

差压式流量计量程比的扩展与线性孔板

殷胜军 常州市新港热电有限公司 (江苏常州 213033)

孙冰 嘉兴新嘉爱斯热电有限公司 (浙江嘉兴 314016)

李长武 苏州市计量测试研究院 (江苏苏州 215128)

提 要: 差压式流量计具有许多突出的优点, 所以获得了广泛的应用。但由于其量程比不够大这一缺陷, 使得应用者很有微词。人们几十年前就已开始差压流量计扩大量程比的研究, 现已得到公认的成果有两个, 一是增设一台低量程差压变送器, 提高量程低段的差压测量精确度, 组成双量程差压流量计。量程比可扩展到 100:1。另一是用几何学的方法使差压装置输出的差压信号与流量呈线性关系, 称之为线性孔板。文中着重分析了线性孔板的结构、原理以及保证精确度所采取的措施。其中有 14 点实流标定、密度自动补偿、雷诺数自动补偿、可膨胀性自动补偿以及温度自动补偿, 从而使量程比达到 100:1 和测量的高精度。

关键词: 线性孔板 量程比 雷诺数校正 可膨胀性系数 直管段

Turndown ratio expansion of differential pressure flowmeter and linear orifice

Yin shengjun Changzhou xingang thermal power plant Co., ltd. (Changzhou 213033)

Sun bing Jiaxing new Jies thermal power plant Co., ltd. (Jiaxing 314016)

Li changwu Suzhou institute of measurement and testing technology (Suzhou 215128)

Abstracts: Differential pressure flowmeter is widely used, because of its outstanding advantages. But its turndown ratio is not satisfied customers.

People began to study how to expand turndown ratio for DP flowmeter decades ago, and found two methods. One is adding a low range differential pressure transmitter, to compose a dual range DP flowmeter, which turndown ratio could reach 100:1. The other is changing flow signal linear relationship to the DP input by Geometry method, called linear orifice. This topic analyses linear orifice structure, principle and measure for ensure accuracy. They're 14 points calibration, density compensation, Reynolds compensation, expandable coefficient compensation, and temperature compensation. It makes turndown ratio reach 100:1.

Key words: Linear Orifice turndown ratio Reynolds compensation Expandable coefficient straight pipe

1. 概述

差压流量计作为现代的流量测量仪表已经有一百多年的历史。一百多年来, 人们对它进行了多次改进, 现在已经相当成熟, 成为一种研究最深入、应用最广泛的流量测量仪表, 它有很多显著的优点^{[1][2]}:

① 结构简单, 工作可靠, 安装在管道内的只有节流件, 只要不泄漏, 导压管不堵, 就能可靠工作, 将根部阀关闭, 就可切断与外界的联系。因此无需装设上下游切断阀及旁通阀。

② 抗干扰能力强, 抗振动性能好, 这两点在过程控制中, 特别重要, 所以在过程控制中, 大多数还是使用孔板流量计或喷嘴流量计。

③ 在存在流动脉动的场合, 差压式流量计受流动脉动伤害极其微小, 不象涡街流量计要受到致命性伤害^[3]。

④ 蒸汽带水对其影响较小, 不象涡街流量计那样易导致漏脉冲^[3]。

⑤ 超流速运行时, 差压装置输出超上限, 可用扩展差压变送器测量上限的方法予以解决, 不会象涡街流量计那样, 出现漏脉冲现象以致输出反而减小^[3]。

但是，差压式流量计也有其严重的缺点^[4]。即范围度不够大，这是由于普通差压装置的平方根特性所引起的。例如在满量程流量的 10%这一点，差压装置输出的差压只有满量程差压的 1%，而流量计所配用的差压变送器，虽然已经达到很高的精确度，例如±0.065%甚至更高，但是其精确度是用引用误差表示的，在满量程差压 1%这一点，允许误差换算到示值误差压就要达到百分之几。更不要说系统不确定度了。

