\% \times \frac{100}{100} \\ &= 0.043\% \end{aligned}$$

在 $\Delta P_i=3kPa$ 时，

$$\begin{aligned} \frac{\delta \Delta P}{\Delta P} &= \frac{2}{3} \times 0.065\% \times \frac{100}{3} \\ &= 1.44\% \end{aligned}$$

如果差压信号再小(ΔP_i 更小)， $\frac{\delta \Delta P}{\Delta P}$ 成反比地增大。从而为量程低段的流量测量带来更大的误差。

这时，如果增设一台0~3kPa，精确度等级也为0.065的低量程差压变送器，则在 $\Delta P_k=3kPa$ 时， $\frac{\delta \Delta P}{\Delta P}=0.043\%$ ，从而将差压测量不确定度缩小到原来的1/33。从式(4)可知，在 $\Delta P_i < 3kPa$ 后， $\frac{\delta \Delta P}{\Delta P}$ 也都缩小到原来的1/33，显然，这一方法是有效的。

例如有一蒸汽流量测量对象，最大流量80t/h，最小流量2.5t/h，常用压力1.0MPa，常用温度280℃，公称通径DN500，高量程差压变送器选用0.065级中差压变送器，测量范围：0~100kPa，低量程差压变送器选用0.065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，协调动作，自动切换，相互配合，保证精度的量程比可扩大到30:1。如果(1~3)%FS流量范围内的系统精度确定为低量程流量上限的 $\pm 1.5\%$ ，则保证精确度的量程比则为100:1，详见参考文献^[5]。

■ 新型双量程差压流量计的不确定度

新型双量程差压流量计的不确定度与被测流体的种类有关，而且同所配用的差压变送器精度等级有关。

以FDId型双量程差压流量计为例，由于所配用的差压变送器为0.065级或优于0.065级并且合理确定低量程上限

表 1

被测流体：液体	$\pm 1.0\%$ 读数值	3%~100% FS 区间
	$\pm 1.0\%$ 低量程上限	1%~3% FS 区间
	量程比：100:1	
被测流体：气体、蒸汽	$\pm 1.5\%$ 读数值	3%~100% FS 区间
	$\pm 1.5\%$ 低量程上限	1%~3% FS 区间
	量程比：100:1	

时，系统不确定度和量程比如表1所示^{[5][12]}。

不确定度估算符合GB/T 2624-2006和GB/T 21446-2008。

低量程流量上限一般取高量程上限FS的17.321%^{[5][8]}。这时低量程变送器差压上限值为高量程变送器的差压上限值3%。开平方运算在差压变送器中完成。小信号切除点一般可取1%FS，当被测流体为干气体时，可更小一些。低量程差压变送器和高量程差压变送器的输出与流量之间的应有关系如图2所示^[5]。

从图2中可看出，低量程差压变送器最小输出为4.92mA，从数量级来看是个不小的数值。

图3所示为系统不确定度与相对流量的关系^[5]。

■ 差压信号的传递失真问题

所谓差压信号的传递失真，就是流体流过差压装置，在其正、负压端取压口处得到的差压信号，在传递到差压变送器过程中所产生的失真。

在大多数流量测量点，人们并不

注意差压信号的传递失真，就连国家标准中，也只是轻描淡写地提到一句，这是因为大多数流量测量点，差压值一般均较大，失真一些所引起的误差并不严重。而在双量程差压流量计中，如果仪表运行在低量程段，实际使用的差压值就很小，微小的失真也会带来较大的影响。

对于在常温条件下以干气体形态存在的流体，一般不会出现差压信号的传递失真（管道堵塞和泄漏点存在泄漏的情况除外），而湿气体和蒸汽，最容易发生传递失真。

引起差压信号传递失真的原因有很多：差压装置根部阀选型和安装不合理；两只冷凝罐高度的微小差异；引压管坡度不合理；引压管和差压变送器高低压室排气（被测流体为湿气体时，则为冷凝液）不彻底；引压管线较长时，正负压引压管所处的环境存在差异，导致两根管内的液体（如蒸汽的凝结水）温度不一致等，都会引起差压变送器测量到的差压值与差压装置所产生的差压值不一致。设计、制造、安装和调试时，

应特别留心^[11]。

一体化的结构并配以承插焊闸阀，较好地解决了差压信号的传递失真问题。在介质为蒸汽时，这种结构，将差压变送器设置在差压装置的下方，有两边引压、单边引压和落地管设计如图4所示。

