

蒸汽流量测量的常用方法

提 要: 叙述目前蒸汽流量测量中使用最广泛的差压式流量计和涡街流量计工作原理及应用, 并对标准节流装置差压式流量计存在的范围度较窄的缺陷进行分析, 介绍一体化双量程差压流量计和线性孔板差压流量计工作原理、特点和现场使用。重点强调 C 在线补偿、 ε_1 在线校正和防止差压信号传递失真的意义。

关键词: 蒸汽 流量测量 差压式流量计 双量程流量计 线性孔板 涡街流量计

蒸汽是工业生产和采暖制冷各行各业使用最为广泛的载热工质, 是重要的二次能源, 蒸汽流量的测量量大面广, 对加强管理、公平贸易、节约能源、提高经济效益等方面都有重要意义。蒸汽流量测量方法如果按工作原理细分, 可分为直接式质量流量计和推导式 (也称间接式) 质量流量计两大类。前者直接检测与质量流量成函数关系的变量求得质量流量; 后者用体积流量计和其他变量测量仪表, 或两种不同测量原理流量计组合成的仪表, 经计算求得质量流量。

现在人们广泛使用的蒸汽质量流量计绝大多数仍为推导式。其中, 以节流式差压流量计和涡街流量计为核心组成的蒸汽质量流量计是主流, 这两种方法有各自的优点和缺点, 而且具有良好的互补性。在差压式流量计中, 线性孔板以其范围度广, 稳定性好的优势占有一定市场份额。双量程差压流量计也因其简单、便宜, 范围度得以扩展而得到推广。除此之外, 科氏力质量流量计、均速管流量计、超声流量计等在蒸汽流量测量中也有应用。

1 用标准节流装置差压流量计测量蒸汽质量流量

节流式差压流量计的一般表达式为^[1]

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

式中 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。

在式 (1) 中, β 和 d 为常数, 因此式可简化为

$$q_m = kC\varepsilon_1\sqrt{\rho_1} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (2)$$

从式 (2) 可清楚看出, 仪表示值同 ρ_1 密切相关。而蒸汽工况 (温度 t , 压力 p) 的变化, 必然使 ρ_1 产生相应的变化。因此, 差压式流量计在对差压进行测量的同时, 必须对蒸汽密度进行直接或间接的测量。

在实际应用系统中, 常用测量点附近的流体温度、压力, 经查表和计算后求得相应的密度, 再经演算求得瞬时质量流量, 通常称作温度、压力补偿。由于水蒸气的性质和特点, 在过热状态和饱和状态时可有不同的补偿方法。

(1) 过热蒸汽质量流量测量

当流体为过热蒸汽时, ρ_1 取决于流体压力 p_1 和流体温度 t_1 。图 1 所示为测量系统图。

(2) 饱和蒸汽质量流量测量

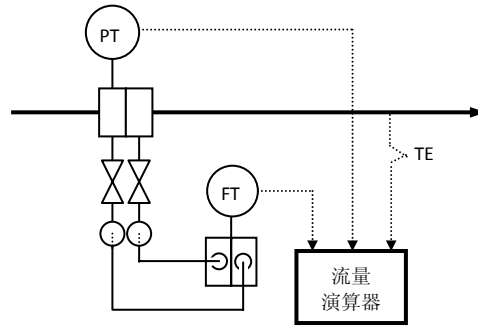


图 1 节流式差压流量计测量过热蒸汽质量流量系统图

饱和蒸汽的压力和温度是密切相关的，临界饱和状态的蒸汽从其压力查得的密度同从其温度查得的密度是相等的，所以推导式质量流量计测量其流量时，既可采用压力补偿也可采用温度补偿。采用压力补偿时，是利用 $\rho_1 = f(p_1)$ 的关系获得 ρ_1 ；采用温度补偿时，是利用 $\rho_1 = f(t_1)$ 的关系获得 ρ_1 。两种方法中以压力补偿较宜，可以得到更高的系统精确度^[2]。