2. 差压式流量计的系统不确定度

ISO5167: 2003 (E) 和 GB/T 2624-2006 给出了标准差压流量计不确定度计算公式^{[5] [6]}。

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

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；

$\frac{\delta \rho_1}{\rho_1}$ —— 密度测量不确定度。

从式 (1) 可以看出，系统不确定度由六个因子组成，对于标准孔板而言，在 $0.2 < \beta \leq 0.6$ 而且雷诺数 ≥ 5000 后， $\frac{\delta C}{C}$ 为 0.5%^[6]，而 $\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}$ 、 $\frac{\delta D}{D}$ 、 $\frac{\delta d}{d}$ 都很小^{[3][7]}， $\frac{\delta \rho}{\rho}$ 也可达到很小的数值，所以在相对流量较大例如 70%FS 时，能得到很小的系统不确定度^[3]，但是在相对流量较小时，情况发生了巨大变化，即 $\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$ 增大几十倍甚至几百倍，从而使量程低段的系统不确定度增大。

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。

还有的上门推销人员说自己的新型差压流量计，测量精确度高，在 10:1 的量程比范围内，精确度能达到±0.5%，这既缺乏理论依据，也无实验数据支持。殊不知在满量程流量 10%这一点，差压只有满量程差压的 1%，即使选用当今世界上精确度等级最高的差压变送器， $\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}$ 也要达到百分之几，即比 0.5%大数倍。因此，差压式流量计要扩大量比，都要过差压测量精确度这道坎。

人们在几十年前就已在研究差压流量计扩大量程比的问题^[8]，现在已经得到广泛应用的方法有两个：

- ① 增设一台低量程差压变送器，提高量程低段的差压测量精确度，组成双量程差压流量计^{[9][10]}。

当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时，系统不确定度和量程比为：

被测流体：液体	±1.0%读数值	3%~100% FS 区间
	±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	±1.5%读数值	3%~100% FS 区间
	±1.0%低量程上限	1%~3% FS 区间
	量程比：100:1	

② 改变流量传感器的特性，使相对流量较小时的差压值大幅度增大，在配用的差压变送器为 0.065 级时，量程比也能达到 100:1。

关于前一种方法，已经有人做过详细论述^{[1][12]}，下面拟就后一种方法做详细分析。

3 线性孔板的工作原理和特点

顾名思义，线性孔板就是输出差压与流量之间存在线性关系的一种特殊孔板，已经商品化的 GILFLO 线性孔板是英国斯派莎克公司（SpiraxSarco）的产品。

3.1 线性孔板的结构^[3]

线性孔板又称弹性加载可变面积可变压头孔板，其结构如图 1 所示。与普通孔板不同，在

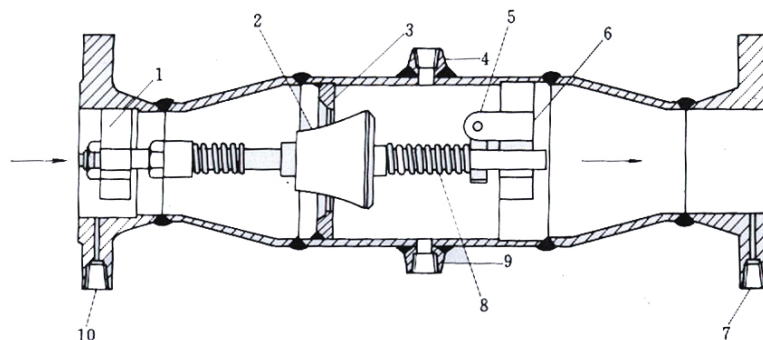


图 1 线性孔板（GILFLO 型差压装置）

- 1 — 稳定装置；2 — 纺锤形锥体；3 — 固定孔；4 — 排气孔；5 — 固定装置；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

性孔板（GILFLO 差压装置）中，管道轴线的位置固定有一根轴，轴上套有一个锥体 2 和高张力精密弹簧 8。当流量为零时，锥体在弹簧的作用下，伸入固定孔 3 的开孔内。流量出现后，在孔板两侧产生差压，此差压与柱塞的有效面积的乘积即为柱塞受到的自左向右的推力，导致柱塞自左向右移动。柱塞的移动使弹簧受到压缩，产生反作用力，此力与差压产生的推力大小相等，方向相反，从而取得平衡，柱塞停止移动，柱塞与孔板之间形成的环隙即为流通截面积。柱塞在差压弹簧力的作用下来回移动，使流通截面积随流量大小而自动变化，纺锤形柱塞的曲面是经过精确设计计算的，以致环隙的变化使输出信号（差压）与流量成线性关系，并大大扩大范围度。