在结构的处理上，当流体为蒸汽时，差压变送器放在差压装置的下方是关键。

■ 流出系数和膨胀性系数的在线补偿

流量在1~100%FS范围内变化，管道雷诺数ReD也相应变化，这一变化使得流出系数C不再是一个常数^[5]，所以要按照国家标准所提供的数学模型对流出系数非线性进行在线校正。

与此相似，流量在大范围之内变化，可膨胀性系数 ε_1 也会产生明显的变化，为了保证系统精度，也必须按照国家标准所提供的数学模型对 ε_1 变化进行在线校正^[5]。

上述两项在线校正都是在流量演算器内完成的。

结束语

（1）量程比不够宽是差压式流量计的固有缺陷，这是由差压装置 $q=f(\Delta P)$ 的平方根特性引起的，这一特性使得仪表在相对流量较小时，输出的差压信号非常小。

（2）由于差压变送器的精度等

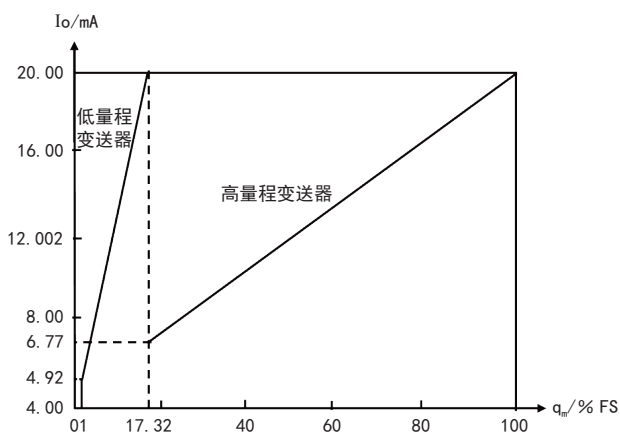


图2 变送器输出与流量的关系

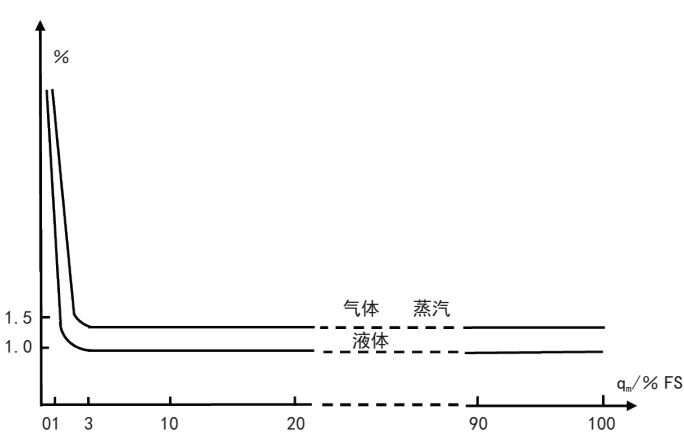
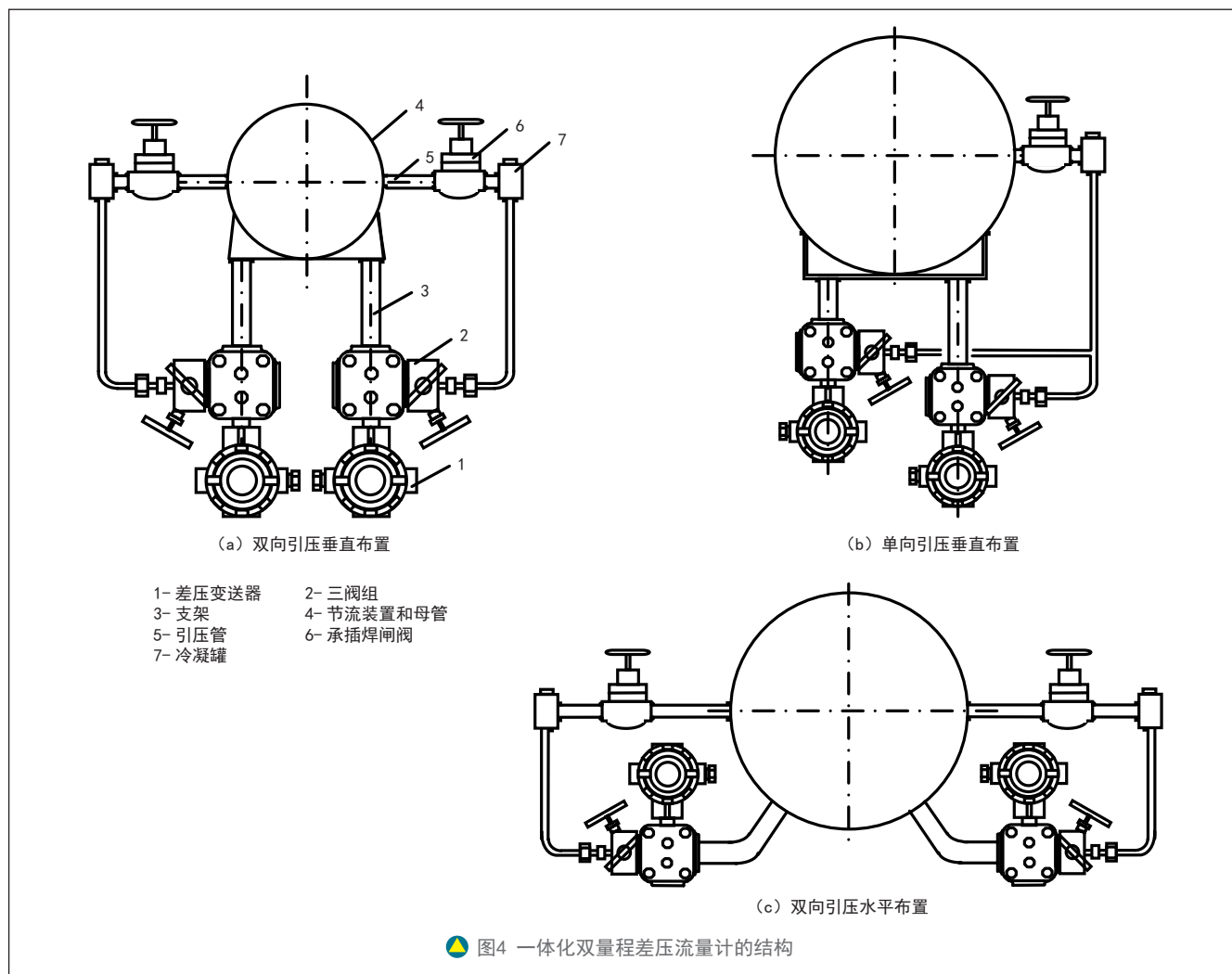