图 2 (a) 所示为压力补偿法，图 2 (b) 所示为温度补偿法。

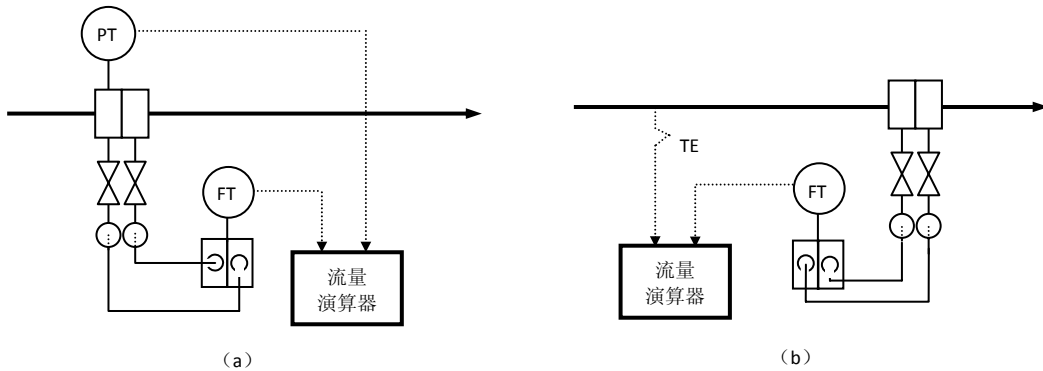


图 2 差压式流量计测量饱和蒸汽质量流量系统图

在火电厂，有一部分蒸汽流量测量点，流量仅在很小的范围内变化，式 (2) 中的 C 和 ε_1 均可看作常数，但在另一部分测量点，流量可能在很大的范围内变化，这时，再将 C 和 ε_1 看作常数，必将带来较大误差。这是因为流量在较大的范围内变化，引起管道内雷诺数作相应的变化，而 C 是雷诺数的函数，所以 C 也会有显著的变化。这种流量的变化，使得 Δp 的变化幅值更大，而 ε_1 是 Δp 的函数，所以， ε_1 作相应的变化。具体的关系如式 (3) 和式 (4) 所示。

GB/T 2624-2006 给出了 C 和 ε_1 的最新表达式^[3]，它具有更好的精确度，反映了差压式流量计的最新研究成果。但是，新标准的表达式更冗长，为了节省篇幅和更容易理解原理，本文中仍以 GB/T 2624-93 中的表达式为例说明原理。

GB/T 2624-93 给出了标准节流装置流出系数 C 随雷诺数 Re_D 变化的关系式，其中角接取压标准孔板的关系式如式 (3) 所示^[4]。

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5}\left(10^6 / Re_D\right)^{0.75} \quad (3)$$

式中： β —— 标准孔板开孔直径与管道内径之比；

Re_D —— 雷诺数。

为了更清楚地说明雷诺数对流量计范围度的制约，图 3 画出了 $\beta=0.6$ 的典型标准孔板流出系数随雷诺数变化的关系曲线，从图中可清楚看出，雷诺数 $< 10 \times 10^4$ 后，所对应的 C 值已经迅速上升^[5]，因此，对

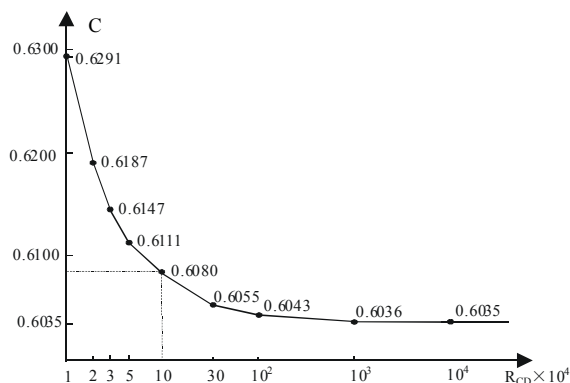


图 3 典型标准孔板流出系数随雷诺数变化曲线（ $\beta = 0.6$ ）

于具体的一个流量测量点，如果某一时段雷诺数进入这一区间，流量计实际流出系数与设计值之差将大于 0.6%。因此须对 C 进行在线补偿。

GB/T 2624-93 给出了标准节流装置 ε_1 关系式，其中标准孔板 ε_1 关系式如式（4）所示。即角接取压、法兰取压和径距取压， ε 都可用式（4）表示^[4]。

$$\varepsilon_1 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \times \frac{\Delta p}{p_1} \times \frac{1}{\kappa} \quad (4)$$