3.2 线性孔板工作原理

在标准孔板流量计中，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，即^[13]

$$q = K_1 \cdot A \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (2)$$

式中 q —— 流量；
 K_1 —— 常数；
 A —— 孔板开孔面积；

Δp —— 差压。

在如图 1 所示的线性孔板中，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（3）成立，即

$$\Delta p = K_2 X \quad (3)$$

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，精确设计计算活塞的外形尺寸，使其移动距离的 1/2 次方与流通截面积成正比，即：

$$A = K_3 \cdot \sqrt{X} \quad (4)$$

式中 K_3 —— 常数。

由式（3）和（4）得

$$A = K_3 \cdot \sqrt{\Delta p / K_2} \quad (5)$$

将式（5）代入式（2）得

$$\begin{aligned} q &= K_1 \cdot K_3 \cdot \sqrt{\Delta p / K_2} \cdot \sqrt{\Delta p} \\ &= K \cdot \Delta p \end{aligned} \quad (6)$$

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

由式（6）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。

3.3 保证测量精确度的措施

线性孔板流量计 GILFLO 为了达到所承诺精确度，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（2）和（3）可知，只要线性孔板中的弹簧线性度好，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 2 所示为一台 DN100 线性孔板的标定曲线。图中的差压单位为 mbar，(1mbar = 0.1kPa)，表 1 所列是一台 DN100 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 $\rho = 998.29 \text{ kg} / \text{m}^3$ 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，当被测流体为其他介质时，用式（7）进行密度校正。

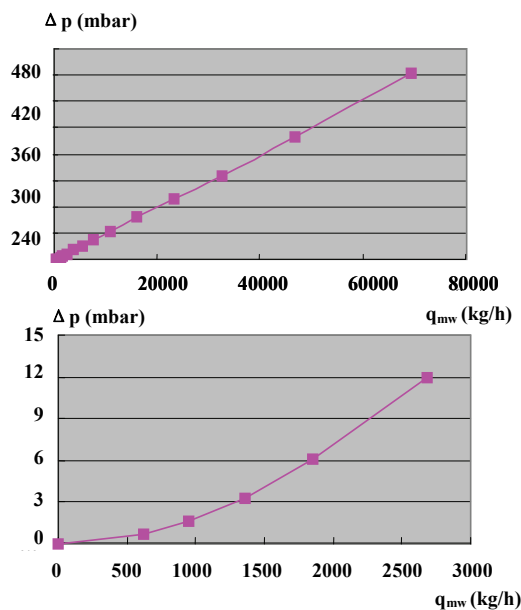


图 2 线性孔板标定曲线（介质：水）例

表 1 GILFLO 线性孔板水标定例 (DN100)

试验点	差压电流	差压值	差压	20℃时水		流量
				质量流量	体积流量	
	mA	mbar	%	kg/h	l/min	%
1	4.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
2	4.259	8.057	1.62	698.76	11.67	0.89
3	4.836	26.024	5.22	2110.59	35.24	2.70
4	5.329	41.383	8.31	3645.32	60.86	4.67
5	5.708	53.189	10.68	4854.84	81.06	6.21
6	6.277	70.882	14.23	7094.12	118.45	9.08
7	7.964	123.426	24.78	14257.85	238.06	18.25
8	9.486	170.814	34.29	21156.52	353.24	27.08
9	11.139	222.293	44.62	29188.35	487.35	37.36
10	12.520	265.276	53.25	36257.39	605.38	46.40
11	13.834	306.177	61.46	42953.32	717.18	54.97
12	15.211	349.076	70.07	50352.79	840.73	64.44
13	16.328	383.832	77.05	56405.66	941.79	72.19
14	17.763	428.521	86.02	64480.36	1076.61	82.52
15	18.996	466.909	93.72	72007.10	1202.28	92.15

注: 1 mbar=0.1 kPa

$$q_m = q_{mw} \cdot \sqrt{\rho_f / \rho_w} \quad (7)$$

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/m³;
 ρ_w —— 标定流体 (水) 密度, kg/m³。

