

提高差压法流量测量精度点滴*

骆美珍 (华东电力试验研究院 200437)
龚毅 (上海吴泾热电厂 200241)
陈少华 (上海宝科自动化仪表研究所 200940)

摘要：选用高精度的差压变送器和流量二次表，合理解决系统设计和开表投运中的相关问题，能使系统精度得到提高。

关键词：差压法流量测量 精度 开方运算 误差修正

一、前言

最近二十年以来，流量测量技术获得了飞速的发展，多种新型流量计相继问世。它们以其各自的优点占据自己的市场份额，为用户服务。与此同时，传统的差压式流量计尽管不象二十多年前那样一统流量测量的天下，但也以其强大的生命力占据着大块的市场份额。这当中一条重要原因，就是随着现代微电子技术、计算机技术和其他新技术的发展，变送器和流量测量二次表的精度大幅度提高，功能大大加强，差压式流量测量技术得到进一步完善和发展。现在的差压式流量计，已经不是二十多年前的差压式流量计。

在热电厂，由于大量的测量对象是以计量为目的的高温、高压、大管径蒸汽流量，在这里，差压式流量计仍然具有独到的优势，因此仍然居于统治地位。

作者在考机室对山武-霍尼威尔公司的 STD 920 型智能差压变送器与上海宝科自动化仪表研究所生产的 FC 6000 型通用流量演算器组成的系统，进行安装前的精度和稳定性考核，用 0.02 级气动浮球式标准压力计作标准，经一星期的考核，二次表显示值从 10% FS ~ 100% FS 各点，最大误差均 $\leq 0.03\%$ FS，其信号连接如图 1 所示，各点最大误差记录如表 1 所示。

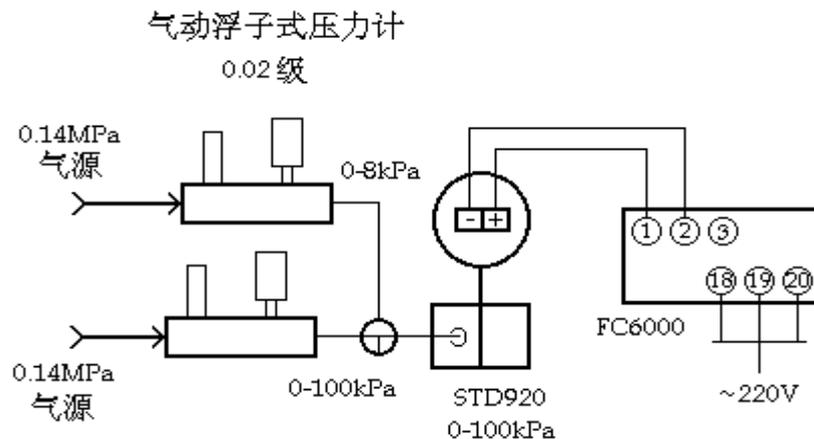


图 1 差压式流量计考机连接图

达到如此高的精度，在十年前连想都不敢想。这不仅表明技术水平的是提高了一大步，而且也表明仪表制造厂严把质量关的负责精神。因为变送器和二次表的名义精度都是 ± 0.1

% FS，经过精选的仪表能达到 $\pm 0.05\%$ FS。

但是，图 1 所示的并不是流量测量系统全部，并不等于这些仪表与节流装置组合起来并投入运行，就一定能够得到很高的流量测量精度。因为影响差压式流量测量系统精度的因素有多方面，一套差压式流量计的节流装置，在按有关标准设计制造和安装之后，影响系统精度的重要因素还有流体密度 ρ_1 以及影响流出系数 C 的雷诺数和流束膨胀系数 ϵ_1 等。对于 ρ_1 的修正、C 的修正和 ϵ_1 的修正，在流量二次表中已经有现成的手段，所以本文对上述各影响因素不作讨论，而仅仅对影响测量精度的下面几个方面进行分析和讨论。

表 1 校验记录（开平方运算由变送器完成）

标准表示值			被校表示值	被校表误差	
$\Delta P(\text{kPa})$	F(%)	F(t/h)	(t/h)	t/h	%
0	0	0.000	0.000	± 0.00	± 0.00
1	10	12.50	12.54	+0.04	+0.03
4	20	25.00	25.02	+0.02	+0.02
9	30	37.50	37.53	+0.03	+0.02
16	40	50.00	50.00	± 0.00	± 0.00
25	50	62.50	62.52	+0.02	+0.02
36	60	75.00	74.99	-0.01	-0.01
64	80	100.00	99.97	-0.03	-0.02
100	100	125.00	124.97	-0.03	-0.02