式中 ε_1 —— 使用状态下的可膨胀性系数；

β —— 直径比；

Δp —— 差压，Pa；

p_1 —— 使用状态下节流件前流体绝对压力，Pa；

κ —— 等熵指数。

被测流量变化时，差压 Δp 在广阔的范围内变化，使得实际 ε_1 值有显著的变化^[5]。

在火电厂，由于具有高温、高压、高流速、大管径和节流件承受高压差等特点的蒸汽测量对象较普遍，所以 ISA1932 喷嘴和长径喷嘴使用得较多。从喷嘴的 ε_1 表达式可知^[4]， ε_1 受 Δp 的影响幅值约为标准孔板的 2 倍，因此，喷嘴型差压流量计中， ε_1 的在线校正意义更大。

对 C 进行在线补偿和对 ε_1 进行在线校正，一般在流量演算器中完成^[2]，在使用多变量变送器的测量点，也可在多变量变送器中完成。

2 用双量程节流式差压流量计测量蒸汽质量流量

人们在使用差压式流量计时，总嫌其范围度不够理想，这主要是由其测量原理决定的。

为了分析的方便，我们将（2）简化为式（5）。

$$q_m \approx k\sqrt{\Delta p} \quad (5)$$

经无量纲处理后，就可得到如图 4 所示的 $q_m = f(\Delta p)$ 关系曲线。

分析差压测量不确定度对流量测量不确定度的影响可采用偏微分的方法。从式（5）可得

$$\frac{\partial q_m}{q_m} = \frac{1}{2} \frac{\partial \Delta p}{\Delta p} \quad (6)$$

由于差压变送器的误差都是用引用误差来表示的，因

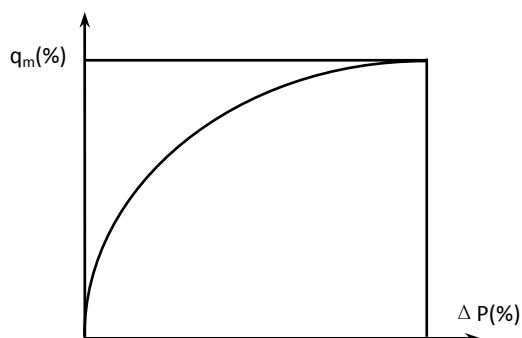


图 4 $q_m = f(\Delta P)$ 曲线

此， Δp 的相对值为不同数值时 $\frac{\partial \Delta p}{\Delta p}$ 也不同。

例如，对于 0.075 级精度等级的变送器，在 $\Delta p = 100\%FS$ 时， $\frac{\partial \Delta p}{\Delta p} = 0.075\%$ ；在 $\Delta p = 3.75\%FS$ 时， $\frac{\partial \Delta p}{\Delta p} = 2\%$ ，由式（4）可知，在后一种情况下，对流量测量不确定度影响为 1%。

从上面的分析计算可知，为了获得 $\pm 1\%$ 的流量测量精度，如果选用的是 0.075 精度等级的差压变送器，只有在差压大于 3.75%FS，即流量大于 19.36%FS 时，才能保证精度。

为了提高相对流量较小时的差压测量精度，另外增设一台低量程差压变送器是一个行之有效的方法。例如有一蒸汽流量测量对象，最大流量 100t/h，最小流量 3t/h，常用压力 1.1MPa，常用温度 250℃，公称口径 DN500，高量程差压变送器选用 0.075 级中差压变送器，测量范围：0~100kPa，低量程差压变送器选用 0.075 级低差压变送器，测量范围设定为 0~3kPa（对应的流量测量范围：0~17.32t/h），这样，两台变送器在智能二次表的指挥下，自动切换，相互配合。从而保证量程低端的流量测量精确度。

双量程节流式差压流量计，由于量程低端的差压值很小，差压变送器和节流装置之间如果采用传统的分离式布置，由于多多少少要产生一定的差压信号传递失真，由此带来的误差将是可观的。为此，研究者开发了一体化双量程节流式差压流量计^[6]。其结构如图 5 所示。