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 (8) 进行雷诺数校正。

$$k_{re} = (1 - n / q_{mw})^{-1} \quad (8)$$

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 数值同孔板的公称通径 DN 有关, 已经固化在制造商提供的流量二次表内。

n 和 m 的取值见表 2。

对于 DN250 和 DN350 的线性孔板, 取

$$k_{re}=1$$

表 2 n 和 m 的取值

仪表通径	n /(kg/h)	m
DN50	1.1920	1.200
DN80	0.3035	1.125
DN100	0.0987	1.100
DN150	0.0613	1.067
DN200	0.0312	1.050
DN250	#	#
DN350	#	#

#=不用

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：

a. 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。

b. 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。

c. 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（3）中的弹簧常数 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 a，可由式（7）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 b 和 c 对流量示值的影响关系较复杂，在 GILFLO 型流量计中，采用式（9）所示的经验公式进行校正：

$$k_t = 1 + B(t - t_c) \quad (9)$$

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。在 GILFLO 型流量计中用经验公式（10）进行校正：

$$k_e = 1 - 0.3206 \frac{\Delta p}{P_1} \quad (10)$$

式中 k_e —— 可膨胀性系数；

Δp —— 差压，Pa；

P_1 —— 节流件正端取压口绝对静压，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 GILGLO 型流量计测量蒸汽流量时，蒸汽质量流量在二次表中由式（11）计算得到：

$$q_{ms} = k_{re} \cdot k_e \cdot k_t \cdot \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_w}} \cdot q_{mw} \quad (11)$$

式中 q_{ms} —— 蒸汽质量流量，kg/h；

k_{re} —— 雷诺数校正系数；

k_e —— 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/m^3 ；

ρ_w —— 标定流体（水）的密度， kg/m^3 ；

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} 。

⑥ 系统不确定度分析

从式 (11) 可以看出，系统不确定度由 5 个因子组成，其中 k_ϵ 和 ρ_f 的不确定度，与式 (1) 中的 $\frac{\delta\epsilon}{\epsilon}$ 、 $\frac{\delta\rho}{\rho}$ 相同， k_{re} 的不确定度与 $\frac{\delta C}{C}$ 相仿，但前者比后者单纯。 k_t 的不确定度是 GILFLO 中

所特有的，其估算方法还不清楚；式 (1) 中 $\frac{\delta D}{D}$ 、 $\frac{\delta d}{d}$ 和 $\frac{\delta\Delta p}{\Delta p}$ ，在 GILFLO 中归结为 q_w 的不确定度，因为在出厂前经流量标准装置实流标定得到而在实际流量测量时，采用查表从 Δp 得到 q_w ，

$$\Delta p = f(q_w)$$

从原理来说是无误差运算，但因实际测量时使用的差压变送器与出厂标定时使用的不是同一台差压变送器，所以实际上还是会引入一些误差。

制造厂规定技术指标是^[4]：

5~100%FS 区间	$\pm 1\%$ 读数
1~5%FS 区间	$\pm 0.1\%$ 量程上限
量程比	100:1

4 夹装式线性孔板流量计

图 1 所示的线性孔板差压装置为法兰连接型，其外形尺寸较大，价格也较高。而图 3 所示的夹装型线性孔板，外形尺寸却要小得多，价格也要低得多，所以在现场使用得更多。其工作原理与法兰连接型相同。