二、开方运算由智能变送器承担

在差压式流量测量系统中，开平方运算是必不可少的。随着计算机技术的发展，开平方运算的精度获得了惊人的提高。电动 III 型表中，实现开平方运算要损失 0.5%精度，可是在智能化仪表中，开平方运算由微处理器完成，属数字量运算，能基本达到 0 级精度。

在图 1 所示的系统中，流量二次表和变送器都可以通过组态使其具有开平方功能，因此就出现了一个开平方运算究竟由谁来承担更合理的问题。根据误差分析和变送器内部的信息流程可知，当流量 $\geq 50\%$ FS 时由变送器开平方和由二次表开平方都不损失精度。由于开方前后有下面的关系式存在，即 $q = k\sqrt{\Delta p}$ ，所以当流量 $< 50\%$ FS 时，此式的一阶导数 > 1 ，因此开方模块在对输入信号放大的同时，将输入信号中所包含的误差也进行了放大，所以，开平方运算由前级来完成有利于提高系统精度。从实验室测试情况来看，结果与此结论相符，图 1 所示的系统，在 $q = 10\%$ FS 点，若由前级完成开平方运算，瞬时流量最大误差 $\leq 0.03\%$ FS；而若由后级完成开平方运算，低端流量示值误差达 0.06% FS。其余各点误差数据如表 2 所示。

三、尽量减少中间环节

图 1 所示的变送器与二次表的连接方式为直接连接，FC 6000 型通用流量二次表带外供

24V DC 电源，为变送器供电，同时，两线制电流信号直接馈入二次表。这样可以使精度损

表 2 校验记录 (开平方运算由演算器完成)

标准表示值			被校表示值	被校表误差	
$\Delta P(\text{kPa})$	F(%)	F(t/h)	(t/h)	t/h	%
0	0	0.000	0.000	± 0.00	± 0.00
1	10	12.50	12.58	+0.08	+0.06
4	20	25.00	25.04	+0.04	+0.03
9	30	37.50	37.55	+0.05	+0.04
16	40	50.00	50.00	± 0.00	± 0.00
25	50	62.50	62.52	+0.02	+0.02
36	60	75.00	75.00	± 0.00	± 0.00
64	80	100.00	99.98	-0.02	-0.02
100	100	125.00	124.97	-0.03	-0.02

失减到最小。而如果改由配电器供电，或在变送器与二次表之间增设隔离模块，则必然增加由此引入的误差因素。配电器和隔离模块虽然精度较高，例如配电器，精度一般为 0.2 级，但是这个数字对于计量来说，实在是太大。

省去配电器或隔离模块，不仅提高了系统精度，而且节约投资和提高系统可靠性。

四、安全栅的配用

上面讨论的变送器与二次表直接连接的方法，在无防爆要求的场所使用，是适宜的，但如果变送器安装现场有防爆要求，这种连接方案就不行了。此时在变送器与二次表之间必须增设安全栅。

安全栅可供选用的型号有多种，相应的也就有多种连接方法和精度，当然应该选精度高的品种。例如 P+F 公司 KFD2-STC1-EX1 型安全栅^[1]，适合与智能差压变送器配用，使用通讯器时也不必另外串入 250 Ω 电阻，电流传输误差 $\leq \pm 10\mu\text{A}$ 。P+F 公司的齐纳安全栅，虽然有一些不足之处，但工作时齐纳稳压管的漏电流大大小于 10 μA ，从提高精度考虑，具有明显的优越性，而且价格相当便宜。

五、采用直通型孔板切断阀

节流件两端所产生的差压信号，不失真地传递到差压变送器，是保证系统精度的重要一环。以蒸汽流量计为例，冷凝器上层的水蒸气由于损失热量冷凝成水滴，使冷凝器中的水位升高。而高过溢流口水，经孔板切断阀和导压管流回母管。另外冷凝器上层的水蒸气部分冷凝，使汽相压力出现下降趋势，从而导致母管中水蒸气向冷凝器补充。这样，水蒸气进入冷凝器和冷凝水流回母管就形成了永无止息的循环。如果孔板切断阀选配的是直通阀，则上述汽液交换过程中，汽相在流通截面的上部流动，液相在下部流动，汽液两相相安无事，冷凝器中液位和压力均平稳。但若选用的是截止阀(针形阀)，由于流路不理想，在汽液交换过

程中，难免蒸汽从水中通过，出现类似“冒泡”的现象。这一现象使得送到差压变送器的差压信号出现额外的波动。不论流量计运行在标尺的高端还是低端，这种差压的波动都存在。我们在现场观察，常常看到蒸汽流量计运行在标尺低端时，流量示值有明显的波动，这种波动与上述的流路不理想有密切的关系。