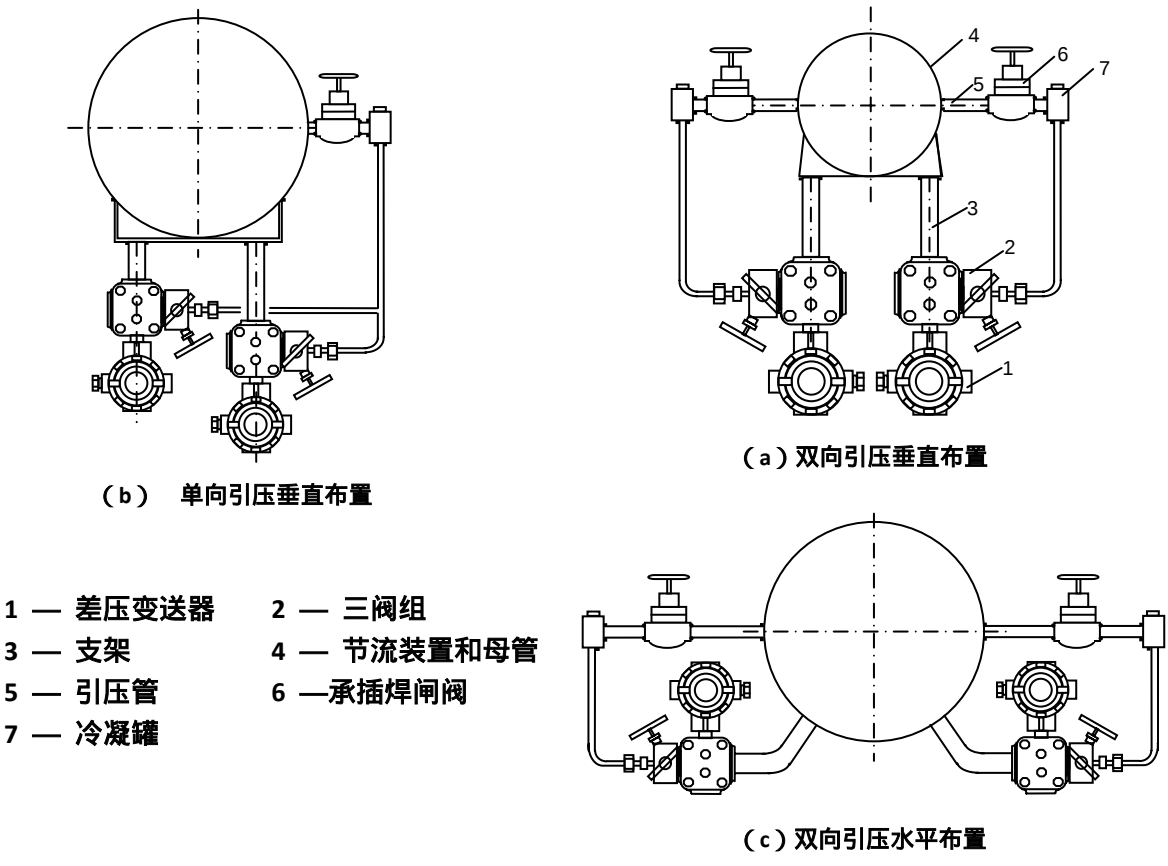


图 5 一体化双量程差压流量计的结构

现场实际使用结果表明，如果合理选定流量的高低量程和差压变送器上限，合理选择差压变送器，避免每一个环节可能引起的差压信号传递失真，流量上限的 1%就能可靠测量，流量上限的 3%就能保证精度。

3 线性孔板差压流量计原理及其在蒸汽计量中的应用

3.1 线性孔板流量计工作原理^[7]

线性孔板又称弹性加载可变面积可变压头孔板，其环隙面积随流量大小而自动变化，曲面圆锥形塞子在差压弹簧力的作用下来回移动，环隙变化使输出信号（差压）与流量成线性关系，并大大地扩大范围度，其结构如图 6 所示。