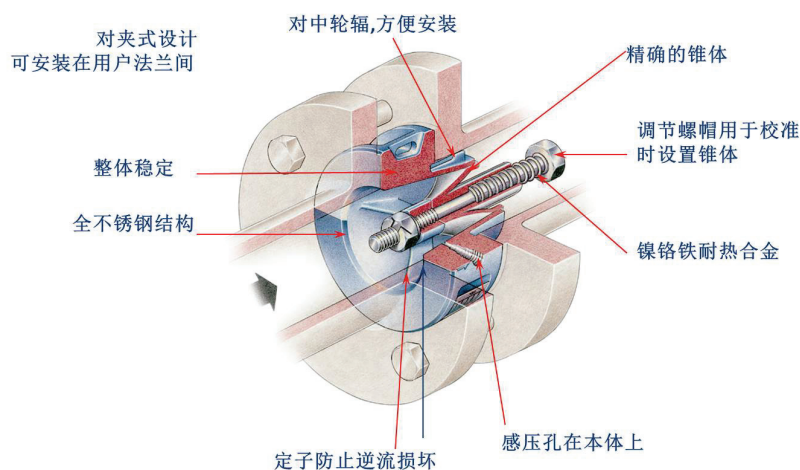


图 3 线性孔板（GILFLO ILVA 型节流装置）

图 4 所示为夹持型线性孔板流量计的安装。

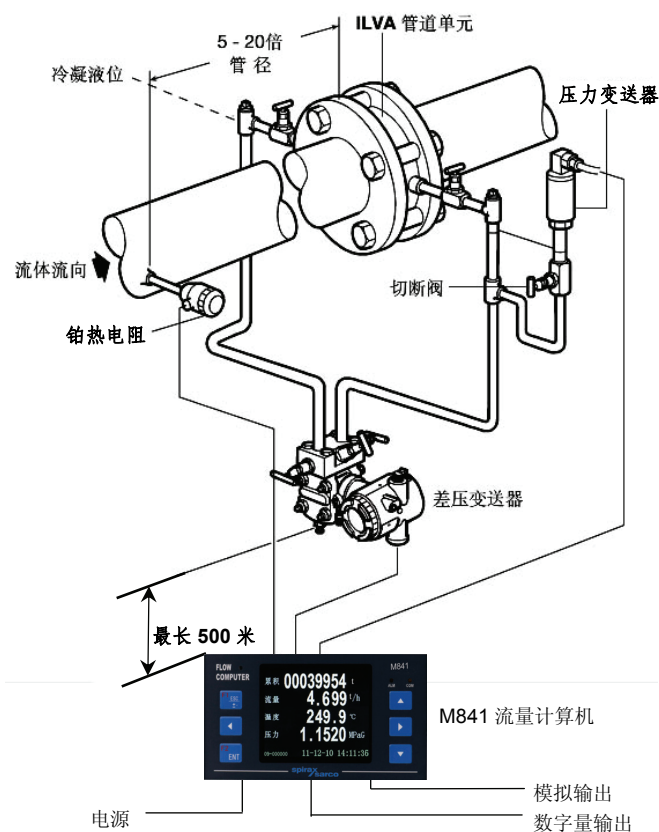


图 4 GILFLO ILVA 系统的安装

5 结束语

① 差压式流量计的系统不确定度与范围度密切相关，它是由多个因子按误差理论合成而得到，不能用传感器的不确定度代替系统不确定度，混淆视听。

② 扩展差压流量计范围度的实用方法有双量程方法和线性孔板方法，理论分析和实流检定都证明，量程比能达到 100:1。

③ 线性孔板由于其优良的整流作用，只要有前 6D 后 3D 的直管段，就能保证规定的精确度。

参考文献

1. 王建忠, 纪纲. 差压式流量计范围度问题的研究. 自动化仪表 2005(8): 4~6, 9
2. 王建忠, 纪纲. 差压式流量计为何仍有优势. 自动化仪表, 2006(7): 63~66
3. 纪纲, 纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦. 北京: 化学工业出版社. 2012
4. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧 第二版. 北京: 化学工业出版社. 2003, 250~257
5. ISO5167-2(2003E) Measurement of fluid by means of pressure differential devices inserted in circular cross section conduits running full-part2: orifice Plates
6. 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
7. GB/T 21446-2008 用标准孔板流量计测量天然气流量
8. 纪纲, 张延华, 郭绮就. 双量程差压流量计测量系统. 流量测量和能源管理经验汇编, 6-8, 中国仪器仪表学会过程检测仪表学会流量专业委员会, 1982 年, 重庆
9. 袁均刚, 倪长旺, 纪纲. 双量程差压流量计原理与应用. 2008 全国能源计量优秀论文集. 北京: 中国计量出版社. 2008:554~559.
10. 程建三, 纪纲. 双量程差压流量计的新进展. 石油化工自动化, 2009, 45(2): 54~57.

11. 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. 石油化工自动化. 2013(5): 52~56
12. 魏崢, 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. 石油化工自动化, 2013(6): 54~57
13. 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).
14. 宋徐辉. 影响蒸汽流量正确测量的因素和解决方法. 上海计量测试. 2002(1): 1~4

摘自《仪表世界》2017年6月号