这种直通阀门，可供选用的产品有多种，例如上海梅陇阀门厂生产的 Z61H 系列承插焊锻钢闸阀，工作压力和工作温度都达到了较高级别，很适合用作节流装置切断阀。

六、差压变送器零点和静压误差的校准

差压变送器零点变化和安装位置的影响，都会使其零位输出偏离应有值，因此需对变送器零位进行校准。这种校准是将差压变送器正负压口连通并通大气，然后校准零点。

作这样的校准是重要的，但若将静压误差结合起来校准，则工作效率更高。因为差压式流量测量中的差压计，实际工作时总是有一定的静压存在。

在智能差压变送器中。虽然已经有压力传感器将静压测量出来，经 A/D 转换后送表内微处理器，并有微处理器将静压对差压示值的影响分若干点进行补偿，但补偿后，静压对差压测量的影响总是还有一些。所以在现场的开表投运中，在实际使用的静压条件下，将此静压引起的差压示值误差予以校正，有利于提高精度。

此项校准操作方法，是将三阀组上高低压阀中的一只关死，另一只打开，引入被测流体静压，然后打开平衡阀，这时变送器的输出应为 4mA 或流量二次表瞬时流量显示值恰巧为零。

在进行此项操作前，将差压变送器和流量二次表中的小信号切除功能予以解除是重要的，否则差压变送器的真正零位输出无法读出。

七、孔径误差和管径误差的修正

节流装置在出厂时，制造厂提供的资料中给出了节流件开孔直径 d_{20} 和直管段内径 D_{20} 的设计值，但实际节流装置的孔径 d'_{20} 和直管段内径 D'_{20} 同此设计值总是有一定误差，这一误差所对应的流量测量不确定度一般均小于 $\pm 0.2\%$ ，但是作为计量使用的节流装置，最好将此误差予以修正。修正方法如下。

从 GB/T 2646-93 标准中的质量流量公式和流出系数公式^[2]知：

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

式中： q_m —— 质量流量，kg/s；

C —— 流出系数；

β —— 节件孔径与直管段内径之比 d/D ；

ε_1 —— 流束膨胀系数；
 d —— 节流件孔径，m；
 Δp —— 差压，Pa；
 ρ_1 —— 节流件入口端流体密度，kg/m³

从 20 时的孔径和管道内径 d_{20} 、 d'_{20} 、 D_{20} 、 D'_{20} 换算到工作条件下的孔径、管径 d 、 d' 、 D 、 D' ，只需进行温度膨胀系数修正， $\beta = \frac{d}{D}$ 。

在作 β 误差修正时，忽略雷诺数的影响，则^[2]

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得

$$\begin{aligned}
 q_m &= \frac{0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot d^2 \cdot (\varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho_1}) \\
 &= \frac{0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot d^2 \cdot u
 \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $u = \frac{\pi}{4} \cdot \varepsilon_1 \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho_1}$

当流量为满度，即 $q_m = Q_m$ 时将 β 和 d 的设计值代入式(3)求出 u ，即

$$u = \frac{Q_m}{\frac{0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot d^2} \quad (4)$$

然后将 $\beta' = d'/D'$ 、 d' 和 u 值代入(3)得到实际满刻度值 Q'_m 。在对流量二次表组态时，只需将 Q'_m 值填入 FC 6000 的副数据第 15 项^[3](标尺上限)，仪表运行后，就完成了孔径和管径的修正。

举例：有一节装置的孔径和管径设计值和实际值分别为：

$d=30.00$ mm；
 $d'=29.99$ mm；
 $D=50.00$ mm；
 $D'=50.02$ mm；
 $Q_m=1000.00$ kg/h。

则 β 设计值为 0.6，而 $\beta' = d'/D' = 0.59956$ ，将上述数据代入(4)和式(3)中得 $Q'_m = 999.12$ kg/h。

八、结束语

差压式流量计虽已年代久远，相当成熟，但随着有关新技术的引入，仍在进一步完善和提高。采取一些行之有效的措施。就能使系统精度获得提高，其他性能获得改善。

参 考 文 献

1. PEPPERL+FUCHS Ex-i-Interface DIN-Rail HOUSING 1996 203
2. 国家技术监督局 GB/T 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 5~22
3. 上海宝科自动化仪表研究所 FC 6000 型通用流量演算器操作说明书 13

*本文在《炼油化工自动化》第五届编委会暨论文发布会上获得优秀论文二等奖。
原载于《石油化工自动化》1998 年第 5 期。