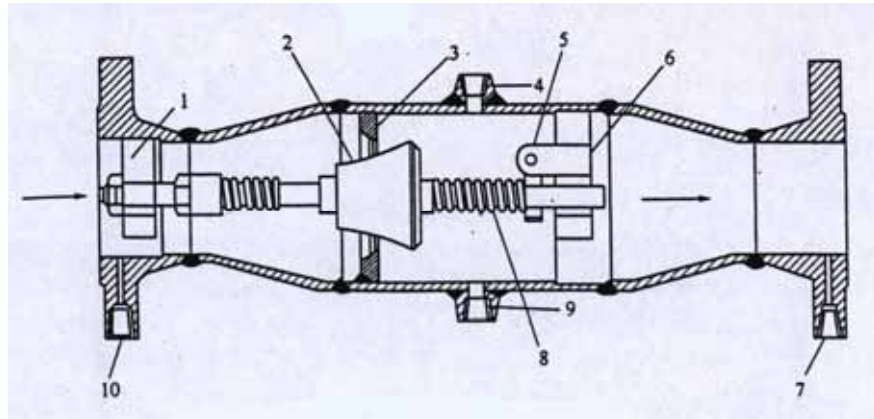


图 6 线性孔板（GILFLO 型节流装置）

1 — 稳定装置；2 — 纺锤形活塞；3 — 固定孔板；4 — 排气孔；5 — 标定和锁定蜗杆装置；6 — 轴支撑；
7 — 低压侧差压检出接头；8 — 高张力精密弹簧；9 — 排水孔；10 — 高压侧差压检出接头

在孔板流量计中，当流体流过开孔面积为 A 的孔板时，流量 q 与孔板前后产生的差压之间有如下关系：

$$q = K_1 \cdot A \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (7)$$

式中 q —— 流量；

K_1 —— 常数；

A —— 孔板开孔面积；

Δp —— 差压。

在如图 6 所示的线性孔板中，于孔板处插入一个纺锤形活塞，由差压引起的活塞—弹簧组件的压缩量（活塞的移动距离）为 X ，则式（8）成立：

$$\Delta p = K_2 X \quad (8)$$

式中 K_2 —— 弹簧系数。

当活塞向前移动时，流通面积受活塞形状的影响而发生变化，其关系为：

$$A = K_3 \cdot \sqrt{X} \quad (9)$$

式中 K_3 —— 常数。

由式（8）和（9）得

$$A = K_3 \cdot \sqrt{\Delta p / K_2} \quad (10)$$

将式（10）代入式（7）得

$$\begin{aligned} q &= K_1 \cdot K_3 \cdot \sqrt{\Delta p / K_2} \cdot \sqrt{\Delta p} \\ &= K \cdot \Delta p \end{aligned} \quad (11)$$

式中 K —— 常数 ($K = K_1 \cdot K_3 \cdot \sqrt{1/K_2}$)。

由式（11）可知，流量与差压成线性关系，所以取出差压信号即可得到流量。

3.2 特点

（1）范围度宽

典型的线性孔板差压式流量计范围度可达 100:1^[7]，因此，对于流量变化大的测量对象，一台流量计就可解决。能适应蒸汽、燃油测量的夏季、冬季负荷变化。

(2) 精确度高

由于逐台经过水标定，并进行多项补偿，因此测量精确度大大提高，可达 $\pm 1\%$ 。

(3) 线性差压输出

差压信号与流量成线性关系，被测流量相对于满量程流量较小时，差压信号幅值也较大，有利于提高测量精确度。

(4) 直管段要求低

由于孔板的变面积设计，使其成为在高雷诺数条件下工作的测量机构，可在紧靠弯管、三通下游的部位进行测量（为了保证测量精确度，制造厂还是要求上游直管段 ≥ 6 倍管径，下游直管段 ≥ 3 倍管径）。

(5) 耐振性好

在振动较大的恶劣场所，人们总是抱怨涡街流量计用不好，容易出现“无中生有”和示值偏高问题。线性孔板耐振性要比涡街流量计优越。

3.3 保证测量精确度的措施

典型的线性孔板流量计 GILFLO 承诺具有 $\pm 1\%$ 精确度，为了达到这一指标，采取了几项重要措施，其中：

(1) 对线性孔板逐台用水标定

从式（8）和（9）可知，只要线性孔板中的弹簧线性好，而且活塞被加工成理想形状，使得流通面积 A 与位移 X 的 $1/2$ 次方成线性关系，就能使差压与流量之间的线性关系成立，但是，活塞的曲面加工得很理想是困难的，最终不得不用逐台标定的方法来弥补这一不足。

Spirax-sarco 公司对线性孔板进行逐台标定是以水为介质，不同口径的线性孔板均选择 14 个标定点，其中流量较小时，标定点排得较密，图 7 所示为一台 DN200 线性孔板的标定曲线。图中的差压单位为英寸水柱，（1 英寸水柱 = 249.0889Pa），表 1 所列是一台 DN200 的线性孔板的实际标定数据，其中从体积流量换算到质量流量是建立在水的密度 $\rho = 998.29 \text{ kg/m}^3$ 基础上的。