图3 系统不确定度与流量的关系



级是用引用误差表示的，对于0.065级差压变送器，在全量程范围之内，除了零点之外，各点允许的误差都是 $\pm 0.065\%FS$ ，所以在相对流量较小时，差压测量不确定度很大，从而使流量计系统不确定度增大，量程比提不高。

(3) 增设一台低量程差压变送器，可使量程低段的差压测量不确定度缩小到原来的1/33，从而扩大了流量测量量程比。当然还要避免差压信号的传递失真，并对流出系数的非线性和可膨胀性系数的变化进行在线校正，量程比可达到100:1。

(4) 经在流量标准装置上的实验验证^[12]，再次证明国家标准和国际标准所提供的数学模型精度是很高的。这一点在现场运行实践中也得到证明。IWM

本文参考资料

- [1] 纪纲. 流量测量仪表应用技巧[M]. 第二版. 北京: 化学工业出版社. 2003, 16-24, 50-257.
- [2] 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.
- [3] ISO. ISO5167-2 (2003E) Measurement of fluid by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full-part2: orifice Plates[S]. Switzerland: ISO, 2003.
- [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] 陈勇, 马璐文, 陈新亮, 叶海青, 纪纲, 纪波峰. 双量程孔板流量计不确定度及量程比[J]. 石油化工自动化. 2013(5): 52-56.
- [6] 王建忠, 纪纲. 差压式流量计范围度问题的研究[J]. 自动化仪表. 2005(8): 4-6, 9.
- [7] 于阳, 纪纲, 徐华东. GILFLO流量计在蒸汽计量中的应用[J]. 上海计量测试. 2008(2).
- [8] 程建三, 纪纲. 双量程差压流量计的新进展[J]. 石油化工自动化. 2009, 45(2): 54-57.
- [9] 国家质检总局计量司等组编. 2008全国能源计量优秀论文集[C]. 北京: 中国计量出版社, 2008: 554-559.
- [10] 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.
- [11] 纪纲, 纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [12] 魏峰, 谢林, 纪波峰, 陈杰, 纪纲. 双量程差压流量计不确定度和量程比的验证[J]. 石油化工自动化. 2013(6): 54-57.

本文参与有奖征文评选

欢迎您对本文发表评论，也希望您能参与《仪表世界》有奖征文活动，期待您的来稿！

评论和投稿请发送至：

iwm@jixunmedia.com