而利用标定数据对线性孔板的非线性误差进行校正还须借助于流量二次表。具体做法是将标定数据写入二次表中的折线表，然后二次表根据输入的差压信号（电流值）用查表和线性内插的方法求得水流量值 q_{mw} 。

得到水流量值还不是最终目的，因为被测流体不一定是水，当被测流体为其他液体时，用式（12）进行密度校正。

$$q_m = q_{mw} \cdot \sqrt{\rho_f / \rho_w} \quad (12)$$

式中 q_m —— 被测流体质量流量，kg/h；

q_{mw} —— 标定流体（水）流量，kg/h；

ρ_f —— 被测流体密度， kg/m^3 ；

ρ_w —— 标定流体（水）密度， kg/m^3 。

(2) 雷诺数校正

孔板流量计的流量系数同雷诺数之间有确定的函数关系^[4]，当质量流量变化时，雷诺数成正比变化，因而引起流量系数的变化。在 GILFLO 型流量计中，采用较简单的经验公式（13）进行雷诺数校正。

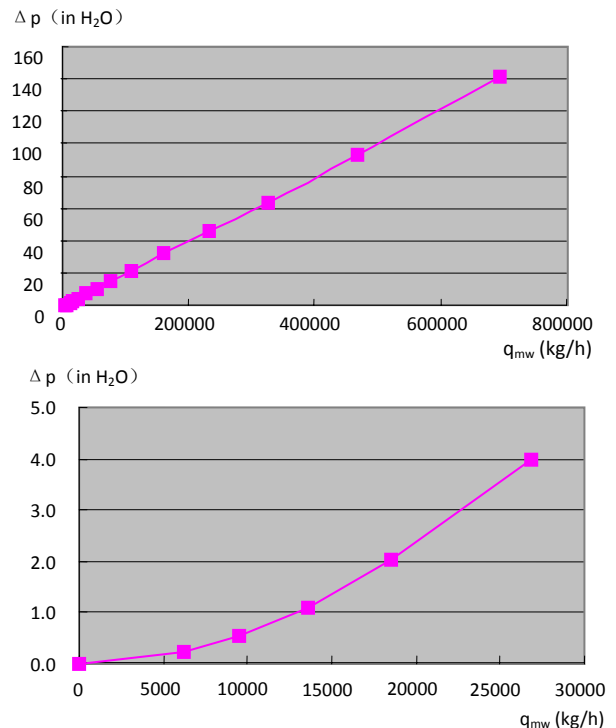


图 7 线性孔板标定曲线（介质：水）例

表 1 GILFLO 线性孔板水标定例 (DN200)

标 定 数 据		查 表 数 据	
水的实际流量 (20℃)	差 压	差压变送器输出电流	工作流体流量
kg / h	in H ₂ O	mA	L / min
0.0000	0.0000	4.0000	0.0000
6247.4055	0.2450	4.0280	104.3018
9475.9305	0.5425	4.0620	158.2027
13543.0335	1.0938	4.1250	226.1039
18556.5315	2.0300	4.2320	309.8053
26804.5443	3.9813	4.4550	447.5076
40256.9694	6.8250	4.7800	672.0988
55856.3351	10.2988	5.1770	932.5336
78318.6682	14.7263	5.6830	1307.5470
111950.1528	21.5600	6.4640	1869.0319
163394.0063	31.7363	7.6270	2727.8981
235423.2212	45.7363	9.2270	3930.4414
327416.7604	63.7175	11.2820	5466.2934
469675.5153	92.8900	14.6160	7841.3340
693845.3638	141.3038	20.1490	11583.8979

注: lin H₂O=249.0889Pa

$$k_{re} = (1 - n/q_{mw})^{-1} \quad (13)$$

式中 k_{re} —— 雷诺数校正系数;

n —— 常数, kg/h。

但若计算结果大于 m 值, 则取 $k_{re} = m$ 。 n 和 m 数值同孔板的口径 DN 有关, 已经固化在制造商提供的流量二次表内。

(3) 温度对线性孔板的影响及其校正

温度对线性孔板影响使之产生误差主要通过三条途径:

① 流体温度变化引起流体密度变化、从而导致差压与流量之间的关系变化。

② 流体温度变化引起管道内径、孔板开孔直径以及活塞几何尺寸的变化, 温度升高, 环隙面积增大, 导致流量计示值有偏低趋势。

③ 流体温度变化, 线性孔板中的承载弹簧温度相应变化, 引起式 (8) 中的弹性常数 K_2 发生变化。温度升高, K_2 减小, 活塞位移 x 增大, 用通俗的话来说就是温度升高, 弹簧变软, 在相同的差压条件下, 活塞位移增大。因此, 环隙面积相应增大, 流量计示值也有偏低趋势。

上述三条途径对流量示值的影响都可以进行校正, 其中途径①, 可由上文式 (12) 中的流体密度进行补偿。在线性孔板用来测量蒸汽流量时, 流体温度作为自变量, 参与查蒸汽密度表。从而可由二次表自动进行此项补偿。

上述途径②和③流量示值的影响关系较复杂, 在 GILFLO 型流量计中, 采用式 (14) 所示的经验公式进行校正:

$$k_t = 1 + B(t - t_c) \quad (14)$$

式中 k_t —— 温度校正系数;

B —— 系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ (取 $B = 0.000189^{\circ}\text{C}^{-1}$);

t —— 流体温度 $^{\circ}\text{C}$;

t_c —— 标定时流体温度, $^{\circ}\text{C}$ (t_c 常为 20°C)。

此项校正也是在流量二次表中完成的, 其中 t 为来自温度传感器 (变送器) 的流体温度信号。

(4) 可膨胀性校正

节流式差压流量计用来测量蒸汽、气体流量时, 必须进行流体的可膨胀性 (expansibility) 校正, 线性孔板也不例外。依据 ISO 标准, 在 GILFLO 型流量计中用经验公式 (15) 进行校正^[4]:

$$k_{\varepsilon} = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \cdot \frac{\Delta p}{\kappa \cdot p_1} \quad (15)$$

式中 k_{ε} —— 可膨胀性系数；

β —— 直径比（孔板开孔直径与管道内经之比，制造商常取 0.6325）；

Δp —— 差压，Pa；

κ —— 等熵指数；

p_1 —— 节流件正端取压口绝压，Pa。

可膨胀性校正也在流量二次表中完成，由二次表进行在线计算。

（5）蒸汽质量流量的计算

用 GILFLO 型流量计测量蒸汽流量时，蒸汽质量流量在二次表中由式（16）计算得到：

$$q_{ms} = k_{re} \cdot k_{\varepsilon} \cdot k_t \cdot \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_w}} \cdot q_{mw} \quad (16)$$

式中 q_{ms} —— 蒸汽质量流量，kg/h；

k_{re} —— 雷诺数校正系数；

k_{ε} —— 可膨胀性系数；

k_t —— 温度校正系数；

ρ_f —— 被测流体工作状态密度，kg/m³；

ρ_w —— 标定流体（水）的密度，kg/m³；

q_{mw} —— 水的质量流量，kg/h。

在流量二次表中，先由差压输入信号查折线表得到 q_{mw} ，再由蒸汽温度、压力值查蒸汽密度表得 ρ_f ，然后与校正系数 k_{re} 、 k_{ε} 、 k_t 一起（ ρ_w 为设置数据）计算得到蒸汽质量流量 q_{ms} 。

3.4 线性孔板差压流量计的安装

线性孔板工作在量程低端时，纺锤形活塞与孔板之间的缝隙很小，容易被焊渣之类的固形物卡死，因此，安装时，线性孔板上游应配置目数合适的管道过滤器。并且，过滤器与线性孔板之间的距离应满足直管段要求。详情请参阅参考文献^[2]。

4 用涡街流量计测量蒸汽质量流量

涡街流量计是体积流量计，即流体雷诺数在一定范围内，其输出只与体积流量成正比。

涡街流量计的输出有频率信号和模拟信号两种，模拟输出时在频率输出的基础上经 f/I 转换得到的。这一转换大约要损失 0.1% 精确度。所以用来测量蒸汽流量时，用户更爱选用频率输出。

频率输出涡街流量计更受中低压蒸汽用户欢迎的另外几个原因是：

① 频率输出涡街流量计满量程修改更方便，只需对可编程流量演算器面板上的按键按规定的方法进行简单的操作就可实现。

② 由频率输出涡街流量计输出的频率信号计算蒸汽质量流量，只需知道流体当前工况，而模拟输出涡街流量计的温压补偿只是对当前工况偏离设计工况而引起的误差进行补偿，因此，不仅需知道当前工况，还需知道设计工况。这后一种工况数据常常因为时间推移或人事变迁导致资料遗失而引起差错，相比之下，频率输出涡街流量计却不会有此问题。参考文献^[2]的分析。

频率输出涡街流量计测量质量流量的表达式为

$$q_m = 3.6 \frac{f}{K_t} \cdot \rho_f \quad (17)$$

式中 q_m —— 质量流量，kg/h；

f —— 涡街流量计输出频率，P/s；

K_t —— 工作状态下的流量系数，P/L；

ρ_f —— 流体密度, kg / m^3 。

当被测流体为过热蒸汽时, 可从

$$\rho_f = f(p_f, t_f) \quad (18)$$

查表求得工作状态下的流体密度。测量系统图见图 8。

当被测流体为饱和蒸汽时, 可从

$$\rho_f = f(p_f) \quad (19)$$

或

$$\rho_f = f(t_f) \quad (20)$$

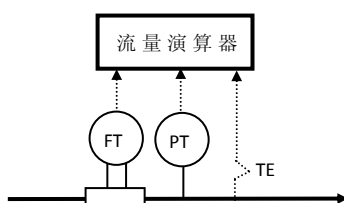


图 8 用旋涡流量计测量过热蒸汽质量流量的系统图

查表求得工作状态下的流体密度, 其原理同前节所述。其测量系统图见图 9。

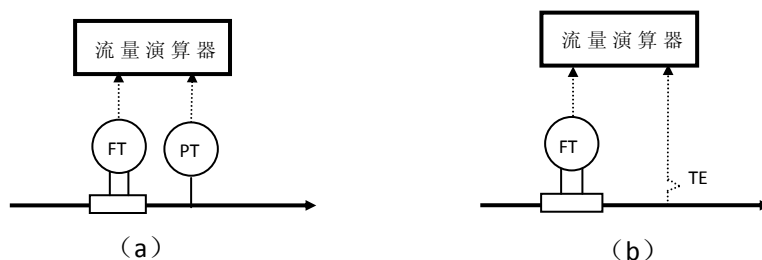


图 9 用涡街流量计测量饱和蒸汽质量流量的系统图

在式 (17) 中, ρ_f 应是涡街流量计出口的流体密度, 因此, p_f 的测压点应取在涡街流量计出口的规定管段上。

有些研究成果表明, 临界饱和状态蒸汽经减压后会发生相变, 即从饱和状态变为过热状态, 这时, 将其仍作为饱和蒸汽从式 (19) 或式 (20) 的关系求取 ρ_f , 必将引入较大误差^[2]。如果出现这种情况, 应进行温度压力补偿。

5 结束语

(1) 标准节流式差压流量计, 因其结构简单、牢固, 易于复制, 性能稳定可靠, 使用寿命长, 检定方便, 价格也便宜等优点, 尤其是对高温、高压、大管径测量对象的适应性, 令其在电力行业蒸汽流量测量中得到最广泛的应用。但由于流量变化范围较大的测量对象, C 和 ε_1 的变化幅值相应较大, 须进行 C 在线补偿和 ε_1 的在线校正。

(2) 一体化双量程差压流量计, 因为很好地解决了差压信号传递失真问题, 并大大改善了流量量程低端的差压测量不确定度, 因而可测范围可达 1~100%FS。

(3) 线性孔板流量计在工作中, 由于环隙面积相应变化, 使其输出信号与流量成线性关系。因为实行逐台标定, 并对温度变化、流体密度变化、雷诺数变化和可膨胀性系数变化进行在线补偿, 从而使精确度得以提高 ($\pm 1\%$), 范围度得到扩展 (100:1)。在涡街流量计不能胜任的许多恶劣场所, 在范围度要求高的场合, 线性孔板流量计具有独特的优越性。

参考文献

1. ISO5167-2(2003E) Measurement of fluid by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full-part2: orifice Plates
2. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧. 北京: 化学工业出版社. 2003
3. 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
4. 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. 王建忠, 纪纲. 差压流量计范围度问题研究. 自动化仪表, 2005(8): 4~6, 9
6. 袁均钢, 倪长兴, 纪纲. 双量程差压流量计原理与应用. 国家质检总局计量司组编 2008 全国能源计量优秀论文集. 北京: 中国计量出版社. 554~559
7. 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)

(摘自《世界仪表与自动化》2009 年第 1 期)